



ASOCIACIÓN REGIONAL DE EMPRESAS DEL SECTOR
PETRÓLEO, GAS Y BIOCOMBUSTIBLES
EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE.

Guía Monitoreo e inspección en la gestión de integridad de ductos frente a las geoamenazas

Agosto 2016

PUBLICACIÓN ARPEL MP03-2016



MEJORES PRACTICAS



Guía Monitoreo e inspección en la gestión de integridad de ductos frente a las geoamenazas

MP03-2016

Agosto 2016

Autores - Integrantes del EPGEO en el ámbito del CODYTE

COGA - Fernando Velásquez, Francisco Oliveros • **ECOPETROL** - Jaime Aristizábal, Julián Chaves • **EP PETROECUADOR** - Ricardo Torres, Jorge González • **OCENSA** - Jon Hernández, Hugo García, Julián Corrales, Andrés Ocampo • **RECOPE** - Giovanni Bottazzi, Marvin Calderón • **YPF** - Leandro Ivorra • **YPFB** - Augusto Medinaceli

Revisores

- José Vicente Amórtegui, Profesor ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
- Manuel García López, Profesor UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Otros colaboradores

- Responsable del Área Técnica: Irene Alfaro, Directora de Downstream de ARPEL
- Edición: Susana Muñiz, ARPEL

Derechos de autor

Los derechos de autor de este documento, ya sea en su versión impresa o digital son propiedad de la Asociación Regional de Empresas del Sector Petróleo, Gas, y Biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe (ARPEL). Cualquier copia de este trabajo protegido deberá incluir esta nota sobre los derechos de autor.

Exoneración de responsabilidad

A pesar de haberse realizado esfuerzos para garantizar la exactitud de la información contenida en este documento, ni ARPEL, ni ninguno de sus socios, autores o revisores, ni las empresas e instituciones que ellos representan, asumen responsabilidad alguna por cualquier uso que se haga del mismo. Ninguna referencia a nombres o marcas registradas de fabricantes de equipos y/o procesos representa un endoso de parte de los autores, ARPEL o cualesquier de sus socios.



MONITOREO E INSPECCIÓN EN LA GESTIÓN DE INTEGRIDAD DE DUCTOS FRENTE A LAS GEOAMENAZAS

CONTENIDO

| | | |
|----------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | OBJETIVO y ALCANCE..... | 3 |
| 2.1. | OBJETIVO..... | 3 |
| 2.2. | ALCANCE..... | 3 |
| 3. | GEOAMENAZAS EN DUCTOS..... | 4 |
| 3.1. | GEOTÉCNICAS | 9 |
| 3.1.1. | Deslizamientos | 9 |
| 3.1.1.1. | Rotacional | 11 |
| 3.1.1.2. | Traslacional | 11 |
| 3.1.2. | Reptación | 17 |
| 3.1.3. | Ampliación o propagación lateral..... | 20 |
| 3.1.4. | Flujos | 22 |
| 3.1.4.1. | Flujo de suelo o tierra..... | 23 |
| 3.1.4.2. | Flujos de detritos | 24 |
| 3.1.4.3. | Flujos de lodo..... | 25 |
| 3.1.4.4. | Avalanchas | 26 |
| 3.1.4.5. | Lahares | 27 |
| 3.1.4.6. | Características generales de los flujos..... | 29 |
| 3.1.5. | Caídas | 30 |
| 3.1.6. | Volcamientos..... | 31 |
| 3.1.7. | Movimientos complejos | 32 |
| 3.2. | HIDROTÉCNICAS..... | 33 |
| 3.2.1. | Socavación (de fondo y márgenes)..... | 33 |
| 3.2.2. | Curso de agua paralelo al DDV | 35 |
| 3.2.3. | Inundaciones | 36 |
| 3.2.4. | Abandono del cauce (avulsión)..... | 37 |
| 3.2.5. | Avenidas torrenciales | 38 |
| 3.3. | EROSIÓN..... | 40 |
| 3.3.1. | Surcos y zanjas..... | 40 |
| 3.3.2. | Cárcavas | 42 |
| 3.3.3. | Pérdida de cobertura vegetal y nivel de tapada | 43 |
| 3.3.4. | Erosión eólica | 43 |
| 3.3.5. | Por oleaje | 45 |
| 3.3.6. | Erosión interna (<i>piping</i>) | 45 |
| 3.3.7. | Asentamientos | 47 |
| 3.4. | ACTIVIDAD SÍSMICA: TECTÓNICA / VOLCÁNICA | 48 |
| 3.4.1. | Actividad sísmica: tectónica | 50 |
| 3.4.1.1. | Efecto de fallas geológicas | 50 |
| 3.4.1.2. | Licuación o licuefacción..... | 52 |



| | |
|--|-----|
| 3.4.2. Actividad sísmica: volcánica | 53 |
| 3.5. METEOROLÓGICAS | 58 |
| 3.5.1. Descargas eléctricas/rayos | 58 |
| 3.5.2. Lluvias torrenciales | 60 |
| 3.5.2.1. Ejemplo de situación creada por lluvia torrencial | 61 |
| 3.5.3. Huracanes o tornados | 62 |
| ANEXO 3.1 PRINCIPALES GEOAMENAZAS CON POTENCIAL AFECTACIÓN A STD | 65 |
| ANEXO 3.2 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR ERUPCIONES VOLCÁNICAS | 87 |
| 4. SUPERVISIÓN E INSPECCIONES DEL DDV | 92 |
| 4.1. RECORRIDOS AÉREOS DE INSPECCIÓN | 93 |
| 4.1.1. Frecuencia de inspección aérea | 93 |
| 4.2. RECORRIDOS TERRESTRES DE INSPECCIÓN | 95 |
| 4.2.1. Frecuencia de inspección terrestre | 95 |
| 4.3. INSPECCIONES PUNTUALES | 97 |
| 4.3.1. Sitios sin obras de estabilización | 98 |
| 4.3.2. Sitios con obras de estabilización | 99 |
| 4.3.2.1. Estructuras (obras) de contención | 101 |
| 4.3.2.2. Muros de contención y sostenimiento | 102 |
| 4.3.2.3. Gaviones | 102 |
| 4.3.2.4. Barreras | 103 |
| 4.3.2.5. Trinchos | 104 |
| 4.3.2.6. Elementos estructurales resistentes | 104 |
| 4.3.2.7. Pilotes metálicos | 105 |
| 4.3.2.8. Obras de control de erosión y drenaje | 105 |
| 4.3.2.9. Coberturas | 105 |
| 4.3.2.10. Medidas de drenaje | 106 |
| 4.3.2.11. Sub-drenajes | 107 |
| 4.3.2.12. Obras de control de escorrentía superficial | 108 |
| 4.3.2.13. Cortacorrientes | 108 |
| 4.3.2.14. Canales laterales | 108 |
| 4.3.2.15. Colectores (descoles) | 108 |
| 4.3.2.16. Bermas de desviación | 108 |
| 4.3.2.17. Obras de protección de cauces | 110 |
| 4.3.2.18. Hidráulicas | 110 |
| 4.3.2.19. Estructurales | 111 |
| 4.3.2.20. Monitoreo | 111 |
| 4.3.2.21. Bioingeniería | 111 |
| 4.3.3. Sitio o punto crítico nuevo | 115 |
| 4.4. MONITOREO EN CRUCES DE CAMINOS | 116 |
| 4.4.1. Algunos ejemplos con relación a posibles interferencias y sus riesgos potenciales | 118 |
| 4.4.1.1. Ducto perpendicular a caminos | 118 |
| 4.4.1.2. Ducto paralelo al camino | 120 |
| 4.5. EVALUACIÓN DE ESTADO Y FUNCIONAMIENTO DE OBRAS | 121 |
| 4.5.1. Inspecciones geológicas-geotécnicas y monitoreo instrumental | 121 |
| 4.5.2. Inicio de monitoreo instrumental | 122 |
| 4.5.3. Monitoreo del eje del ducto | 122 |
| 4.5.4. Inspección geológico-geotécnica de detalle | 123 |



| | |
|---|-----|
| 4.5.5. Análisis y evaluación de información..... | 124 |
| 4.6. INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES..... | 125 |
| 4.6.1. Adquisición de imágenes y su interpretación..... | 126 |
| 4.6.2. Confirmación de campo para verificar interpretación..... | 126 |
| 4.6.3. Integración de resultados..... | 126 |
| 4.7. FORMATO DE REGISTRO DE SITIOS DE INTERÉS GEOTÉCNICO..... | 127 |
| ANEXO 4.1. FORMATO PARA INSPECCIONES AÉREAS..... | 128 |
| 5. MONITOREO DEL TERRENO - MEDICIÓN DE VARIABLES..... | 129 |
| 5.1. MONITOREO DE INDICADORES VISIBLES DE DESPLAZAMIENTO..... | 129 |
| 5.2. MONITOREO TOPOGRÁFICO..... | 131 |
| 5.2.1. Alineamiento con puntos de control fijos..... | 131 |
| 5.2.2. GPS-RTK..... | 133 |
| 5.2.3. Con estación total y prismas..... | 133 |
| 5.3. MONITOREO BATIMÉTRICO..... | 135 |
| 5.4. MONITOREO DE NIVEL DE RÍOS..... | 140 |
| 5.5. MONITOREO MEDIANTE INCLINÓMETROS..... | 142 |
| 5.5.1. Instalación de inclinómetros..... | 145 |
| 5.5.2. Lecturas de inclinómetros..... | 146 |
| 5.5.3. Presentación de resultados..... | 147 |
| 5.6. MONITOREO MEDIANTE PIEZÓMETROS..... | 150 |
| 5.6.1. Piezómetros de hilo vibrátil..... | 150 |
| 5.6.2. Piezómetros de tubo abierto o de Casagrande..... | 151 |
| 5.6.3. Instalación de piezómetros de tubo abierto o de Casagrande..... | 153 |
| 5.6.4. Lecturas de piezómetros de tubo abierto o de Casagrande..... | 154 |
| 5.6.5. Presentación de resultados..... | 155 |
| 5.7. MONITOREO MEDIANTE HUMEDÍMETROS..... | 156 |
| 5.8. MONITOREO MEDIANTE MARCADORES DE NIVEL DE ARENA..... | 156 |
| 5.9. MONITOREO EN TÚNELES..... | 158 |
| 5.9.1. Instalación de fisurómetros 2D y 3D..... | 160 |
| 5.9.2. Instalación de celdas de deformación..... | 160 |
| 5.9.3. Registro de separación entre puntos fijos mediante extensómetros..... | 161 |
| 5.9.4. Aforos de caudal en el sistema de control de filtraciones..... | 162 |
| 5.9.5. Revisión y mantenimiento del estado de revestimiento del ducto..... | 162 |
| 5.9.6. Revisión y mantenimiento de soportes del ducto..... | 162 |
| 5.10. MONITOREO MEDIANTE CABLES..... | 163 |
| 5.10.1. Reflectómetros en el dominio del tiempo (TDR)..... | 163 |
| 5.10.2. Reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo (OTDR)..... | 164 |
| 5.11. GEOFÍSICA APLICADA A LA GEOTECNIA..... | 164 |
| 5.12. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES Y RADAR..... | 165 |
| 5.13. ANEXO: FORMULARIO DE INCIDENTES E INSPECCIÓN DE DESLIZAMIENTOS UTILIZADO POR YPFB TRANSPORTE..... | 166 |
| 6. MONITOREO DE AGENTES DETONANTES - MEDICIÓN DE VARIABLES..... | 167 |
| 6.1. MONITOREO DE LLUVIAS..... | 169 |
| 6.1.1. ENSO: Oscilación del Sur El Niño..... | 170 |



| | |
|--|-----|
| 6.1.2. Cambio climático | 171 |
| 6.2. MONITOREO DE SISMOS | 178 |
| 6.3. MONITOREO DE ACTIVIDAD EÓLICA..... | 183 |
| 6.4. MONITOREO DE ACTIVIDAD VOLCÁNICA..... | 184 |
| 6.5. INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA EN LA ESTABILIDAD DE LOS DERECHOS DE VÍA DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS..... | 186 |
| 6.5.1. El hombre y el medio ambiente geomorfológico | 187 |
| 6.5.1.1. Recursos geomorfológicos en relación con la actividad antrópica | 188 |
| 6.5.1.2. La amenaza geomorfológica en relación con la vulnerabilidad del área | 188 |
| 6.5.2. Clasificación de los factores causantes de geoamenazas en función de su origen | 189 |
| 6.5.3. Gestión del territorio y su relación con geoamenazas..... | 192 |
| 6.6. ASPECTOS COMPLEMENTARIOS A TENER EN CUENTA EN EL PLAN DE MONITOREO DE LLUVIAS Y SISMOS | 193 |
| 7. MONITOREO DE DUCTOS..... | 194 |
| 7.1. INTRODUCCIÓN..... | 194 |
| 7.2. CLASIFICACIÓN DE EFECTOS POR GEOAMENAZAS EN DUCTOS..... | 194 |
| 7.2.1. Herramientas de inspección de ductos | 195 |
| 7.2.1.1. Herramienta inercial..... | 195 |
| 7.2.1.2. Herramienta geométrica | 197 |
| 7.2.2. Sensores de deformación | 197 |
| 7.2.3. Escáner 3D..... | 200 |
| 7.2.4. Otros métodos de monitoreo y medición de deformación | 201 |
| 7.2.4.1. Monitoreo topográfico en juntas (para ductos expuestos) y mediante chimeneas (varillas instaladas sobre el lomo del ducto)..... | 201 |
| 7.2.4.2. Fibra óptica geotécnica | 201 |
| 7.2.4.3. Monitoreo e inspección en juntas mediante calicatas de verificación | 201 |
| 7.2.4.4. Monitoreo de ductos en cruces aéreos..... | 202 |
| 7.3. ALGUNOS CRITERIOS PARA INTERPRETAR LA DEFORMACIÓN EN EL DUCTO Y SU RELACIÓN CON LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR GEOAMENAZAS..... | 202 |
| 7.4. ANEXO 1 - ASPECTOS TÉCNICOS DE INTERÉS DE LAS HERRAMIENTAS INERCIALES Y GEOMÉTRICAS | 205 |
| 7.4.1. La herramienta inercial..... | 205 |
| 7.4.1.1. Sistemas de medida inercial..... | 206 |
| 7.4.1.2. Procesamiento de datos..... | 206 |
| 7.4.2. La herramienta geométrica | 207 |
| 7.5. ANEXO 2 - CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS..... | 208 |
| 7.5.1. Por su evolución | 209 |
| 7.5.2. Por su origen | 209 |
| 7.5.3. Por su geometría | 210 |
| 7.5.4. Por su comportamiento mecánico | 210 |
| 7.6. ANEXO 3 - MÉTODO DE LECTURA DE GALGAS DE DEFORMACIÓN DE HILO VIBRANTE PUNTALES EN LAS JUNTAS..... | 211 |
| 7.6.1. Procesamiento de los datos | 211 |
| 7.6.2. Determinación de las deformaciones axiales en la circunferencia del ducto | 212 |
| 7.6.2.1. Arreglo de tres galgas a 90°..... | 212 |
| 7.6.2.2. Arreglo de tres galgas a 120°..... | 213 |
| 7.6.2.3. Arreglo de seis galgas a 60°..... | 214 |
| 7.6.3. Tabulación de los datos | 215 |
| 7.6.4. Gráfico de deformación axial vs. posición en el ducto | 216 |



| | |
|--|-----|
| 7.6.5. Criterios de evaluación | 216 |
| 7.6.5.1. Arreglo de tres galgas a 90° | 217 |
| 8. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG) | 219 |
| 8.1. MARCO CONCEPTUAL..... | 219 |
| 8.2. ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA? | 220 |
| 8.2.1. Descripción de aplicaciones de los SIG | 224 |
| 8.2.2. Ejemplos de aplicaciones..... | 225 |
| 8.2.2.1. Control de existencias y del proceso de trasiego | 225 |
| 8.2.2.2. Control de mantenimiento..... | 225 |
| 8.2.2.3. Control de servidumbres de paso | 225 |
| 8.2.2.4. Estudios de impacto ambiental..... | 225 |
| 8.2.2.5. Apoyo en las etapas de diseño y nuevas obras | 225 |
| 8.2.2.6. Selección de rutas óptimas | 226 |
| 8.2.2.7. Planificación de la respuesta en emergencias..... | 226 |
| 8.2.2.8. Monitoreo de variables ambientales para gestión del riesgo. | 226 |
| 8.2.2.9. Relevamiento de datos para el monitoreo de peligros ante deslizamientos e inundaciones..... | 226 |
| 8.2.3. Sistemas relacionados | 227 |
| 8.2.3.1. Sistemas de manejo de bases de datos | 227 |
| 8.2.3.2. Paquetes de diseño asistido por computadora..... | 227 |
| 8.2.3.3. Procesamiento de imágenes | 227 |
| 8.3. SISTEMAS Y PLATAFORMAS DE MONITOREO Y CONTROL DE TRABAJO DE CAMPO REMOTO | 228 |
| 8.3.1. El monitoreo directo - plataforma web SIG..... | 229 |
| 8.4. ¿QUÉ ES GIS ONLINE?..... | 230 |
| 8.5. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN | 231 |
| 8.6. ¿QUÉ SE PUEDE HACER CON GIS ONLINE?..... | 231 |
| 8.7. APLICACIONES DE ESTA TECNOLOGÍA EN LOS PROCESOS DE TRABAJO DE CAMPO EN LA EMPRESA..... | 231 |
| 8.8. ANEXO 8.1: GEOPROCESAMIENTOS FUNDAMENTALES EN SIG | 234 |
| 9. ANEXO 1: MATRIZ DE USO | 241 |
| 10. ANEXO 2: SOLUCIONES GEOTÉCNICAS APLICADAS A LA INTEGRIDAD DE DUCTOS | 242 |
| 10.1. LA GESTION DE INTEGRIDAD DE DUCTOS FRENTE A LAS GEOAMENAZAS <i>OLEODUCTO CARRASCO - COCHABAMBA</i> <i>“OCC”</i> | 242 |
| 10.1.1. Resumen ejecutivo..... | 242 |
| 10.1.2. Introducción..... | 243 |
| 10.1.3. Aplicación del Programa de Gestión de Integridad de Ductos | 244 |
| 10.1.3.1. Identificación de impactos potenciales | 244 |
| 10.1.3.2. Recolección y validación de datos | 245 |
| 10.1.3.3. Elaboración de historial de sucesos o eventos de cada ducto..... | 245 |
| 10.1.3.4. Establecer base de datos y mapeo de cada ducto | 245 |
| 10.1.3.5. Realizar la segmentación dinámica de cada ducto..... | 246 |
| 10.1.3.6. Realizar la caracterización y calificación de las geoamenazas..... | 246 |
| 10.1.3.7. Análisis de riesgo por geoamenazas | 247 |
| 10.1.3.8. Desarrollar el Plan Operativo | 249 |
| 10.1.4. Evaluación e Inspección de Integridad | 250 |
| 10.1.4.1. Problemática del sector..... | 250 |
| 10.1.4.2. Obras de mitigación propuestas | 250 |
| 10.1.5. Reparar o mitigar | 251 |



| | |
|---|-----|
| 10.1.6. Periodo de reevaluación | 252 |
| 10.2. ESTUDIO DE GEOLOGÍA DE SUPERFICIE - POLIDUCTO ESMERALDAS-SANTO DOMINGO | 255 |
| 10.2.1. Resumen ejecutivo..... | 255 |
| 10.2.2. Objetivos del estudio geológico | 256 |
| 10.2.3. Fases de investigación geológica y metodología..... | 256 |
| 10.2.4. Área de estudio..... | 257 |
| 10.2.5. GEOLOGÍA | 260 |
| 10.2.5.1. Formaciones geológicas aflorantes a lo largo del tramo del ducto | 260 |
| 10.2.6. EVALUACIÓN GEOLÓGICA DE SITIOS INESTABLES | 261 |
| 10.2.6.1. Sitio inestable SI-1 localizado en el sector "El Roto" | 261 |
| 10.2.6.2. Sitios inestables SI-2 a SI-8 identificados en el sector "Loma de Caple" | 262 |
| 10.2.6.3. Sitio inestable SI-9 identificado en el sector "El Mirador" | 268 |
| 10.3. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE SOLUCIONES DE INGENIERÍA PARA REPTACIÓN DE MASAS COLUVIALES EN SERRA DO MAR, BRASIL..... | 271 |
| 10.3.1. Resumen ejecutivo..... | 271 |
| 10.3.2. Introducción..... | 271 |
| 10.3.3. GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA DE SERRA DO MAR..... | 272 |
| 10.3.4. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE ORBIG | 274 |
| 10.3.5. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE OLAPA..... | 277 |
| 10.3.6. CONCLUSIONES..... | 282 |
| 10.3.7. RECONOCIMIENTOS..... | 283 |
| 10.4. PK 258+950 DE OCENSA - MONITOREO POR LLUVIAS | 284 |
| 10.4.1. Resumen ejecutivo..... | 284 |
| 10.4.2. Caso de estudio..... | 284 |
| 10.4.3. Conclusiones | 290 |
| 10.5. OLEODUCTO PUESTO HERNÁNDEZ – LUJAN DE CUYO, ARGENTINA, PK 62.500..... | 291 |
| 10.5.1. Resumen ejecutivo..... | 291 |
| 10.5.2. Caso de estudio..... | 291 |
| Situaciones comparativas: | 296 |
| 10.5.3. Conclusiones | 297 |
| 10.6. INFLUENCIA DEL TECTONISMO Y LA SISMICIDAD EN LA EVOLUCIÓN DE LA DINÁMICA FLUVIAL DE UN RÍO PRINCIPAL EN EL PIEDEMONTES LLANERO COLOMBIANO | 298 |
| 10.6.1. Resumen ejecutivo..... | 298 |
| 10.6.2. Caso de estudio..... | 298 |
| 10.7. IMPLEMENTACIÓN DE ARCGIS ONLINE EN RECOPE - COSTA RICA..... | 306 |
| 10.7.1. Resumen ejecutivo..... | 306 |
| 10.7.2. Caso de estudio..... | 308 |
| 10.7.2.1. Monitoreo mediante SIG online - deslizamiento Bajo Alumbre - zona pacífica | 308 |
| 10.7.2.2. Guía básica para la implementación de ArcGIS online..... | 313 |
| Publicaciones de servicios para RECOPE | 317 |
| 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 323 |



TABLAS y FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1 Tasas de fallas de ductos en el mundo..... | 1 |
| Tabla 3.1 Clasificación de amenazas en ductos | 4 |
| Tabla 3.2 Escalas de velocidades de movimientos de masas..... | 18 |
| Tabla 3.3 Clasificación de los flujos según su magnitud. | 29 |
| Tabla 3.4 Índice de Explosividad Volcánica - IEV | 48 |
| Tabla 3.5 Clasificación de la precipitación según la intensidad | 60 |
| Tabla 3.6 Principales geoamenazas con potencial afectación a STD | 86 |
| Tabla 3.7 Procesos eruptivos y su intensidad | 88 |
| Tabla 3.8 Ejemplo de escala de frecuencia de ocurrencia | 88 |
| Tabla 3.9 Ejemplo de análisis de eventos históricos..... | 89 |
| Tabla 3.10 Ejemplo de relación Frecuencia - Intensidad | 90 |
| Tabla 4.1 Cuadro resumen de inspección del DDV (aérea y terrestre) | 97 |
| Tabla 4.2 Aplicabilidad de los sistemas correctivo y preventivo de inestabilidad de taludes | 101 |
| Tabla 4.3 Tipos de cortacorrientes de acuerdo a su pendiente longitudinal | 108 |
| Tabla 4.4 Técnicas para mitigar amenazas por deslizamientos | 109 |
| Tabla 4.5 Métodos para control de erosión de taludes | 109 |
| Tabla 4.6 Amenazas hidrogeológicas y sus causas | 112 |
| Tabla 4.7 Alternativas para mitigar amenazas por crecientes extraordinarias y avalanchas..... | 112 |
| Tabla 4.8 Medidas de control biotécnico para la protección de taludes | 113 |
| Tabla 5.1. Cobertura mínima para ducto enterrado..... | 136 |
| Tabla 6.1 Relación Lluvias – Deslizamientos en función de distintas variables..... | 178 |
| Tabla 7.1 Correlaciones para determinar criterios de deformación en ductos | 205 |
| Tabla 7.2 Tipos de defectos, control, origen y efecto | 211 |
| Tabla 7.3 Sección de procesamiento de los datos. Arreglo de 3 galgas a 90° | 212 |
| Tabla 7.4 Presentación de los datos (ejemplo para un arreglo de tres galgas a 90°)..... | 215 |
| Tabla 7.5 Ejemplo de cálculo para galgas de deformación localizada a 90° | 217 |
| Tabla 7.6 Reporte de datos de cálculo para galgas de deformación localizada a 90° | 218 |
| Tabla 10.1 Caracterización de zonas que atraviesa el ducto OCC..... | 245 |
| Tabla 10.2 Caracterización de zonas que atraviesa el ducto OCC..... | 246 |
| Tabla 10.3 Resultados de probabilidad de falla (Pf) por evento | 248 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 10.4 Clasificación de la Probabilidad de Falla | 249 |
| Tabla 10.5 Clasificación de probabilidades de falla del ducto OCC..... | 249 |
| Tabla 10.6 Programa de evaluación y reevaluación de riesgos por geoamenazas | 252 |
| Tabla 10.7 Comparación de resultados de evaluación y reevaluación - ducto OCC | 253 |
| Tabla 10.9 Variables independientes consideradas para los modelos | 286 |
| Tabla 10.8 Estaciones de muestreo durante la fase de geología de superficie y exploración..... | 258 |
| | |
| Figura 3.1 Relación entre Geoamenazas (actividad, magnitud y tiempo de ocurrencia) y Planes de Gestión | 5 |
| Figura 3.2 Elementos tectónicos globales | 6 |
| Figura 3.3 Zonas con mayor actividad sísmica y volcánica | 6 |
| Figuras 3.4a y 3.4b Precipitación anual promedio..... | 7 |
| Figura 3.5 Principales direcciones de vientos en América Latina en el mes de enero | 8 |
| Figura 3.6 Formas del relieve sudamericano | 9 |
| Figura 3.7 Partes de un deslizamiento..... | 10 |
| Figura 3.8 Deslizamiento rotacional | 11 |
| Figura 3.9 Deslizamiento traslacional en un DDV | 12 |
| Figura 3.10 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos | 14 |
| Figura 3.11 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos | 15 |
| Figura 3.12 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos | 16 |
| Figura 3.13 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos | 17 |
| Figura 3.14 Ejemplo de reptación de suelos | 19 |
| Figura 3.15 Ejemplo de reptación de suelos | 19 |
| Figura 3.16 Ejemplo de reptación..... | 20 |
| Figura 3.17 Propagación lateral lenta..... | 21 |
| Figura 3.18 Propagación lateral rápida..... | 22 |
| Figura 3.19 Efecto de la propagación lateral rápida | 22 |
| Figura 3.20 Esquema de un flujo de tierra..... | 23 |



| | |
|---|----|
| Figura 3.21 Flujo de tierras..... | 24 |
| Figura 3.22 Sección típica de flujo de detritos..... | 25 |
| Figura 3.23 Flujo de detritos sobre un DDV..... | 25 |
| Figura 3.24 Flujo de lodos a un lado de un DDV..... | 26 |
| Figura 3.25 Avalancha..... | 27 |
| Figura 3.26 Efectos de lahares..... | 28 |
| Figura 3.27 Efectos de caída de rocas sobre ductos..... | 31 |
| Figura 3.28 Ejemplo de volcamiento de roca..... | 32 |
| Figura 3.29 Movimiento complejo..... | 33 |
| Figura 3.30 Socavación de fondo..... | 34 |
| Figura 3.31 Socavación lateral..... | 35 |
| Figura 3.32 Curso de agua paralelo al DDV..... | 36 |
| Figura 3.33 Efecto de inundación en un DDV..... | 37 |
| Figura 3.34 Río trezado en los llanos orientales colombianos..... | 38 |
| Figura 3.35 Socavación pronunciada debida a una avenida torrencial..... | 39 |
| Figura 3.36 Avenida torrencial..... | 40 |
| Figura 3.37 Erosión por surcos, DDV en el Magdalena medio Colombiano..... | 41 |
| Figura 3.38 Erosión por cárcavas en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos..... | 42 |
| Figura 3.39 Pérdida de cobertura vegetal y de nivel de tapada..... | 43 |
| Figura 3.40 Erosión eólica en un DDV..... | 44 |
| Figura 3.41 Erosión por oleaje..... | 45 |
| Figura 3.42 Etapas de erosión interna en ductos enterrados..... | 46 |
| Figura 3.43 Erosión interna..... | 47 |
| Figura 3.44 Asentamiento..... | 48 |
| Figura 3.45 Medidas preventivas de los efectos de sismicidad en ductos..... | 52 |
| Figura 3.46 Licuefacción derivada de un terremoto..... | 53 |
| Figura 3.47 Avenida de los Volcanes - Callejón Interandino, Ecuador..... | 54 |
| Figura 3.48 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002..... | 56 |
| Figura 3.49 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002..... | 57 |
| Figura 3.50 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002..... | 57 |
| Figura 3.51 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002..... | 58 |



| | |
|---|-----|
| Figura 3.52 Detector portátil de descargas eléctricas | 59 |
| Figura 3.53 Ejemplo de pronóstico meteorológico de un STD..... | 60 |
| Figura 3.54 Camino erosionado por lluvia torrencial..... | 61 |
| Figura 3.55 Desmoronamiento por lluvia torrencial..... | 62 |
| Figura 3.56 Huracán | 63 |
| Figura 3.57 Estimación de la afectación del oleoducto y tiempo de llegada de flujos. Volcán Cotopaxi, Ecuador..... | 91 |
| Figura 4.1 Deslizamiento identificado en recorrido aéreo | 94 |
| Figura 4.2 Visitas puntuales para seguimiento a funcionamiento de obras existentes | 100 |
| Figura 4.3 Muros de gaviones | 103 |
| Figura 4.4 Zanja confinada con sacos de suelo | 103 |
| Figura 4.5 Trinchos | 104 |
| Figura 4.6 Deslizamiento estabilizado con trinchos metálicos y revegetación | 104 |
| Figura 4.7 Elementos estructurales resistentes..... | 105 |
| Figura 4.8 Cara de concreto, anclajes y drenajes profundos para la estabilización del talud | 106 |
| Figura 4.9 Construcción de drenes horizontales..... | 106 |
| Figura 4.10 Disposición y eficacia de los sistemas de drenaje en un talud | 107 |
| Figura 4.11 Medidas de drenaje y protección en taludes..... | 107 |
| Figura 4.12 Protección de márgenes de corrientes de agua: gaviones y tablestacas | 110 |
| Figura 4.13 Determinación de las técnicas de estabilización biotécnica a utilizar de acuerdo con las propiedades del sitio | 114 |
| Figura 4.14 Corte lateral del camino cuando el ducto es perpendicular | 118 |
| Figura 4.15 Señalización y protección superior de un ducto que cruza una vía | 119 |
| Figura 4.16 Protecciones metálicas para ductos que cruzan caminos..... | 119 |
| Figura 4.17 Corte transversal de un camino con ducto paralelo | 120 |
| Figura 4.18 Señalización y protección superior de un ducto paralelo al camino | 120 |
| Figura 4.19 Ejemplos de imágenes para análisis geotécnico | 127 |
| Figura 5.1 Marcas superficiales en el terreno formando una línea recta | 130 |
| Figura 5.2 Construcción de BM o puntos fijos en el terreno | 131 |
| Figura 5.3 Monitoreo topográfico mediante alineamiento con puntos de control fijos..... | 132 |
| Figura 5.4 Ubicación de los mojones si el movimiento es perpendicular al ducto | 134 |
| Figura 5.5 Puntos de control topográfico | 134 |



| | |
|---|-----|
| Figura 5.6 Vista en planta de los vectores de desplazamiento de los mojones | 135 |
| Figura 5.7 Actividades de detección y demarcación del ducto | 136 |
| Figura 5.8 Construcción de mojones de referencia | 137 |
| Figura 5.9 GPS de doble frecuencia | 137 |
| Figura 5.10 Instalación de línea de vida..... | 138 |
| Figura 5.11 Armado de la estación en margen del río para levantamiento de secciones y detalles..... | 138 |
| Figura 5.12 Localización del ducto en la sección transversal | 139 |
| Figura 5.13 Comparación con batimetrías anteriores | 140 |
| Figura 5.14 Imagen de un sensor de nivel de ríos | 141 |
| Figura 5.15 Tubería en fibra de vidrio ranurada diametralmente | 142 |
| Figura 5.16 Diámetros de las tuberías de los inclinómetros | 143 |
| Figura 5.17 Torpedo de lecturas..... | 143 |
| Figura 5.18 Esquema del aspecto de un inclinómetro y de las lecturas con torpedo | 144 |
| Figura 5.19 Variación de los desplazamientos acumulados con la profundidad..... | 148 |
| Figura 5.20 Variación de los desplazamientos en Sentido A con respecto al Sentido B | 149 |
| Figura 5.21 Desplazamientos acumulados vs. fecha..... | 149 |
| Figura 5.22 Piezómetros de alambre vibrátil | 150 |
| Figura 5.23 Esquema de piezómetro de cuerda vibrante | 151 |
| Figura 5.24 Puntas tipo Casagrande | 152 |
| Figura 5.25 Indicador de niveles de agua | 152 |
| Figura 5.26 Piezómetro de tubo abierto..... | 153 |
| Figura 5.27 Gráficas para un piezómetro de alambre vibrátil | 155 |
| Figura 5.28 Aplicación de marcadores de nivel de arena | 156 |
| Figura 5.29 Pronóstico de velocidades de viento a 10 m | 157 |
| Figura 5.30 Pronóstico de dirección de viento a 10 m..... | 157 |
| Figura 5.31 Variables y sistemas de monitoreo a nivel global para un túnel | 159 |
| Figura 5.32 Variables y sistemas de monitoreo a nivel local para un túnel | 159 |
| Figura 5.33 Fisurómetro de placa | 160 |
| Figura 5.34 Celdas de deformación | 161 |
| Figura 5.35 Comportamiento de hastiales | 161 |
| Figura 5.36 Sistema de control de filtraciones | 162 |



| | |
|--|-----|
| Figura 5.37 Instalación de cables TDR | 163 |
| Figura 5.38 Dislocación del cable TDR | 164 |
| Figura 6.1 Definición de planes de atención en función del tipo, actividad y magnitud de la geoamenaza..... | 168 |
| Figura 6.5 Mapa de precipitaciones anuales en América Latina..... | 173 |
| Figura 6.6 Relación entre anomalías de la TSM y flujos en el pacífico tropical..... | 174 |
| Figura 6.7 Componentes de un sistema de alerta temprana por lluvias | 174 |
| Figura 6.8 Escala de eventos hidrometeorológicos | 176 |
| Figura 6.9 Principales sistemas de fallas y sismicidad (1960 a 1995, mb \geq 5) en Perú..... | 178 |
| Figura 6.10 Ubicación de presas en zonas sísmicas de Argentina..... | 179 |
| Figura 6.11 Manifestaciones de neotectonismo que indujeron el cambio del curso del cauce del Río Charte..... | 180 |
| Figura 6.12 Zonas sísmicas de Argentina y ubicación de los ductos operados por YPF (3.000 km aprox.) | 182 |
| Figura 6.13 Zonas sísmicas de Latinoamérica | 183 |
| Figura 6.14 Situación acontecida en poliducto Villa Mercedes – La Matanza (pk 80.200 Córdoba, Argentina) | 184 |
| Figura 6.15 Actividad antrópica sobre un DDV | 187 |
| Figura 6.16 Relaciones entre el ambiente geomorfológico y la actividad antrópica | 188 |
| Figura 6.17 Esquema de determinación de la inestabilidad geomorfológica | 189 |
| Figura 6.18 Factores contribuyentes y detonantes de geoamenazas..... | 190 |
| Figura 6.19 Flujos de tierra y de detritos que afectaron la integridad del Oleoducto TransAndino | 192 |
| Figura 7.1 Instalación típica de galgas de deformación en el ducto | 198 |
| Figura 7.2 Galgas de deformación soldadas al ducto. | 199 |
| Figura 7.3 Vista de escáner 3D | 200 |
| Figura 7.4 Movimientos de masa en ductos..... | 203 |
| Figura 7.5 Tipos de deformación del ducto respecto a su orientación en función del deslizamiento | 204 |
| Figura 7.6 Sistema de “dipper” y odómetro | 207 |
| Figura 7.7 Arreglo de 3 galgas a 90° | 213 |
| Figura 7.8 Arreglo de 3 galgas a 120° | 213 |
| Figura 7.9 Arreglo de 6 galgas a 60° | 214 |
| Figura 7.10 Deformación axial vs. posición en el ducto..... | 216 |



| | |
|---|-----|
| Figura 8.1. Modelos vectoriales y raster..... | 219 |
| Figura 8.2 Organización de la información por capas..... | 221 |
| Figura 8.3 Concepto gráfico de SIG..... | 222 |
| Figura 8.4 Evolución de las aplicaciones..... | 223 |
| Figura 8.5 Usuarios – Especialistas SIG..... | 224 |
| Figura 8.6 SIG – Aplicaciones..... | 226 |
| Figura 8.7 Esquema de interconexión de un sistema SCADA general..... | 228 |
| Figura 8.8 Ejemplo gráfico de geoprocesamiento y disposición de geodatos..... | 229 |
| Figura 8.9 Acceso a todo para todos por medio de GIS online..... | 230 |
| Figura 8.10 Entorno de gestión de un SIG en línea..... | 231 |
| Figura 8.11 Mapa temático..... | 240 |
| Figura 10.1 Gestión de Integridad de Ductos YPFBT..... | 243 |
| Figura 10.2 Vista general del ducto OCC..... | 244 |
| Figura 10.3 Modelo de clasificación de las geoamenazas de YPFBT..... | 244 |
| Figura 10.4 Ejemplo de segmentación del ducto OCC..... | 246 |
| Figura 10.5 Cruce aéreo KP 140+708-140+746..... | 247 |
| Figura 10.6 Probabilidad de falla del ducto OCC-2011..... | 248 |
| Figura 10.7 Vista ampliada de la zona KP 140+000 – 150+000..... | 248 |
| Figura 10.8 Bandas de la Probabilidad de Falla..... | 249 |
| Figura 10.9 Márgenes del Río Cristal Mayu - evaluación 2011..... | 250 |
| Figura 10.10 Esquema de ubicación de obras propuestas..... | 251 |
| Figura 10.11 Obras de contención - margen derecho - Río Cristal Mayu..... | 251 |
| Figura 10.12 Probabilidad de falla - ducto OCC-2011..... | 253 |
| Figura 10.13 Probabilidad de falla ducto OCC-2013..... | 253 |
| Figura 10.14 Mapa de ubicación del tramo del ducto Esmeraldas – Santo Domingo..... | 255 |
| Figura 10.15 Localización de estaciones de muestreo..... | 257 |
| Figura 10.16 Mapa geológico regional y la proyección espacial del ducto..... | 259 |
| Figura 10.17 Extracto de la carta topográfica Viche a escala 1:50.000..... | 261 |
| Figura 10.18 Paisaje geomorfológico del terreno..... | 262 |
| Figura 10.19 Extractos de las cartas topográficas Mirador y Viche a escalas 1:50.000..... | 263 |
| Figura 10.20 Escarpe activo de deslizamiento en el sitio inestable SI-2..... | 264 |



| | | |
|---------------|---|-----|
| Figura 10.21 | Escarpe activo de deslizamiento en el sitio inestable SI-3..... | 265 |
| Figura 10.22 | Escarpe activo de deslizamiento en el sitio inestable SI-4 | 265 |
| Figura 10.23 | Denudación de la cobertura vegetal y formación de potenciales escarpes de deslizamientos para el sitio inestable SI-5 | 266 |
| Figura 10.24 | Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-6..... | 267 |
| Figura 10.25 | Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-7..... | 267 |
| Figura 10.26 | Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-8..... | 268 |
| Figura 10.27 | Extracto de la carta topográfica Mirador a escala 1:50.000 | 269 |
| Figura 10.28 | Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-9..... | 270 |
| Figura 10.41 | Sectorización climática del Oleoducto OCENSA | 285 |
| Figura 10.42 | Informe semanal de amenaza de deslizamientos debido a las lluvias | 286 |
| Figura 10.43 | Evolución de lluvias estación Betania año 2012 | 287 |
| Figura 10.44 | Deslizamiento PK 258+950 OCENSA de tipo traslacional (margen izquierdo del DDV) | 287 |
| Figura 10.45 | Deslizamiento PK 258+950 OCENSA (vista desde la pata del deslizamiento) | 288 |
| Figura 10.46 | Clasificación: prioridad 0 o de emergencia para el deslizamiento PK 258+950 | 288 |
| Figura 10.47 | PK 258+950 OCENSA Construcción de obras de mitigación del deslizamiento | 289 |
| Figura 10.48 | PK 258+950 OCENSA Construcción obras de mitigación deslizamiento..... | 290 |
| Figura 10.49 | Oleoducto expuesto | 292 |
| Figura 10.50 | Oleoducto expuesto..... | 292 |
| Figura 10.51 | Oleoducto expuesto..... | 293 |
| Figura 10.52 | Situación original del cauce. | 293 |
| Figura 10.53 | Esquema de lingado de la línea | 294 |
| Figura 10.54 | Movimiento de suelo realizado (desmonte y aporte)..... | 295 |
| Figura 10.55 | Perfil topográfico de la zona | 295 |
| Figura 10.56 | Situación original del río | 296 |
| Figura 10.57 | Situación actual | 296 |
| Figura 10.58 | Ubicación de enrocado inferior | 297 |
| Figura 10.59. | Diagrama esquemático del relieve de la Cordillera Oriental y su relación con sistemas de fallas geológicas activas y eventos sísmicos | 299 |
| Figura 10.60. | Vista general del Río Guacavía y de sus afluentes principales | 300 |
| Figura 10.70 | Foto digital para control | 309 |
| Figura 10.71 | Fotos comparativas de la zona de deslizamiento | 310 |



| | |
|--|-----|
| Figura 10.72 Ubicación de puntos de control geodésico de la zona de deslizamiento | 312 |
| Figura 10.73 Visita de campo para control de puntos | 312 |
| Figura 10.74 Resultados de las mediciones de posición relativa entre puntos de control, efectuados en junio, julio, agosto y octubre | 313 |
| Figura 10.75 Sitio de administración SIG en línea | 314 |
| Figura 10.76 Administración de usuarios SIG en línea..... | 315 |
| Figura 10.77 Vista Mapa desde Sitio Administración SIG en línea..... | 316 |
| Figura 10.78 Aplicación SIG en línea. Registro de Datos. Estudios Básicos..... | 317 |
| Figura 10.79 Aplicación SIG en línea. Control Inspecciones..... | 319 |
| Figura 10.80 Aplicación SIG en línea. Registro de datos de servidumbres y propiedades | 320 |
| Figura 10.81 Aplicación SIG en línea. Registro de servidumbres y propiedades..... | 321 |
| Figura 10.84 Herramientas de acceso a SIG en línea | 322 |



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de ductos para transporte de hidrocarburos son proyectos lineales que pueden alcanzar gran longitud, toda vez que son los encargados de conectar la cadena valor entre los lugares de extracción, exportación, refinación, acopio y distribución en cada país. Por esta razón, a lo largo de su trazado, atraviesan terrenos sometidos a procesos naturales y características geomorfológicas que pueden ser adversas para la estabilidad del terreno donde se encuentran emplazados los ductos, y por ende tienen el potencial de amenazar su integridad. Dentro de este contexto, se abordará el tema de las geoamenazas, entre las que se cuentan las debidas a procesos geológicos, hidrológicos y sísmicos.

La situación descrita es especialmente crítica en la región de los Andes, al oeste de Suramérica, Centroamérica y las formaciones montañosas de la Sierra del Mar en Brasil, en donde las características geomorfológicas de los terrenos ocupados por los trazados presentan pendientes, formas y longitudes del terreno, y densidades y patrones de drenaje (morfometría), que son desfavorables para la estabilidad de las laderas; igualmente desfavorables son los ambientes de formación (morfogénesis) y aquellos donde se han manifestado los procesos (morfodinámica). Estas características son determinantes en la susceptibilidad a que se materialicen las geoamenazas.

En este marco de susceptibilidad, en el cual en varios casos los trazados atraviesan zonas tectónicamente activas y sujetas a altos regímenes de precipitación, y se presentan cambios notables en la intensidad y frecuencia de lluvias, los efectos negativos que genera la actividad antrópica por cambios del uso del suelo (i.e. deforestación y expansión urbana) u otros elementos detonantes, son factores que aumentan la probabilidad de ocurrencia de eventos que pueden ocasionar fallas a los ductos.

Estas condiciones naturales en Latinoamérica, se reflejan en la Tabla 1.1, en la cual se establece que las tasas de fallas de ductos debido a las geoamenazas en la región son mucho mayores que en otras regiones del mundo. Mientras que dicho indicador es de 0,0045 para Estados Unidos, por ejemplo, en Sudamérica se registran tasas de 2,8 y 0,33 fallas por 1000 kilómetros de ducto por año.

| Región | Tasa de Falla Reportada por 1000 km-año | Producto en el Ducto | Fuente de Datos |
|-------------------------|---|----------------------|------------------------------|
| EE.UU. | 0,0045 | Gas | DOT ¹ (1984-2001) |
| Europa | 0,01 | Gas | Sweeney, 2005 |
| Canadá (solo Alberta) | 0,0016 | Gas | Alberta EUB (1980-1997) |
| | 0,0032 | Crudo | |
| Canadá | 0,00422 | Gas | Canada NEB (1984-2003) |
| | 0,00543 | Líquido | |
| Sudamérica (Cordillera) | 2,8 (tecnología antigua)* | Ambos | Sweeney, 2005 |
| | 0,33 (tecnología nueva)* | | |

Fuente: modificado de Sweeney et. al., 2004.

* La distinción entre tecnología antigua y nueva que hace el autor citado se refiere a antes y después de aplicada formalmente la Geotecnia de Sistemas de Conducción de Hidrocarburos en terrenos montañosos.

Tabla 1.1 Tasas de fallas de ductos en el mundo

¹ Departamento de Transporte, EE.UU.



Los diseñadores y encargados de la operación y mantenimiento de ductos para el transporte de hidrocarburos en Latinoamérica se ven enfrentados entonces a un importante reto; sin embargo, la literatura técnica es escasa en referencias que traten este tópico, y los expertos tienen un enfoque tradicional de geotecnia o hidrotecnia, pero no aplicado a ductos. De hecho, las categorías de análisis de riesgos de los sistemas de integridad incluyen a las geoamenazas dentro de un grupo denominado “clima y fuerzas externas”, lo que da una idea de la necesidad de profundizar el conocimiento que hasta ahora se tiene respecto al tema.

Para gestionar las geoamenazas se requiere poner en práctica un programa programa de manejo de integridad que permita identificar, valorar, priorizar, monitorear y mitigar sus efectos sobre la infraestructura. Esta guía se enfoca en identificar y cuantificar la evolución de las geoamenazas, por medio de un ejercicio que permita reconocer las diferentes posibilidades que se encuentran en la industria. Las actividades de supervisión y monitoreo se desarrollan básicamente en la etapa de diseño u operación; buena parte del éxito del mantenimiento ante geoamenazas depende de un diseño apropiado del trazado y de las obras de protección, prevención y remediación.

La guía busca que el lector reconozca cuales son las geoamenazas a las que se puede ver enfrentado un ducto en su recorrido, por esa razón en el Capítulo 3 se definen las diferentes amenazas clasificadas de acuerdo con el proceso que les dio origen así: geotécnicas, hidrotécnicas, erosiones, sísmicas y meteorológicas.

Para identificar y dimensionar en superficie estas amenazas, en el Capítulo 4 se describen las supervisiones e inspecciones en las que se reconoce la superficie del DDV² y las evidencias visibles de inestabilidad y falla, así como los registros que se deben llenar para su procesamiento.

Los monitoreos del terreno, en los cuales se determinan los desplazamientos y cambios de propiedades - mediante instrumentos de precisión, se listan en el Capítulo 5. Entre éstos se pueden identificar los monitoreos topográficos, batimetrías, mediciones con inclinómetros y piezómetros, etc. En el Capítulo 6 se presentan los detonantes que materializan las amenazas y posibilitan la ocurrencia de deslizamientos, avenidas torrenciales y erosiones, entre otros.

La medición del efecto de la geoamenaza sobre el ducto (desplazamiento, deformación, daño mecánico) es tratada en el Capítulo 7; allí se contempla la utilización de la técnica de herramienta instrumentada, la cual es el método más confiable de monitoreo que detecta el desplazamiento y la deformación en el ducto. Finalmente, los sistemas de información geográfica, como herramienta versátil y variada para visualizar, almacenar, evaluar y gestionar las geoamenazas y el monitoreo, se describen en el Capítulo 8. Al final de la guía se consolidan experiencias concretas de aplicación de las técnicas explicadas, para dar mayor claridad y aplicabilidad de los conceptos.

La nutrida y entusiasta colaboración de los autores de la guía muestra la importancia que tiene el tema, con base en la información técnica recopilada y analizada. Sin embargo, es de aclarar que el presente texto es una construcción colectiva del conocimiento y experiencias adquiridas en las diferentes empresas involucradas en la redacción del presente documento.

² Derecho de vía



2. OBJETIVO y ALCANCE

2.1. Objetivo

Documentar las mejores prácticas y lecciones aprendidas en el monitoreo e inspección de ductos, DDV y agentes detonantes de procesos de inestabilidad del terreno tendientes a amenazar la integridad de ductos, para identificar y medir la existencia, evolución y efecto de las geoamenazas en sistemas de transporte por ductos.

En particular, ésta guía pretende difundir las mejores prácticas existentes, para detectar y hacer seguimiento a las diferentes variables que afectan la integridad de ductos, por la exposición ante las geoamenazas. Asimismo, se busca generar un compendio de las técnicas de supervisión, monitoreo e instrumentación existentes en la industria y evaluar su efectividad y ámbito de aplicación adecuados.

2.2. Alcance

El presente documento puede establecerse como una referencia a los socios de ARPEL, en lo que se refiere al monitoreo e inspección de geoamenazas, para las empresas de operación y mantenimiento de sistemas de transporte por ductos; abarca las definiciones y descripción de las geoamenazas y los mecanismos de supervisión y monitoreo, su aplicación, archivo y criterios para el manejo de la información.

Del mismo modo, puede constituirse en una primera aproximación en el objetivo de establecerse como una fuente de conocimiento y consulta sobre el tema entre las empresas socias de ARPEL, que operan y mantienen sistemas de transporte por ductos, con centros académicos y demás entes externos.



3. GEOAMENAZAS EN DUCTOS

Las amenazas a los ductos se definen por ASME de acuerdo con su ocurrencia en el tiempo como “dependientes, estables e independientes”³. En la Tabla 3.1 se presenta la clasificación de las amenazas basada en la amenaza de clima y fuerzas externas, que es equivalente a las geoamenazas.

| Ítem | Descripción de manifestación | Amenaza |
|------|------------------------------|--|
| 1 | Dependientes del Tiempo | 1. Corrosión Interna 2. Corrosión Externa 3. Stress Corrosión Cracking (SCC) |
| 2 | Estables en el Tiempo | 4. Defectos de Fabricación 5. Falla de Equipos 6. Defectos de Construcción |
| 3 | Independientes del Tiempo | 7. Daños Mecánico / Daños por terceros 8. Operaciones Incorrectas 9. Clima y Fuerzas Externas |

Fuente: ASME. *Managing system integrity of gas pipelines* (2010, p. 5).

Tabla 3.1 Clasificación de amenazas en ductos

Se destaca que la dependencia o independencia del tiempo no se aplica como un criterio único para la amenaza por clima y fuerzas externas cuando se tiene en cuenta el concepto de vulnerabilidad, toda vez que en función de los mecanismos de falla presentes o el tipo de evento geotécnico presente, el efecto sobre el elemento vulnerable puede o no ser función de la variable tiempo.

Para la definición de las geoamenazas, se deben tener en cuenta todas las variables que pueden modificar el contexto geológico-geotécnico en el que está localizado el STD (Sistema de Transporte por Ductos).

Las geoamenazas son afectaciones potenciales a la integridad de los ductos causadas por procesos de inestabilidad del terreno debidos a la acción de corrientes de agua, erosión o movimientos de masa y a la actividad tectónica, la cual se evidencia por el movimiento de las fallas geológicas y los cambios en los taludes del terreno.⁴

Para la identificación e interpretación de las geoamenazas, se debería realizar un análisis de su origen, mediante el control de escalas de medida, para definir patrones de potencial afectación a los STD.

En este ejercicio, es necesario tener en cuenta el efecto de la temporalidad de la geoamenaza y su relación con el plan de gestión derivado (véase la Figura 3.1), los cuales tienen en cuenta la siguiente información, como puede observarse en las Figuras 3.11 a 3.14:

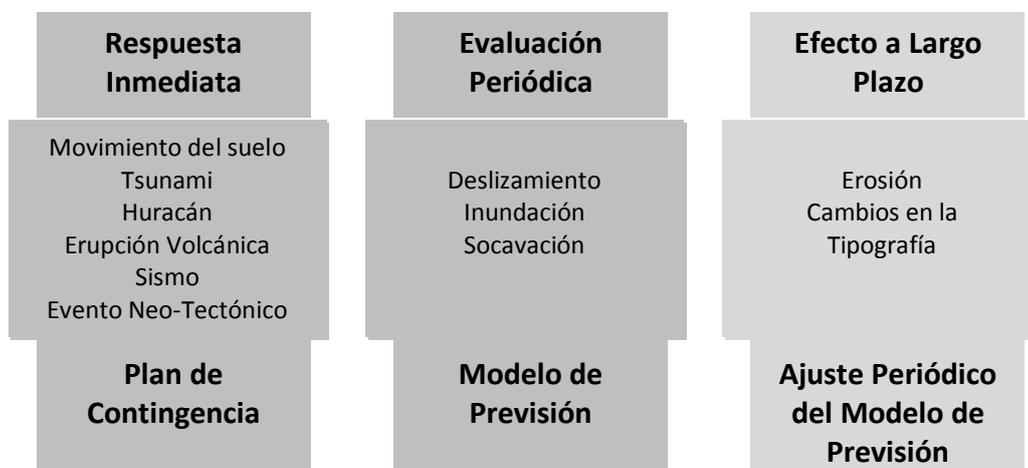
- Tipo.
- Magnitud (volumen).
- Tasa de movimiento (fuerza destructiva).
- Grado de actividad (asociado a la temporalidad).

³ ASME (2010, p.5)

⁴ Amórtegui (2011)



- Incidencia en la vulnerabilidad del ducto (características estructurales del ducto, disposición en la ladera, relación entre la dirección del movimiento y la del ducto, entre otros aspectos).



Fuente: Aristizabal, et al. *Overview of the Risk Management Strategy of Climate And External Forces Threat In Vit-Ecopetrol* (2015, p.4).

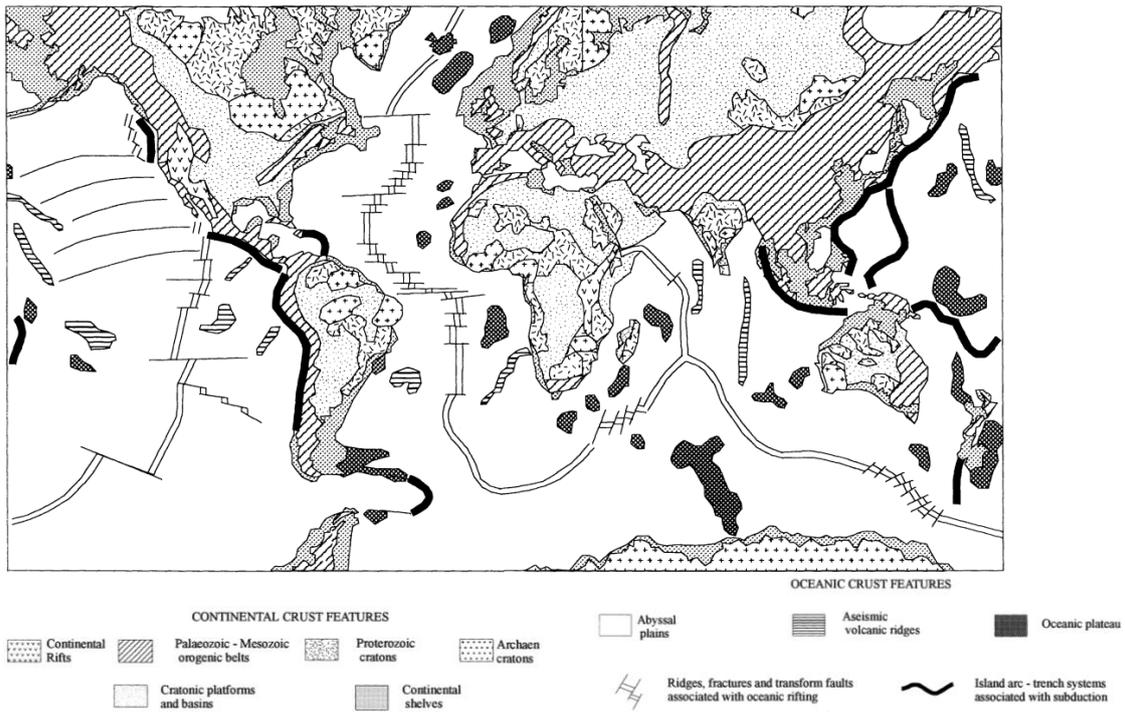
Figura 3.1 Relación entre Geoamenazas (actividad, magnitud y tiempo de ocurrencia) y Planes de Gestión

Si bien en la Figura 3.1, los eventos neo-tectónicos se clasifican con temporalidad “Respuesta Inmediata”, análisis recientes han permitido confirmar que estos eventos pueden considerarse en las otras dos temporalidades también. Por ejemplo, desde el punto de vista de los efectos por deformaciones acumuladas en ductos con varias décadas de construidos, los eventos neo-tectónicos se pueden tener en cuenta en “Evaluación Periódica”; o el caso de tramos con proyección de deformaciones por neo-tectonismo, que a futuro deban ser tenidos en cuenta pero que no representen amenaza actual al ducto, se puede tener en cuenta en “Efecto a Largo Plazo”.

Por otro lado, las geoamenazas son un efecto visible que resultan de la conjunción de eventos contribuyentes o detonantes que están asociados a los siguientes factores:

- las condiciones del terreno (tipo de materiales, permeabilidad, rigidez, etc.);
- procesos geomorfológicos (tectonismo, vulcanismo, tubificación, etc.);
- proceso físicos (lluvias, erupciones volcánicas, sismos, etc.); y
- procesos antrópicos (excavaciones, rellenos, cambio del uso del suelo, etc.).

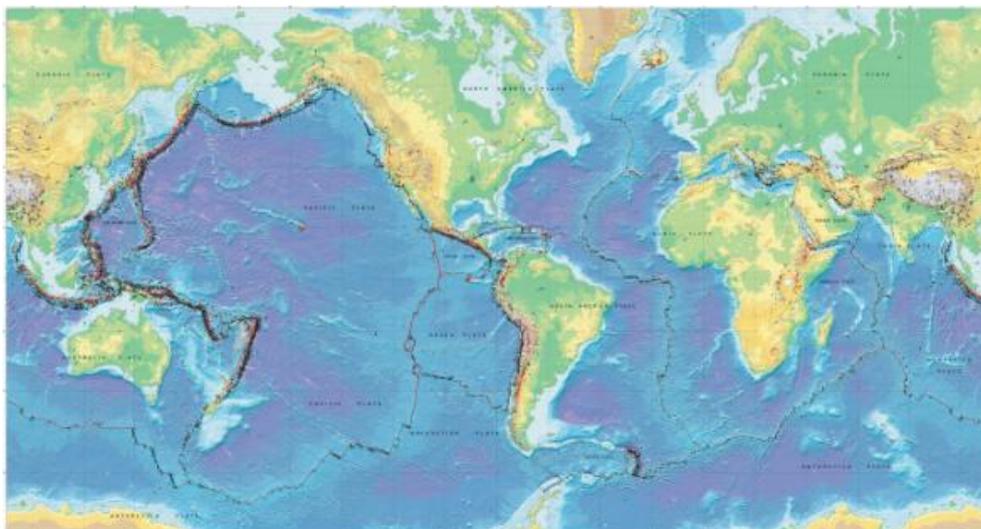
A continuación se presentan los escenarios, a nivel global y regional, de las variables antes mencionadas. En la Figura 3.2 se presenta el escenario de la tectónica global, que genera el mayor porcentaje de procesos de origen interno. En el estudio de los efectos de estos procesos es necesario considerar un enfoque neotectónico, dadas las posibles deformaciones acumuladas en el tiempo; esto tiene en cuenta la tasa de movimiento de la falla geológica vs. el tiempo de construido el ducto y en su tratamiento se deben incluir políticas de Estado en cuanto a la gestión de la amenaza sísmica.



Fuente: Fookes, et al. *Total geological history: a model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions* (2000, p.52).

Figura 3.2 Elementos tectónicos globales⁵

En la Figura 3.3 se presentan las zonas con mayor actividad volcánica (puntos de color rojo), asociada a los sistemas montañosos geológicamente más recientes y las zonas con mayor predisposición a ocurrencia de eventos sísmicos (puntos de color negro). Esta representación es de gran escala, útil para entender la dinámica de los procesos internos de La Tierra, pero se pueden consultar con mayor detalle en cada país con base en los estudios de amenaza sísmica o de microzonificación sísmica.



Fuente: USGS (2006). Mapa I-2800.

Figura 3.3 Zonas con mayor actividad sísmica y volcánica

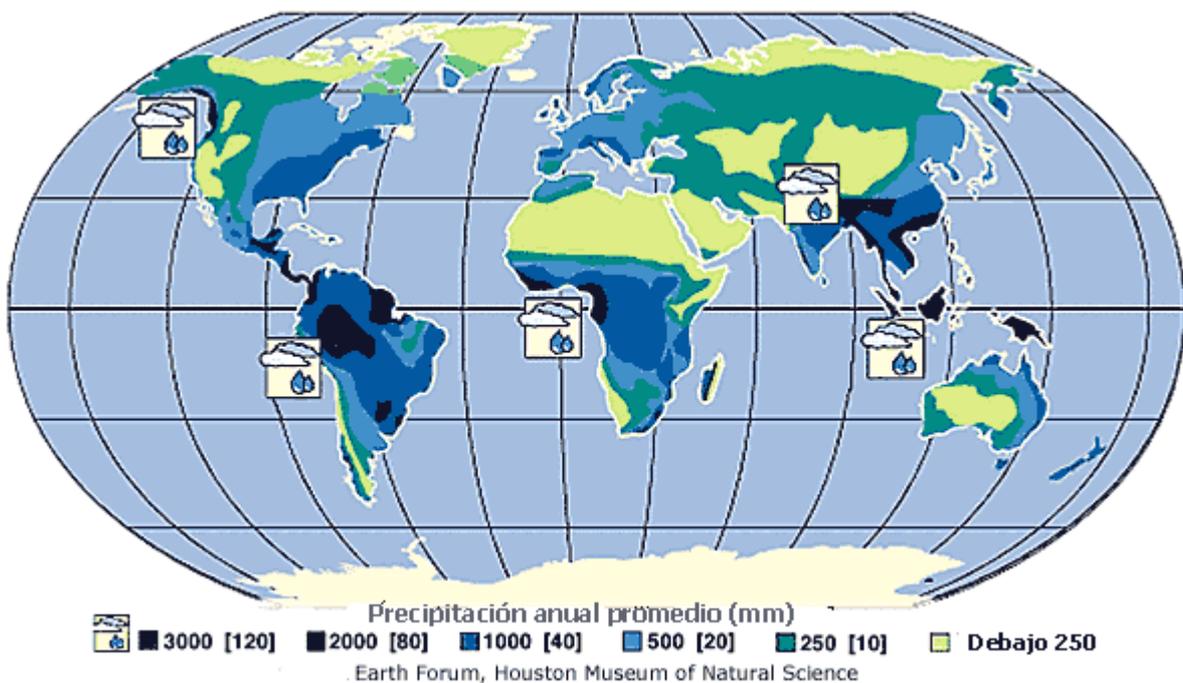
⁵ Basado en Moores y Twiss, 1995



Por otro lado, la precipitación es de gran interés debido a que es uno de los principales detonantes de los deslizamientos que afectan a los DDV. A este respecto, las principales variables que se tienen en cuenta son la duración, intensidad y acumulación. En las Figuras 3.4a y 3.4b se presenta la distribución global del promedio anual de dicho factor, en el primero de los casos discriminado por país.



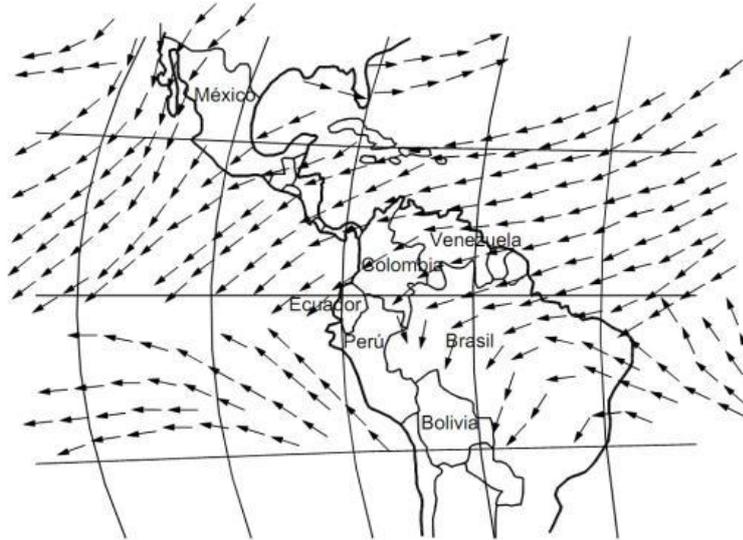
Fuente: Banco Mundial (2014).



Fuente USGS (2014).

Figuras 3.4a y 3.4b Precipitación anual promedio

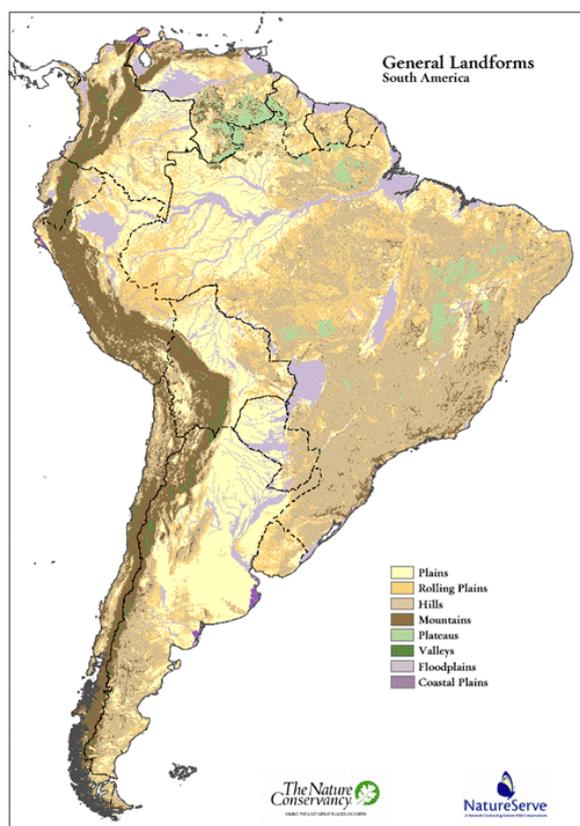
La acción del viento es otro agente con afectación potencial a los DDV que están localizados sobre zonas desérticas, en las cuales se genera el proceso de erosión eólica. En la Figura 3.5 se observa la distribución de dirección de principales corrientes de vientos, para el mes de enero, en la zona tropical de América Latina.



Fuente: Suárez. Control de erosión (2001, Cap. 1, p.5). Adaptado de Smith (1993).

Figura 3.5 Principales direcciones de vientos en América Latina en el mes de enero

Con respecto a la acción del hombre, se destaca la deforestación cuya dinámica se incrementó durante las últimas décadas en las zonas de selva tropical; así como en las cordilleras más representativas de los sistemas montañosos centrales, como es el caso de Los Andes en Sudamérica. Lo anterior está asociado al cambio de uso del suelo, que se genera por efecto del desarrollo de la actividad económica de las sociedades.



Fuente: USGS (2014).

Figura 3.6 Formas del relieve sudamericano

En la Figura 3.6 se observa la distribución de las formas del relieve sudamericano, que por sus características geológicas y parámetros mecánicos, asociados con su génesis y su interacción con el tectonismo y con eventos sísmicos y la pluviosidad, sufre una aceleración de los procesos de meteorización, cambios en la permeabilidad secundaria y alteración, con efecto desfavorable en la resistencia al corte de los materiales que lo conforman. Estas condiciones inducen varios tipos de geoamenaza en los STD definidos en dicha zona.

Considerando la interacción de los agentes anteriormente mencionados, se presenta en el Anexo 3.1 una tabla con las principales geoamenazas con afectación potencial a los STD asociadas con su origen, su expresión en el terreno y las alternativas de mitigación.

A continuación se presenta la descripción de las diferentes geoamenazas a los ductos, identificadas para Sudamérica y el Caribe.

3.1. Geotécnicas

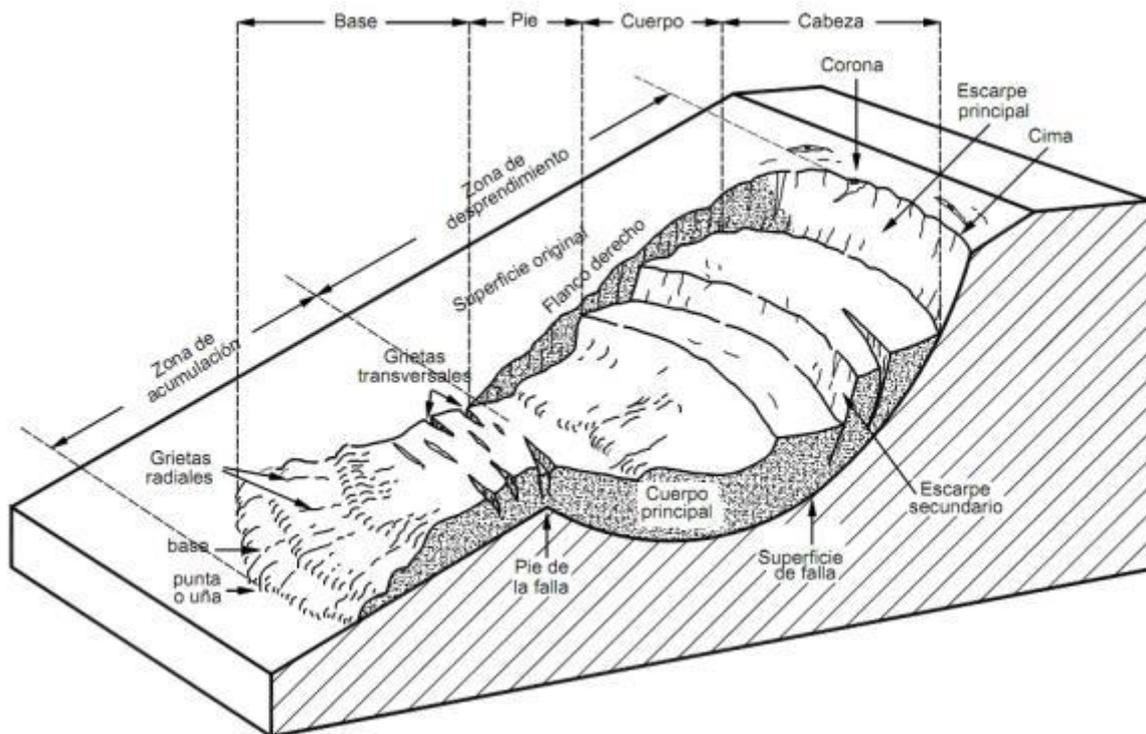
3.1.1. Deslizamientos

Los diferentes contextos geológicos, geomorfológicos e hidráulicos por donde se define un DDV, pueden ser afectados por los deslizamientos. "Los deslizamientos (*landslides*) consisten en

movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud⁶. La naturaleza precisa del proceso no está incluida en la definición e incluye otros procesos que son producto de la acción de las fuerzas gravitacionales, hidráulicas, etc.

Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de las superficies de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera, pueden moverse hacia abajo mientras otros se mueven hacia arriba. Los fenómenos de inestabilidad incluyen, generalmente, una combinación de procesos erosionales y denudacionales interrelacionados entre sí, y a menudo mezclados.⁷ En la definición de deslizamiento no se incluyen los procesos de erosión, los cuales se tratan en esta guía en una categoría aparte.

En la Figura 3.7 se pueden visualizar las partes que componen un deslizamiento.



Fuente: Suárez. Deslizamientos, V-I (2009, Cap. I, p.4). Bucaramanga: UIS.

Figura 3.7 Partes de un deslizamiento

A continuación se presenta uno de los sistemas de clasificación de mecanismos de falla del terreno más conocidos, aceptados y empleados en la literatura geotécnica a nivel mundial⁸. Este sistema tiene en cuenta la actividad del movimiento y su velocidad, el tipo de material involucrado y la

⁶ Cruden, 1991

⁷ Suárez (2009)

⁸ Publicado inicialmente por el Ingeniero Geólogo estadounidense J. Varnes (1978), en "Slope movement types and processes", Capítulo 2 del Special Report 176 "Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster and R.J. Krizek. Eds), TRB, National Research Council, Washington, D.C. pp. 12 – 33.1.



cinemática del movimiento, entre otros, y logra tener en cuenta los principales tipos de deslizamientos que normalmente afectan los DDV.

3.1.1.1. Rotacional

Un deslizamiento rotacional es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie curva y cóncava. Muestra una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. La deformación interna de la masa desplazada es usualmente muy poca. Debido a que el mecanismo rotacional es auto-estabilizante, la tasa de movimiento es con frecuencia baja, excepto en presencia de materiales altamente frágiles como las arcillas sensitivas. Los deslizamientos rotacionales pueden ocurrir lenta o rápidamente, con velocidades menores a 1 m/s.⁹

En la Figura 3.8 se presenta la expresión de ocurrencia de un deslizamiento rotacional.



Fuente: Programa ARPEL de Acreditación en Gestión de Integridad de Ductos, Módulo III, Bolivia (2014).

Figura 3.8 Deslizamiento rotacional

3.1.1.2. Traslacional

Se define como¹⁰ "Un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas geológicas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella¹¹.

En un macizo rocoso, este mecanismo de falla ocurre cuando una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la de la cara del talud y buza hacia ésta con un ángulo mayor

⁹ *Publicación Geológica Multinacional del Proyecto Multinacional Andino (PGM N°4), (2007)*

¹⁰ *PGM N°4 (2007)*

¹¹ *Cruden y Varnes, 1996*

que el ángulo de fricción¹². En los casos en que la traslación se realiza a lo largo de un sólo plano se denomina deslizamiento planar¹³. La velocidad de los movimientos traslacionales puede variar desde rápida a extremadamente rápida."

En la Figura 3.9 se presentan las formas de un deslizamiento traslacional.



Fuente: COGA (2014).

Figura 3.9 Deslizamiento traslacional en un DDV

A continuación se describen las principales características relacionadas con la ocurrencia de deslizamientos rotacionales o traslacionales en un DDV.

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta días.

Causas: largos periodos de lluvia, eventos sísmicos, lluvias extraordinarias, deforestación, cambio de uso de suelo, meteorización, pendientes pronunciadas del terreno adyacente, entre otros.

Efecto en ductos: exposición, levantamiento, deformaciones permanentes, torsiones y cortantes en límites con los flancos del deslizamiento, roturas, condición de ducto suspendido entre 2 puntos fijos, incremento de carga, entre otros. En el caso en que el vector principal del movimiento es paralelo al alineamiento del ducto, se producirán en los extremos tensión y compresión (con arrugas). Ver la Tabla 3.9.

Acciones de mitigación: en función de la magnitud del evento y de la causa raíz del evento, pueden requerirse combinaciones de las siguientes acciones:

- a) Descarga, cambio en la geometría (terraceo) y redistribución de masas de suelo o roca.

¹² Hoek y Bray, 1981

¹³ Idem ¹²

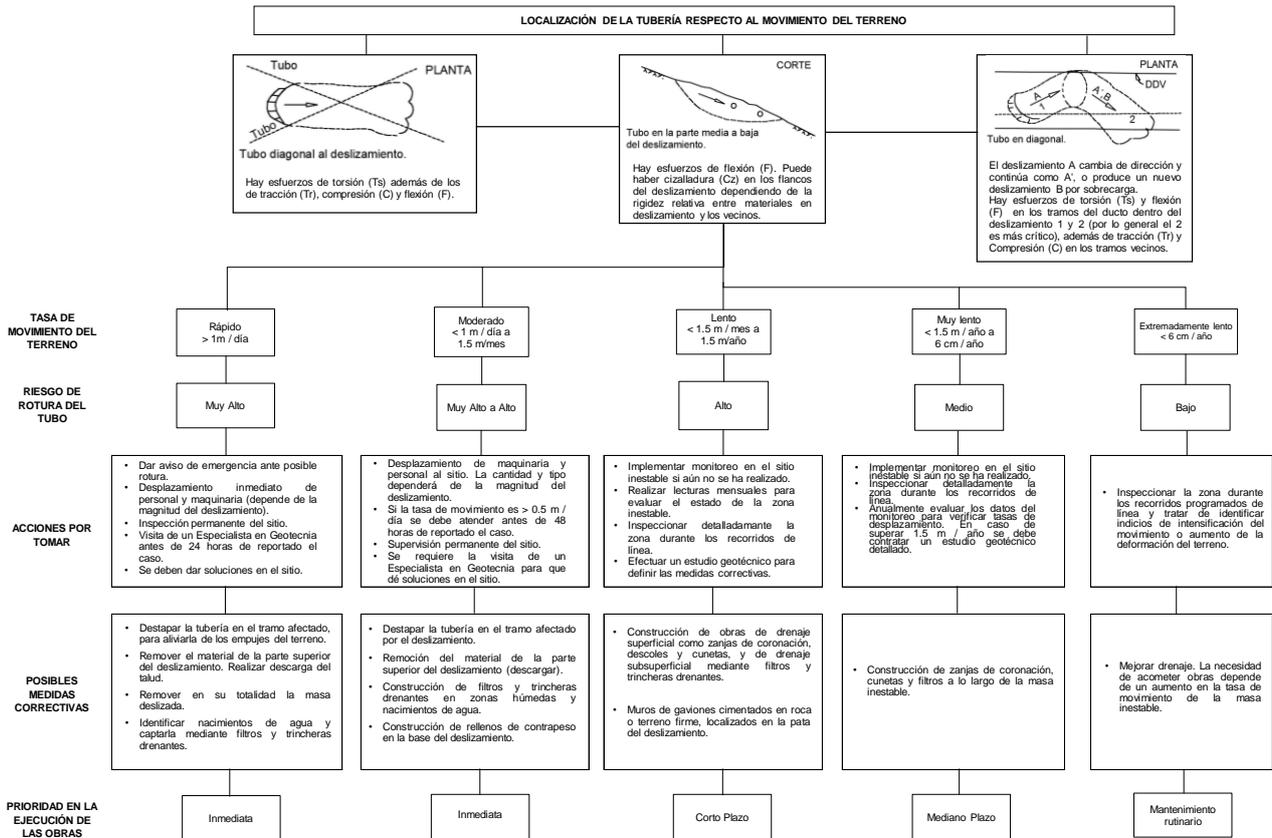


- b) Estructuras de contención: muros de gaviones o de concreto, muros de tierra reforzada, pantallas de concreto ancladas, filas de pilotes, solas o combinadas con anclajes.
- c) Obras de sub-drenaje: filtros franceses, drenes horizontales, galerías de drenaje, trincheras drenantes.
- d) Obras de drenaje superficial: canales, cortacorrientes, descoles, cunetas, trincheras terrazas estabilizadoras, revegetación, reforestación.
- e) Obras en márgenes de cruces subfluviales o aéreos: cruces dirigidos, diques, muros marginales de gaviones o de bolsacretos, acorazamiento de fondo del lecho, *check dams*, entre otros. Se destaca que pueden desarrollarse estudios específicos de casos de hidrotecnia, que pueden hacer parte de enfoques preventivos dentro de la operación de un STD.

Monitoreo: instalación de instrumentación geotécnica como inclinómetros y piezómetros, monitoreo topográfico, fibra óptica geotécnica, chimeneas fijas al ducto, inspecciones geotécnicas rutinarias, recorridos aéreos, entre otros, los cuales se pueden observar en detalle en el Capítulo 6 de esta Guía.

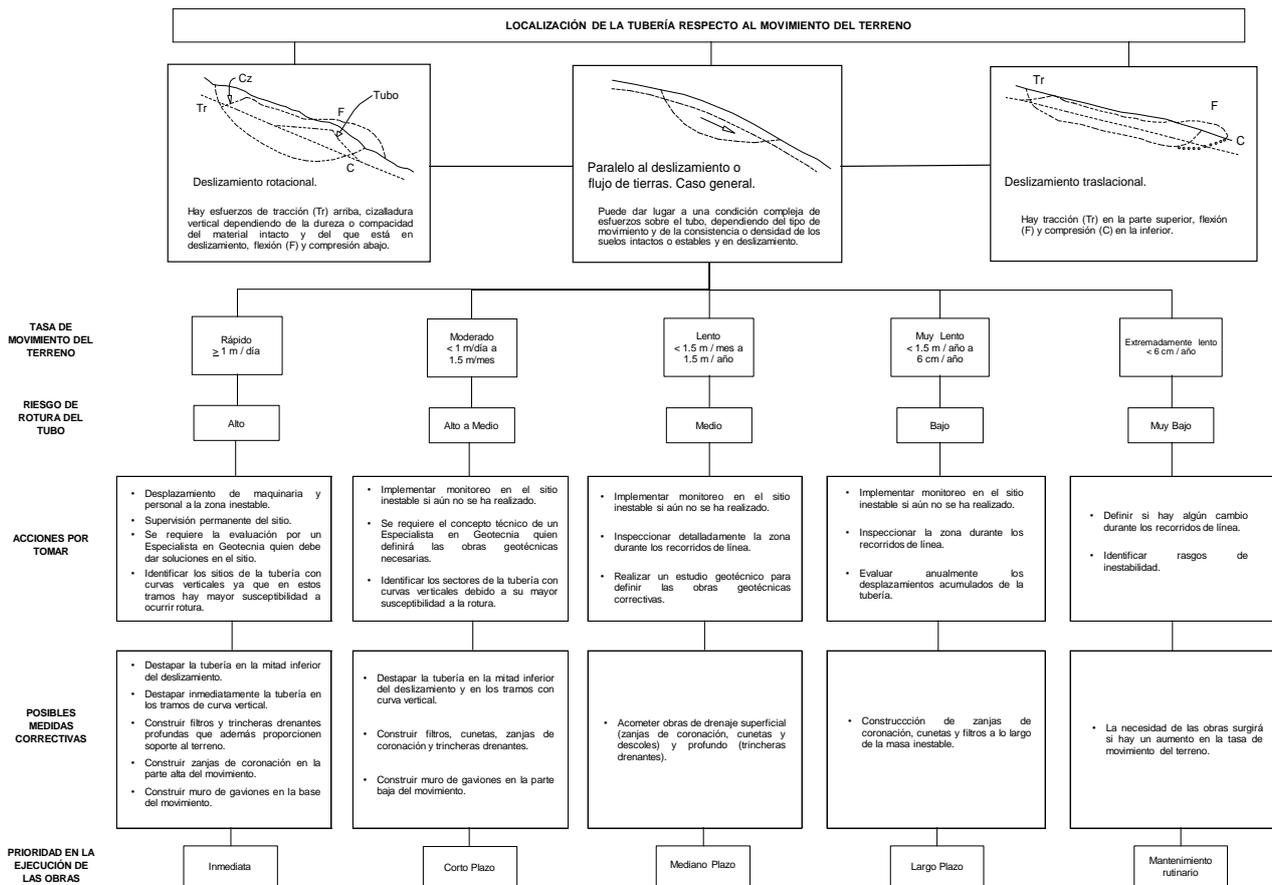
A partir del estudio de numerosos casos de rotura de oleoductos y gasoductos, o de operación defectuosa de éstos por acción de empujes y deformaciones inducidos por masas de suelo y roca en estado de falla, así como la posición y dirección de los ductos respecto del cuerpo y tipo de deslizamiento y la dirección predominante del movimiento del talud, se han establecido modelos de comportamiento y procedimientos de reparación de los ductos y restauración del bombeo, como los que se condensan en las Figuras 3.10 a 3.13¹⁴.

¹⁴ García 2011, adaptado de Díaz, 2007



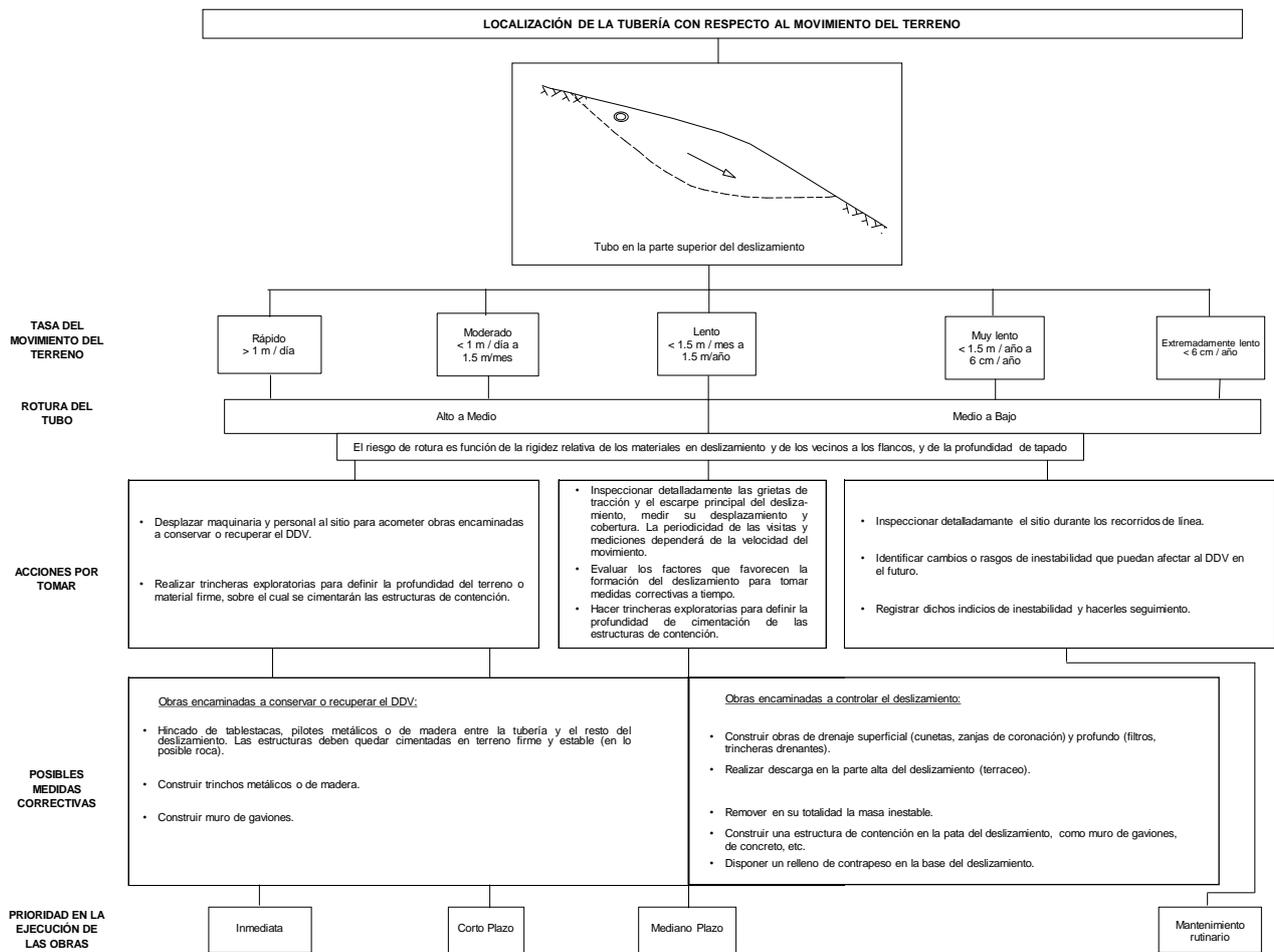
Fuente: García López, Manuel (2011), "Evaluación del riesgo geológico-geotécnico del trazado del Loop Sur". Trabajo N° 2323 de Ingeniería y Geotecnia Ltda., realizado para TECHINT – Compañía Técnica Internacional. Bogotá, Colombia.

Figura 3.10 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos



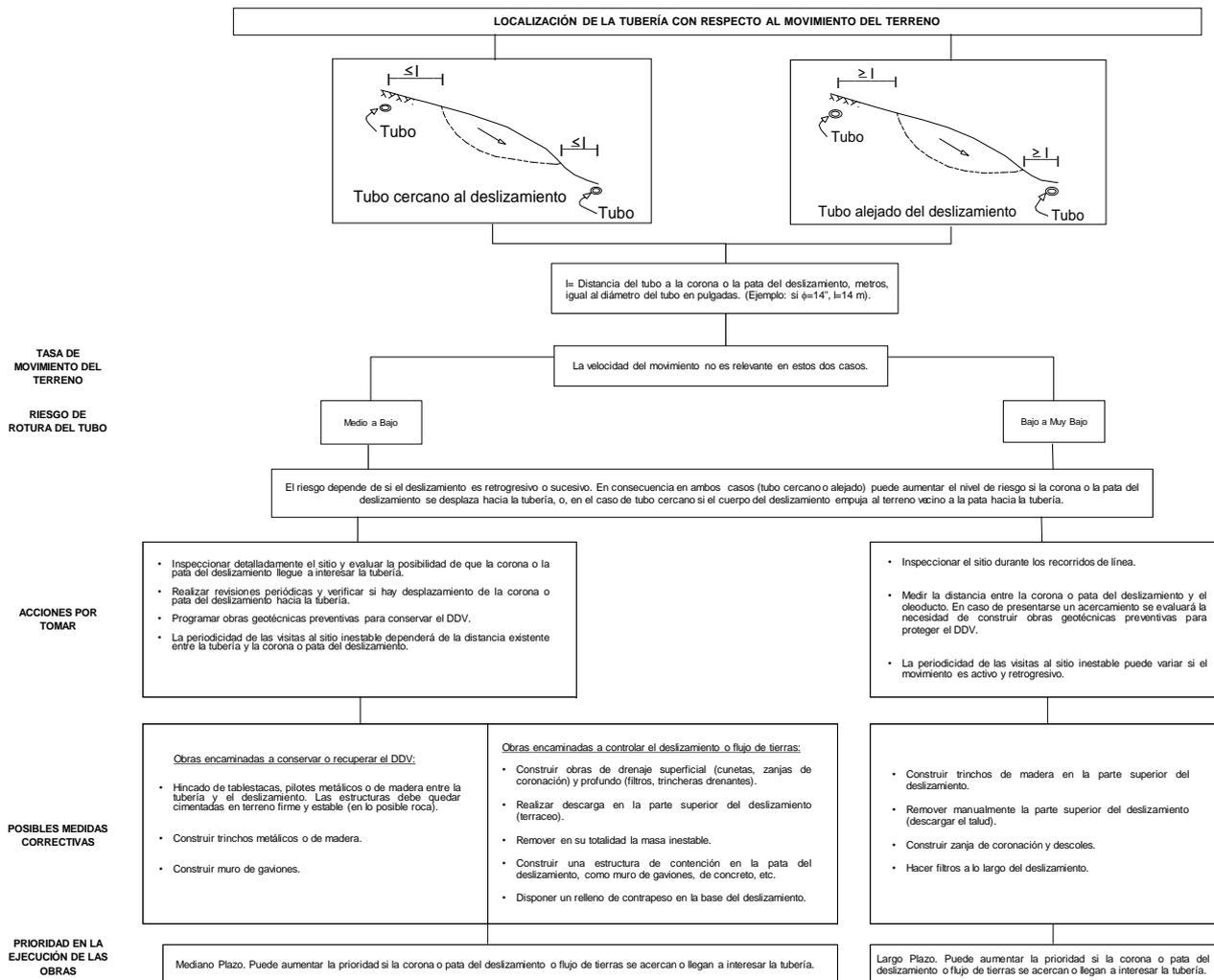
Fuente: García López, Manuel (2011), "Evaluación del riesgo geológico-geotécnico del trazado del Loop Sur". Trabajo N° 2323 de Ingeniería y Geotecnia Ltda., realizado para TECHINT – Compañía Técnica Internacional. Bogotá, Colombia.

Figura 3.11 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos



Fuente: García López, Manuel (2011), "Evaluación del riesgo geológico-geotécnico del trazado del Loop Sur". Trabajo N° 2323 de Ingeniería y Geotecnia Ltda., realizado para TECHINT – Compañía Técnica Internacional. Bogotá, Colombia.

Figura 3.12 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos



Fuente: García López, Manuel (2011), "Evaluación del riesgo geológico-geotécnico del trazado del Loop Sur". Trabajo N° 2323 de Ingeniería y Geotecnia Ltda., realizado para TECHINT – Compañía Técnica Internacional. Bogotá, Colombia.

Figura 3.13 Procedimientos para mitigación de los riesgos por remoción en masa de líneas de flujo y ductos

3.1.2.Reptación

Concepto: la reptación (o *creep*) es uno de los procesos más complejos, tanto para su identificación como para definir el tratamiento remedial en un DDV. Consiste en movimientos del suelo sub-superficial con velocidades desde muy bajas a extremadamente bajas, sin una superficie de falla definida. La profundidad del movimiento puede variar desde pocos centímetros hasta varios metros y ocurre en terrenos en ladera. Por lo general, el desplazamiento horizontal es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. Varnes (1978) incluye la reptación dentro de la categoría de los flujos y le asigna "movimiento extremadamente lento" a una tasa menor o igual a 6 cm/año.

La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos de tierra, de detritos o de lodos, y los deslizamientos traslacionales; igualmente, es posible que un desplazamiento entre en relativo reposo tiempo después de su ocurrencia y pase a la condición de reptación. Se le atribuye a



las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en los suelos, usualmente arcillosos, muy blandos o alterados, con características expansivas. Las evidencias de reptación consisten en la inclinación de postes y cercas y la inclinación o curvatura de los troncos de los árboles y arbustos, así como en la formación de ondulaciones o arrugas del terreno transversales a la dirección general del movimiento.¹⁵

Es común que se presente en suelos coluviales o entre horizontes o mantos de suelos residuales.

Tiempo de ocurrencia: desde meses hasta años.

| Clases de velocidad | Descripción | Velocidad (mm/s) | Velocidad típica |
|---------------------|-----------------------|--------------------|------------------|
| 7 | Extremadamente rápido | 5×10^3 | 5 m/s |
| 6 | Muy rápido | 5×10^1 | 3 m/min |
| 5 | Rápido | 5×10^{-1} | 1,8 m/h |
| 4 | Moderada | 5×10^{-3} | 1,3 m/mes |
| 3 | Lenta | 5×10^{-5} | 1,6 m/año |
| 2 | Muy lenta | 5×10^{-7} | 16 mm/año |
| 1 | Extremadamente lenta | | |

Fuente: *Publicación geológica multinacional N°4 (2007). (p.32).*

Tabla 3.2 Escalas de velocidades de movimientos de masas¹⁶

Causas: deforestación, intercalaciones de materiales en forma paralela y en el mismo sentido de la pendiente del terreno, presencia de paleo cauces, entre otros, que en general producen cambios en el volumen de la masa de suelo (expansión o contracción) asociados a las variaciones de humedad y saturación (dependiendo del tipo de suelo y de la ocurrencia de los diferentes modos estacionales de humedecimiento y secado, o de congelación y deshielo en las zonas periglaciales).

Efecto en ductos: concentración de esfuerzos y deformaciones axiales o transversales (inclusive en tramos fuera del área con evidencia de reptación), rotura, deformaciones permanentes, cambios en el alineamiento del ducto, entre otros.

Acciones de mitigación: disminución de tapada, cruce dirigido por el estrato competente, liberación de tensiones, cambio de ruta, instalación de obras de drenaje o manejo de agua superficial y sub-superficial, instalación de marcos H, eliminación de la interacción suelo-ducto mediante alcantarillas, poliestireno expandido u otro tipo de obras civiles que permiten aislar el ducto del suelo, entre otras.

Monitoreo: patrullaje y sobrevuelos del DDV, monitoreo meteorológico, monitoreo topográfico (del terreno y del ducto), correlación con registro de pasaje de herramienta inercial, entre otros.

Ejemplos:

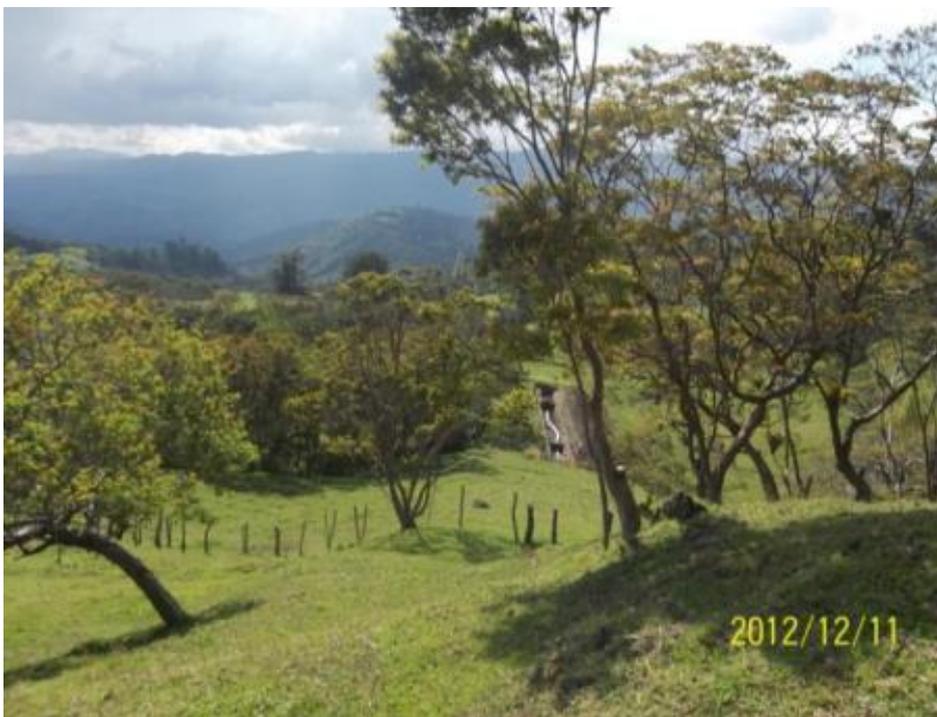
¹⁵ Suárez (2009), con ligeras modificaciones.

¹⁶ Según Cruden y Varnes (1996).



Fuente: García López, M. (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.14 Ejemplo de reptación de suelos



Fuente: ECOPETROL (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.15 Ejemplo de reptación de suelos¹⁷

¹⁷ Notar el ducto al fondo en el centro de la fotografía.



Fuente: OCENSA (2015). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.16 Ejemplo de reptación¹⁸

3.1.3. Ampliación o propagación lateral

Concepto: "es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna y rotura creciente hacia los lados o flancos del movimiento de falla inicial del terreno. Se distinguen dos tipos de propagación, una en que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típica de masas rocosas, y otra que ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en estado de falla¹⁹."

Debe hacerse la siguiente distinción importante según la velocidad del proceso de propagación lateral (ver las Figuras 3.17 a 3.19):

- Propagación lateral lenta: como la que ocurre en estratos rocosos gruesos que sobreyacen a materiales blandos. En este caso el estrato competente superior puede fracturarse y separarse en bloques o losas; el material blando inferior fluye hacia las grietas entre los bloques y así el movimiento de éstos es extremadamente lento.
- Propagación lateral rápida: involucra la licuación de materiales tales como arenas saturadas de densidad relativa baja a media sometidas a cargas vibratorias o a sismos, o la fluidificación de

¹⁸ Observar el desplazamiento de canales de drenaje del DDV.

¹⁹ Varnes (1978).



suelos arcillosos o arcillo-limosos de muy alta sensibilidad al remoldeo. Estas son usualmente inducidas por terremotos, vibraciones de maquinaria o instalación de pilotes en arenas saturadas de baja densidad o por alteración causada por excavaciones de ingeniería en suelos arcillosos de sensibilidad muy alta; son extremadamente rápidas y peligrosas.²⁰

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta meses.

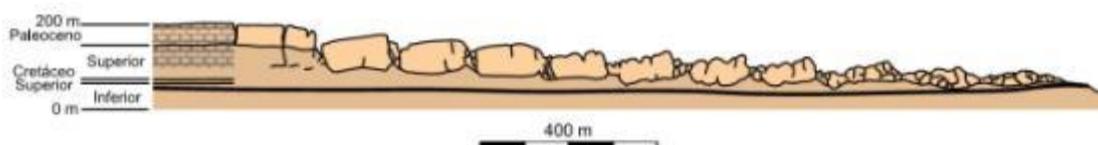
Causas: esfuerzos cíclicos asociados a sismos, en los que contribuyen la fragilidad de los materiales (relación entre la resistencia al corte pico y la resistencia al corte en estado de falla), como es el caso de suelos provenientes de cenizas volcánicas o las mismas cenizas, o algunos suelos residuales derivados de rocas ígneas y metamórficas o el tipo de materiales (arenas o arcillas sensitivas). Asimismo, la disposición de estratos rocosos con geometría definida y en el mismo sentido de la pendiente longitudinal del área afectada. Los bloques se desplazan lateral y lentamente a favor de pendientes muy bajas. No son movimientos frecuentes y suelen ser bastante extensos y complejo de identificar.

Efecto en ductos: concentración de esfuerzos y deformaciones axiales o transversales (inclusive en tramos fuera del área con evidencia de ampliación lateral), rotura, deformaciones permanentes, cambios en el eje del ducto, flotación, entre otros.

Acciones de mitigación: disminución de tapada, liberación de tensiones, cambio de ruta, instalación de manejo de sub-drenaje, entre otros.

Monitoreo: patrullaje y sobrevuelos del DDV, monitoreo meteorológico, monitoreo topográfico, correlación con registro de pasaje de herramienta inercial, monitoreo por efecto co-sísmico, entre otros.

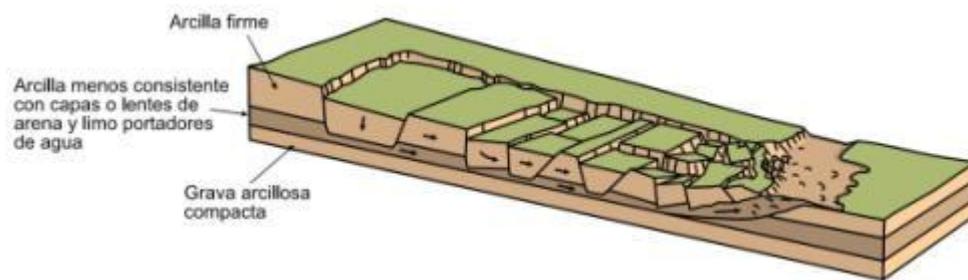
Ejemplos:



Fuente: Publicación geológica multinacional N°4 (2007, p.17).

Figura 3.17 Propagación lateral lenta

²⁰ PGM N°4 (2007), con modificaciones.



Fuente: Publicación geológica multinacional N°4 (2007, p.17).

Figura 3.18 Propagación lateral rápida



Fuente: USGS (2008). The landslide handbook, C1325 (p.15).

Figura 3.19 Efecto de la propagación lateral rápida

3.1.4. Flujos

Los flujos son un tipo de movimiento en masa en los que el material transportado se comporta como un fluido debido a la deformación interna y continua del material con ausencia de una superficie clara de desplazamiento. Se plantean diferentes tipos de flujos principalmente en función del tamaño de partículas del material transportado (tierras, detritos o rocas), aunque también se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Velocidad de desplazamiento (lento o rápido a muy rápido).
- Grado de viscosidad.
- Grado de saturación.
- Porcentaje de humedad.
- Volumen de material transportado.

De acuerdo con Varnes (op.cit.) se distinguen 4 tipos de flujos:



- Flujos de tierra.
- Flujos de detritos.
- Flujos de lodo.
- Avalanchas.

A los anteriores se puede agregar un quinto tipo (García-López, 2000):

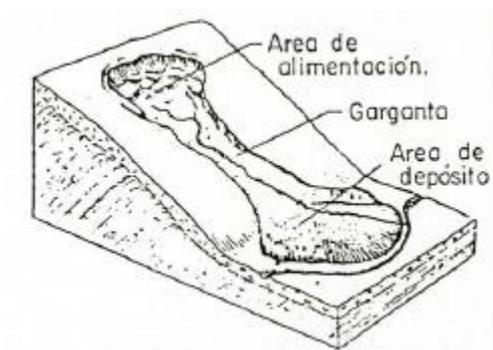
- Lahares.

A continuación se presenta una descripción de los principales tipos de flujos:

3.1.4.1. Flujo de suelo o tierra

Son movimientos de materiales con más del 50% de finos, de carácter viscoso y de consistencia blanda. Se forman en materiales provenientes de la meteorización de las rocas que pierden su estabilidad estructural por efecto del agua, originando desplazamientos con formas alargadas, lobuladas en su extremo inferior. También se pueden desarrollar a partir del cuerpo de desplazamientos de rotación o traslación en los cuales se ha producido bastante alteración de los materiales y un fuerte aumento de la humedad; al acumularse los suelos sueltos abajo del pie del deslizamiento, éstos fluyen sobre la ladera, por lo general encauzados por depresiones, cañadas o quebradas. Los flujos de tierra pueden ser lentos a rápidos, de acuerdo con la humedad y la pendiente de la zona de ocurrencia. En las zonas de alta montaña y en las desérticas pueden ocurrir flujos muy secos, por lo general pequeños pero de velocidades altas.²¹

Como se muestra en la Figura 3.20, con gran frecuencia los flujos de tierra se componen de tres partes: La superior o "área de alimentación", en la cual ocurren otros procesos de inestabilidad que contribuyen con los materiales que van a fluir; sigue la zona intermedia de "garganta" o "flujo canalizado" (zona de transporte) y finalmente la "zona de deposición" o "área de depósito" en la parte baja o inferior, en la cual se acumulan los materiales. La activación de los flujos de tierra está asociada a lluvias, sismos, deshielos, cambios en el grado de saturación, entre otros factores.



Fuente: Varnes-D.J., 1978.

Figura 3.20 Esquema de un flujo de tierra

Para el caso de los DDV, se destaca la importancia de realizar una adecuada definición del trazado del mismo, con la finalidad de evitar cruzar por la trayectoria de este tipo de movimientos, o si se da el

²¹ Tomado parcialmente de Suárez (2009) y García-López (1998).

caso, cruzarlos previendo las obras de control necesarias. Se comenta que en varios casos de ductos colombianos se han realizado cruces aéreos y cruces subterráneos (por debajo de la superficie de falla determinada previamente mediante exploración del subsuelo).

En la Figura 3.21 se presenta un ejemplo de flujo de tierras sobre un DDV.



Fuente: COGA (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.21 Flujo de tierras

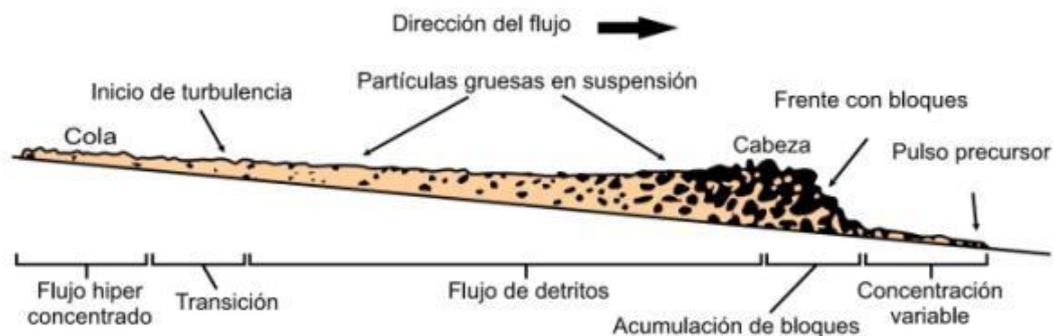
3.1.4.2. Flujos de detritos

"Son movimientos relativamente rápidos que llegan a ser extremadamente rápidos y están compuestos de materiales gruesos con menos del 50% de finos. Se activan con las lluvias, debido a la pérdida de resistencia al corte por la disminución de la succión al saturarse los materiales o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea²². Los daños causados por los flujos de detritos abarcan áreas relativamente grandes.

El flujo de detritos típico es una onda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que corre a lo largo de un cauce, quebrada o canal natural preexistente con algunas ondas menores superpuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo."²³. En la Figura 3.22 se presenta la sección típica del comportamiento de un flujo de detritos, y en la Figura 3.23 un ejemplo del efecto sobre un DDV.

²² Collins y Znidarcic, 1997

²³ Con ligeras modificaciones, de Suárez (2009)



Fuente: Publicación geológica multinacional N°4 (2007, p.21).



Figura 3.22 Sección típica de flujo de detritos Figura 3.

Fuente: COGA (2014). Taller ARPEL "Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas", 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.23 Flujo de detritos sobre un DDV

3.1.4.3. Flujos de lodo

"En los flujos de lodo se habla de viscosidad propiamente dicha, llegando al punto de hablar de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo alcanzan velocidades muy altas y poseen grandes fuerzas destructoras, las cuales dependen de su caudal, velocidad y longitud del recorrido.

Como se expresó en los flujos de tierras, un flujo de lodos se compone de tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente, una zona de acumulación."²⁴

²⁴ Modificado ligeramente de Suárez (2009)



Por lo general el detonante de los flujos de lodo son las lluvias, intensas o acumuladas, que propician las condiciones para que una masa susceptible entre en condición de flujo. Cuando las lluvias alcanzan intensidades y volúmenes extraordinarios de alta frecuencia, se pueden registrar flujos de lodo o avalanchas de mayor magnitud y fuerza destructiva.

En la Figura 3.24 se presenta un ejemplo de flujo de lodos a un lado de un DDV.



Fuente: COGA (2008). Oficina Técnica Geotecnia.

Figura 3.24 Flujo de lodos a un lado de un DDV.

3.1.4.4. Avalanchas

Con gran frecuencia, el efecto de las avalanchas sobre las líneas de conducción es catastrófico, lo cual se debe a la magnitud, comportamiento y velocidad que presenta dicho movimiento.

"Cuando los flujos alcanzan grandes velocidades se clasifican como avalanchas. En las avalanchas el flujo desciende formando una especie de *ríos de roca, suelo y residuos diversos*. Estos flujos comúnmente se relacionan con las lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionalmente altos, el deshielo de los nevados o los movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación. Esto último, aunque es un factor influyente, no es un pre-requisito para que ocurran.

Las avalanchas son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos, combinados con un volumen importante de agua. Estas forman una masa de comportamiento líquido viscoso que logra velocidades muy altas, de hasta más de 50 m/s (con gran poder destructivo) y que corresponden generalmente, a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje.

El movimiento de las avalanchas se define como un flujo turbulento de granos. Este mecanismo no requiere la presencia de una fase líquida o gaseosa y el movimiento se produce por transferencia de



momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven. Los conos volcánicos son muy susceptibles a las avalanchas."²⁵

En la Figura 3.25 se presenta la magnitud de los efectos de una avalancha sobre un DDV.



Fuente: EP PETROECUADOR (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 - Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.25 Avalancha

3.1.4.5. Lahares

Los lahares son un tipo de flujo con características especiales de formación, transporte y depositación. Se define como “Flujo de lodo de material piroclástico que se genera en las laderas de un volcán, así como el depósito producido. Se denominan *húmedos* si están mezclados con agua proveniente de fuertes lluvias, o de lagos en los cráteres, o producido por la fusión del casquete de hielo y nieve que cubre el edificio volcánico (como fue el caso del volcán Nevado del Ruíz, en Armero, Colombia, en 1985).

Los lahares *secos* pueden resultar de la falla de conos o materiales acumulados sobre pendientes empinadas, que se inestabilizan, por ejemplo debido a tremores. Si la mezcla en movimiento retiene mucho calor, pueden llamarse *lahares calientes*²⁶. Asimismo, el tremor es un temblor de pequeña intensidad, como un movimiento vibratorio rápido²⁷.

En las líneas de conducción de hidrocarburos, además de alterar la condición de estabilidad del DDV, producen normalmente rotura y manifestaciones de oxidación directa sobre los ductos.

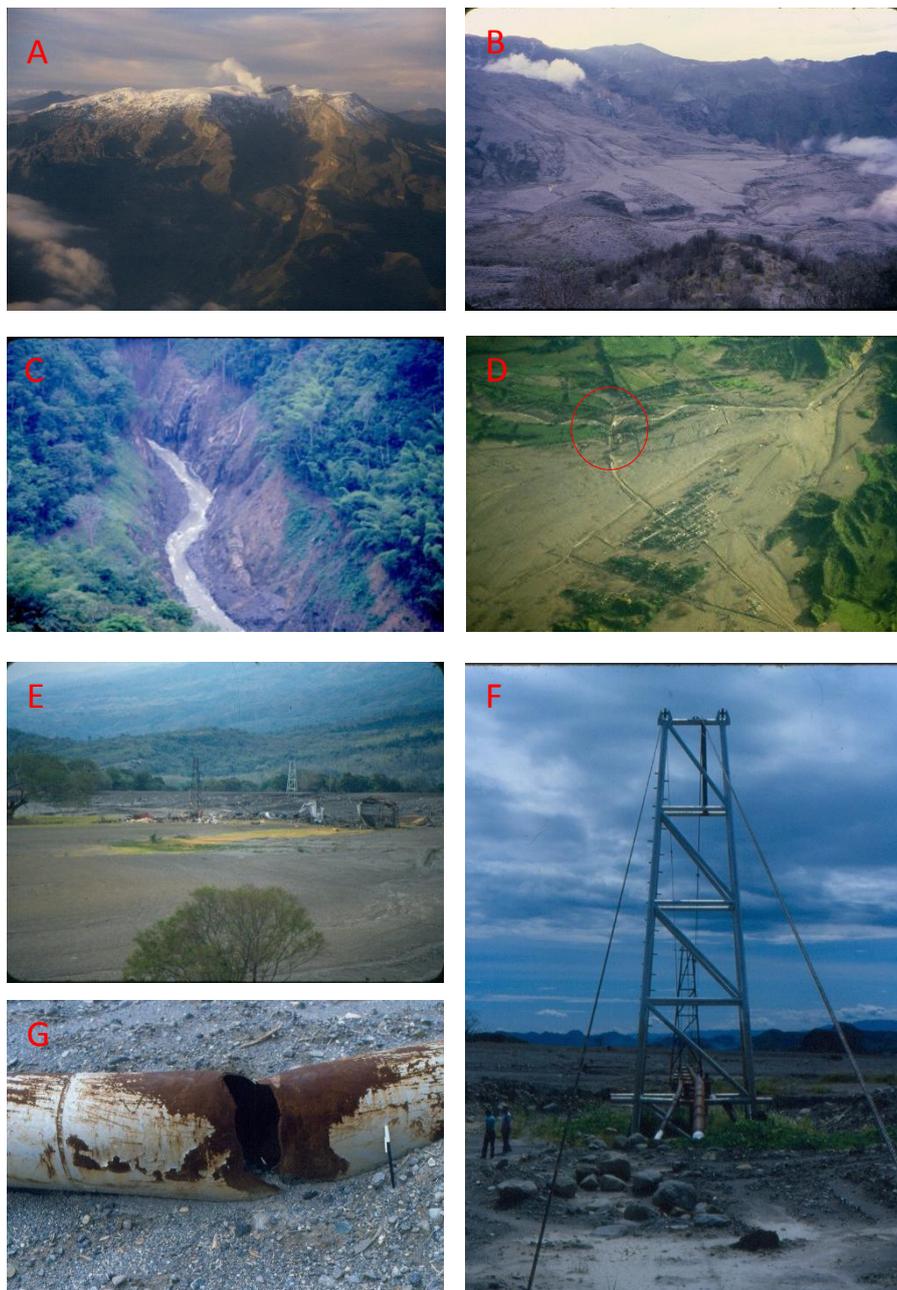
²⁵ Suárez (2009)

²⁶ Dictionary of Geological Terms, Geological Society of America, 1962 y D. Herd, 1979, citados por García-López (2014)

²⁷ García-López (2014)

Es común que las erupciones piroclásticas en estratovolcanes estén acompañadas de flujos de lodo destructivos²⁸. Debido a que los depósitos volcánico-clásticos típicos, de sorteo pobre y sin estratificación contienen fragmentos gruesos en abundancia se aplica el término *lahar* al amplio intervalo textural de flujos de lodo y flujos de detritos volcánicos.

En la Figura 3.26 se presentan varios ejemplos del efecto ocasionado por lahares.



Fuente: García-López, M. (2016).

Figura 3.26 Efectos de lahares

²⁸ Lipman y Mullineaux, Eds. (1981).



Referencias: A: Aspecto de la erupción del Volcán Nevado del Ruíz (Colombia) ocurrida el 13 de noviembre de 1985. Se fundió una parte del casquete glacial en cercanías del cráter activo. B: Cobertura de residuos del lahar, mezcla de agua proveniente del deshielo, piroclastos recientes y antiguos y bloques de coladas de lavas también antiguas. C: Profundización del cauce del río Lagunilla al paso de la avalancha (de 8,0 a 40,0 m). D: Destrucción de la ciudad de Armero por el lahar conducido por el río Lagunilla. En el círculo rojo se localizaba el cruce aéreo de un oleoducto y un gasoducto. E: Vista del sitio de cruce de los ductos. F: Reconstrucción de las estructuras metálicas del cruce. G: Rotura, desgaste y oxidación intensa casi inmediata de uno de los ductos a causa de los compuestos sulfurosos que portaba el lahar.

Con base en la descripción de los diferentes tipos de flujos, antes mencionados, y para efectos prácticos de la presente guía de monitoreo geotécnico para ductos, se presenta a continuación la clasificación de flujos de acuerdo con su magnitud.

| M | Rango de V (m ³) | Rango de Q _b (m ³ /s) | Rango de Q _v (m ³ /s) | B _b (m ²) | B _v (m ²) | Consecuencias |
|----|-----------------------------------|---|---|---------------------------------------|--|--|
| 1 | <10 ² | <5 | <1 | <4x10 ² | <4x10 ³ | Daño muy localizado. Puede generar muertes y dañar edificios pequeños. |
| 2 | 10 ² a 10 ³ | 5 a 30 | 1 a 3 | 4x10 ² a 2x10 ³ | 4x10 ³ a 2x10 ⁴ | Puede enterrar carros, romper árboles, bloquear vías y alcantarillas. Destruye edificaciones pequeñas de madera. |
| 3 | 10 ³ a 10 ⁴ | 30 a 200 | 3 a 30 | 2x10 ³ a 9x10 ³ | 2x10 ⁴ a 9x10 ⁴ | Puede destruir edificios grandes, dañar pilas de puentes, vías y oleoductos. |
| 4 | 10 ⁴ a 10 ⁵ | 200 a 1500 | 30 a 300 | 9x10 ³ a 4x10 ⁴ | 9x10 ⁴ a 4x10 ⁵ | Puede destruir parcialmente pueblos, destruir puentes y ductos, y bloquear cañadas. |
| 5 | 10 ⁵ a 10 ⁶ | 1500 a 12000 | 300 a 3x10 ⁴ | 4x10 ⁴ a 2x10 ⁵ | 4x10 ⁵ a 2x10 ⁶ | Puede destruir partes importantes de pueblos, destruir bosques de 2 km ² de área y bloquear pequeños ríos. |
| 6 | 10 ⁶ a 10 ⁶ | N/A | 3x10 ³ a 3x10 ⁴ | >2x10 ⁶ | 2x10 ⁶ a 3x10 ⁷ | Puede destruir pueblos enteros y cubrir valles de varias decenas de km ² . Puede embalsar ríos. |
| 7 | 10 ⁶ a 10 ⁷ | N/A | 3x10 ⁴ a 3x10 ⁵ | N/A | 3x10 ⁷ a 3x10 ⁸ | Puede destruir partes de ciudades y cubrir valles de muchas decenas de km ² y embalsar ríos de gran tamaño. |
| 8 | 10 ⁷ a 10 ⁸ | N/A | 3x10 ⁵ a 3x10 ⁶ | N/A | 3x10 ⁸ a 3x10 ⁹ | Puede destruir ciudades enteras, inundar valles hasta de 100 km ² y embalsar grandes ríos. |
| 9 | 10 ⁸ a 10 ⁹ | N/A | 3x10 ⁶ a 3x10 ⁷ | N/A | 3x10 ⁹ a 3x10 ¹⁰ | Destrucción completa de cientos de km ² . |
| 10 | >10 ⁹ | N/A | 3x10 ⁷ a 3x10 ⁸ | N/A | >3x10 ¹⁰ | Destrucción completa de cientos de km ² . |

Fuente: modificado de Suárez. Deslizamientos, Vol. I (2009, Cap. I, p.35). Bucaramanga: UIS.

Convenciones: M=Magnitud. V=Volumen. Q_b y Q_v=Descargas pico para flujos de bloques y para flujos de lodos. B_b y B_v=Área inundada para flujos de bloques y para flujos de lodos. Para flujos gruesos es 10 veces más pequeña que para flujos de lodos.

Tabla 3.3 Clasificación de los flujos según su magnitud²⁹.

3.1.4.6. Características generales de los flujos

A continuación se describen las principales características de flujos ocurridos sobre un DDV.

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta días.

²⁹ Adaptado de Jacob, 2005



Causas: eventos sísmicos, tremores, lluvias extraordinarias, deshielo, deforestación, cambio de uso de suelo, meteorización, fuertes pendientes de terreno adyacente o longitudinal al DDV, falla de masas acumuladas en áreas de volcanes, represamiento de afluentes y quebradas, entre otros.

Efectos en ductos: exposición, levantamiento, deformaciones permanentes, torsiones en límites con los flancos del canal de transporte del cuerpo del flujo, roturas, suspensión y flotación del ducto, incremento de carga, oxidación y afectación por presencia de azufre (en el caso de lahares), entre otros.

Acciones de mitigación:

- a) En la parte alta del flujo: distribución de cargas en zona de deslizamiento potencial; incremento de obras de drenaje y sub-drenaje; y construcción de obras para el confinamiento del DDV, tales como: muros de gaviones; pilotajes; pantallas ancladas; evaluación de alternativas de nuevo alineamiento del DDV; etc.
- b) En la parte media del flujo: paso del ducto en cruce aéreo o profundización del ducto mediante cruce dirigido; y evaluación de alternativas de nuevo alineamiento del DDV.
- c) en la parte baja del flujo: descarga del DDV; redistribución de cargas; obras de drenaje y subdrenaje; y evaluación de alternativas de nuevo eje del DDV.

Monitoreo: instalación de instrumentación geotécnica como inclinómetros y piezómetros; monitoreo topográfico; fibra óptica geotécnica; chimeneas fijas al ducto; inspecciones geotécnicas rutinarias; recorridos aéreos; registro de actividad sísmica y volcánica; verificación de revestimiento de los ductos; entre otros.

3.1.5. Caídas

Concepto: normalmente, la caída de rocas puede afectar los DDV en dos formas: como pérdida del terreno de soporte cuando está localizado en la parte alta del talud; o como concentración de material desprendido (*talus*), y afectación a ductos por el impacto de los bloques al caer, incluso en ductos enterrados, si el DDV está en la parte baja del talud.

"La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento³⁰. Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido³¹, es decir con velocidades mayores a 5×10^1 mm/s. El estudio de casos históricos ha mostrado que las velocidades alcanzadas por las caídas de rocas pueden exceder los 100 m/s."³²

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta meses.

Causas: geomorfología, pendiente del talud, tipo de roca y rugosidad de la superficie, agrietamientos, fallas o discontinuidades, ocurrencia de lluvias y sismos, cambios bruscos de temperatura, variaciones de humedad, acción del viento y de aguas infiltradas en las discontinuidades del macizo rocoso, vibraciones inducidas por voladuras, entre otras.

³⁰ Varnes, 1978

³¹ Cruden y Varnes, 1996

³² PGM N°4 (2007)



Efecto en ductos: a) en el caso de ducto ubicado en la parte superior: pérdida de tapada, exposición, suspensión, deformaciones, entre otros y b) en el caso de ducto ubicado en la parte inferior: sobrecarga, posibles impactos, taponamiento del DDV, abolladuras, aplastamientos, entre otros.

Acciones de mitigación: instalación de obras de drenaje y sub-drenaje (cunetas de coronación, canales, drenes horizontales, filtros), confinamiento del DDV mediante obras de contención (pernos, anclajes, mallas ancladas, pantallas ancladas, muros de contención, sistema de pilotaje, concreto lanzado), obras de retención y control de caídos (barreras artificiales o naturales, muros, bermas, trincheras), cubiertas o escudos de protección (falso túnel), cambio de ruta, revegetación y reforestación, entre otras.

Monitoreo: patrullaje, inspección terrestre y aérea con sobrevuelos del DDV, monitoreo meteorológico, monitoreo topográfico, análisis estereográfico de discontinuidades, correlación con registro del paso de herramienta inercial, monitoreo por efecto co-sísmico, entre otros.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2014).

Figura 3.27 Efectos de caída de rocas sobre ductos

3.1.6. Volcamientos

Concepto: “se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro localizado en la parte inferior de la masa. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas”³³.

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta meses.

Causas: características del buzamiento y estratificación de discontinuidades, tamaños de bloques o de porciones de estratos inclinados, valores altos de la relación entre la altura y el ancho promedio de las unidades rocosas que sufren volcamiento, morfología y rugosidad de las superficies de discontinuidades, agrietamientos, ocurrencia de lluvias y sismos, acción del viento, vibraciones inducidas por voladuras.

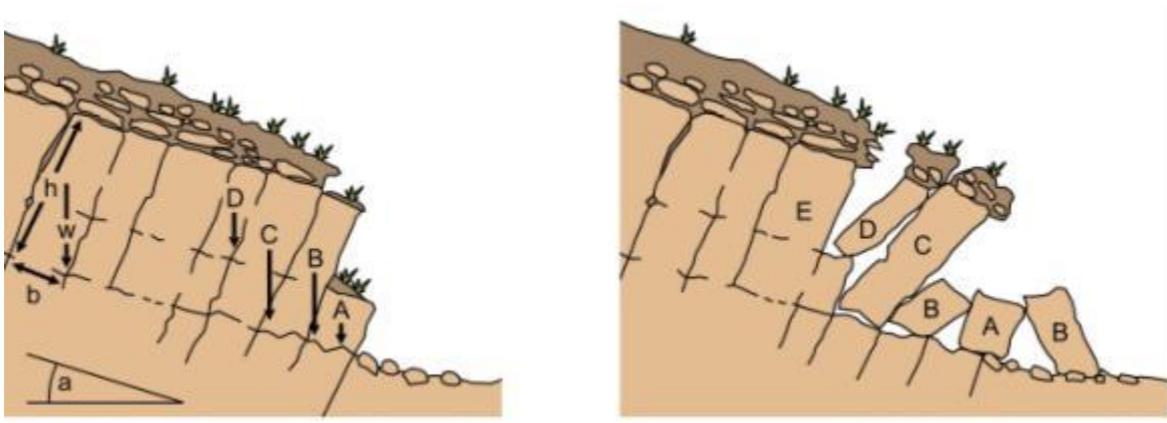
³³ Varnes (1978)

Efectos en ductos: a) en el caso de ducto ubicado en la parte superior del talud: pérdida de tapada, exposición, suspensión, entre otros y b) en el caso de ducto ubicado en la parte inferior del talud: sobrecarga, posibles impactos, aplastamiento, abolladuras, entre otros.

Acciones de mitigación: instalación de obras de drenaje y sub-drenaje (cunetas de coronación, canales, drenes horizontales, filtros), confinamiento del DDV mediante obras de contención (pernos, anclajes, mallas ancladas, pantallas ancladas, muros de contención, sistema de pilotaje, concreto lanzado), obras de retención y control de caídos (barreras artificiales o naturales, muros, bermas, trincheras), cubiertas o escudos de protección (falso túnel, redes de alta resistencia), cambio de ruta, revegetación y reforestación, entre otras.

Monitoreo: patrullaje, inspección terrestre y aérea con sobrevuelos del DDV, monitoreo meteorológico, monitoreo topográfico, correlación con registro de pasaje de herramienta inercial, monitoreo por efecto co-sísmico, entre otros.

Ejemplo:



Fuente: Publicación geológica multinacional N° 4 (2007, p.34).

Figura 3.28 Ejemplo de volcamiento de roca

3.1.7. Movimientos complejos

Es importante destacar que, en algunos casos, pueden ocurrir diferentes tipos de deslizamientos en diversos sectores de un movimiento en masa, tales como: rotacionales, traslacionales, planares o en cuña, inclusive en sectores donde un mayor contenido de humedad da origen a flujos de lodo locales. En estos casos se puede definir que el movimiento de masa general es complejo. Sin embargo, se debe mencionar que siempre es posible identificar un único tipo de movimiento predominante. Por lo general este tipo de movimiento puede manifestarse en grandes áreas e inclusive, en algunos casos, afectar laderas completas³⁴.

³⁴ En las siguientes fuentes se pueden consultar varias fotografías de movimientos complejos: www.iuniversi.com; Reuters (deslizamiento masivo en Guatemala); y geotecnia-sor.blogspot.com



Fuente: COGA (2015).

Figura 3.29 Movimiento complejo

3.2. Hidrotécnicas

3.2.1. Socavación (de fondo y márgenes)

Concepto: “Los cruces de los cuerpos de agua presentan una amenaza a los ductos debido a que la dinámica de las corrientes de agua es variable; transportan materiales cuyos tamaños varían desde granos de arcilla y arena hasta bloques de roca, que producen erosión en el fondo del cauce y sus márgenes pudiendo llegar a exponer los ductos, sometiéndolos entonces al golpe ocasionado por el material transportado. El efecto del golpe de materiales de arrastre, de un cuerpo de agua, al ducto, puede producir abollamientos y roturas o desgaste mecánico que puede estar asociado al posible efecto de fatiga; asimismo, la fuerza del flujo puede ocasionar deformaciones que superen su límite elástico.”³⁵.

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta años.

Causas: lluvias intensas con corta duración o periodos lluviosos prolongados, fuerte pendiente longitudinal de la corriente que genera incremento de la velocidad del curso de agua, amplia cuenca hidrográfica, localización inadecuada del ducto en la llanura de divagación del río y dentro del lecho móvil, cruce del ducto en zonas de curvas o meandros, cambios bruscos de dirección de cauces por confluencias, angostamientos u obstrucciones, así como obras de control de erosión de sección mínima, etc.

Efecto en ductos: exposición de ductos, posibles abolladuras, daño en revestimiento, desgaste mecánico, desplazamiento del alineamiento de los ductos, roturas, etc.

³⁵ Plan de Gerenciamiento de Integridad de COGA para la operación del STD de Camisea, 2012



Acciones de mitigación: a) estudios: determinación de caudales máximos extraordinarios en las zonas del cruce subfluvial: estudio de la zona histórica de divagación del cauce b) obras de acorazamiento del fondo del cauce mediante enrocados, mallas de gavión, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto, bajada del alineamiento del ducto, entre otras, y c) obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto, bolsacretos y revegetación, cruces aéreos con soportes en los extremos, entre otras.

Monitoreo: registros de topografía, batimetría, limnigráficas y de caudales, recorridos aéreos, análisis de fotointerpretación e imágenes satelitales.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.30 Socavación de fondo



Fuente: OCENSA (2014).

Figura 3.31 Socavación lateral

3.2.2. Curso de agua paralelo al DDV

Concepto: la ubicación de los ductos dentro del área de influencia de las corrientes de agua, por ejemplo paralelos a las mismas, puede incidir en la estabilidad del DDV y en la integridad del ducto, al exponerlo a los golpes y esfuerzos de tracción causados por el material de arrastre y la corriente de agua, respectivamente. En ocasiones, los ductos transcurren por las laderas adedañas al cauce de las corrientes y la estabilidad del ducto está en función del grado de estabilidad de las márgenes por el efecto de la dinámica fluvial. Para la evaluación de este tipo de geoamenaza, se recomienda considerar la susceptibilidad del terreno a los efectos de la acción de la corriente y la distancia entre el borde del cauce y el ducto. Se trata de un efecto de la socavación de márgenes de una corriente de agua en la que el ducto no atraviesa sub-fluvialmente, sino que transcurre paralelo a la corriente en una longitud importante.

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta años. Depende de la distancia del DDV al borde del cauce de la corriente de agua y a la susceptibilidad del terreno.

Causas: DDV en el área de influencia del río, lluvias intensas con corta o larga duración, fuerte pendiente longitudinal de la corriente, amplia cuenca hidrográfica, localización del ducto en la llanura de divagación del río, meandros o ríos emplazados, obras de control de erosión de sección mínima, etc.

Efectos en ductos: exposición de ductos, posibles abolladuras, daño en revestimiento, desplazamiento del alineamiento de los ductos, roturas, etc.

Acciones de mitigación: a) estudios: determinación de caudales máximos extraordinarios en las zonas del cruce subfluvial, redireccionamiento del cauce del río, b) obras de acorazamiento de fondo mediante: enrocados, mallas de gavión, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto, entre otras, y c)



obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto, bolsacretos, tablestacas y revegetación, entre otras.

Monitoreo: registros de topografía, batimetría, limnigráficas y de caudales, recorridos aéreos, análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales, análisis multitemporal.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.32 Curso de agua paralelo al DDV

3.2.3. Inundaciones

Concepto: evento localizado en depresiones topográficas cercanas a fuentes o cruces de corrientes de agua con el DDV. Se manifiesta cuando el DDV actúa como un canal de flujo, lo cual origina procesos erosivos del suelo, que facilitan la exposición del ducto. En desbordamientos de corrientes de agua en terrenos de baja pendiente se pueden inundar grandes áreas, que podrían incluir los DDV.

Tiempo de ocurrencia: ocurrencia desde minutos hasta horas.

Causas: lluvias intensas con corta duración, periodos invernales prolongados, fuerte pendiente longitudinal de la corriente previo a la depresión topográfica, zonas de baja pendiente como ciénagas, amplia cuenca hidrográfica, construcción inadecuada del ducto en el ancho de divagación lateral histórico del río, obras de control de erosión marginal de sección mínima, represamiento de corrientes de agua paralelos al DDV, cambio de patrones de uso del suelo asociados al cambio climático o actividad económica, alto nivel freático combinado con lluvias severas, etc.

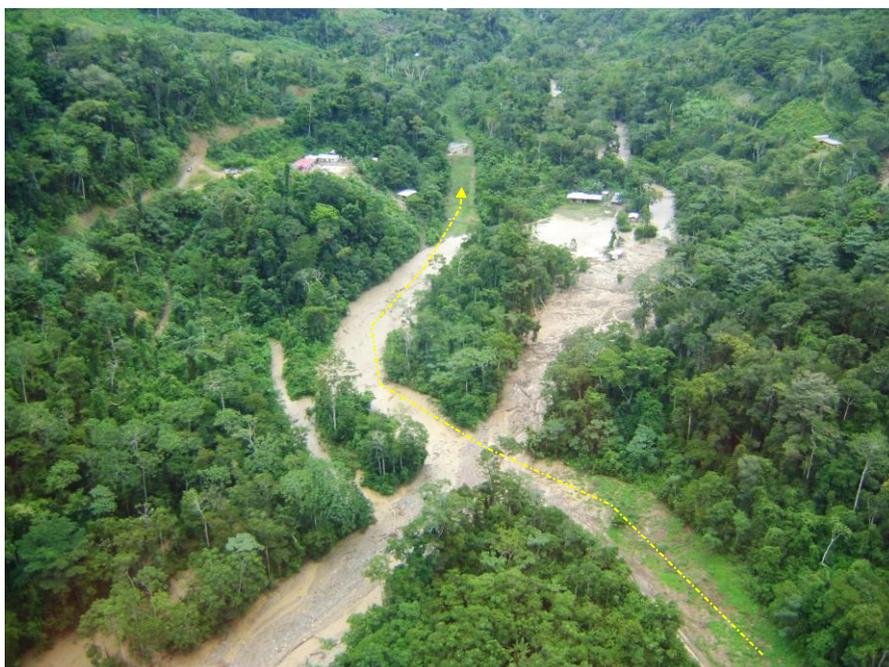
Efecto en ductos: exposición de ductos, daño en revestimiento, desplazamiento del eje de los ductos, flotación, etc.



Acciones de mitigación: a) estudios: determinación de zonas adyacentes al DDV, mediante modelo de elevación digital, con caudales máximos extraordinarios en las zonas del cruce subfluvial. Implementación de un plan de manejo integral de la cuenca. b) obras de acorazamiento de fondo mediante: enrocados, mallas de gavión, sedimentadores, revestimiento de ductos con hormigón, entre otros, y c) obras de protección marginal: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto y revegetación, entre otros.

Monitoreo: registros de topografía, batimetría, limnigráficas y de caudales, recorridos aéreos, análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.33 Efecto de inundación en un DDV

3.2.4. Abandono del cauce (avulsión)

Concepto: algunas corrientes de agua poseen un amplio cauce de divagación por el que históricamente han discurrido en diferentes épocas. El cauce por el que corren en algún momento es susceptible de cambio intempestivo de forma después de una creciente buscando un cauce antiguo (madre vieja). Generalmente esto ocurre porque el cambio de pendiente del cauce es mucho menor al de la pendiente que el río podría adquirir si tomara un nuevo rumbo.

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta horas

Causas: lluvias intensa de corta de duración o temporadas lluviosas extendidas, represamiento aguas arriba, acción antrópica, cambio de pendiente en el cauce, entre otras.

Efecto en ductos: exposición del ducto sometiéndolo a la acción de sedimentos y bloques transportados en tramos no protegidos. También pueden quedar tramos del ducto sin soporte.



Acciones de mitigación: estudio previo para determinar el ancho del cauce de divagación, ducto lastrado y a profundidad de cruce subfluvial en todo el cauce extendido, cruce subfluvial dirigido, acorazamiento de fondo del cauce actual mediante enrocados, mallas de gavión, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto, entre otros, obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto, bolsacretos, tablestacas y revegetación, entre otros.

Monitoreo: estudios hidrológicos de amplitud histórica de cauce, seguimiento batimétrico y topográfico, patrullajes, recorridos aéreos, interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, análisis multitemporales.



Fuente: OCENSA (2015).

Figura 3.34 Río trenzado en los llanos orientales colombianos

3.2.5. Avenidas torrenciales

Concepto: las corrientes de agua de alta montaña (alta pendiente longitudinal del cauce), cuenca relativamente pequeña y de forma alargada, reaccionan con crecientes súbitas, con alto poder de socavación, ante lluvias intensas de corta duración. Estas avenidas pueden transportar grandes bloques en un solo evento, generar socavaciones importantes y destapar el ducto.

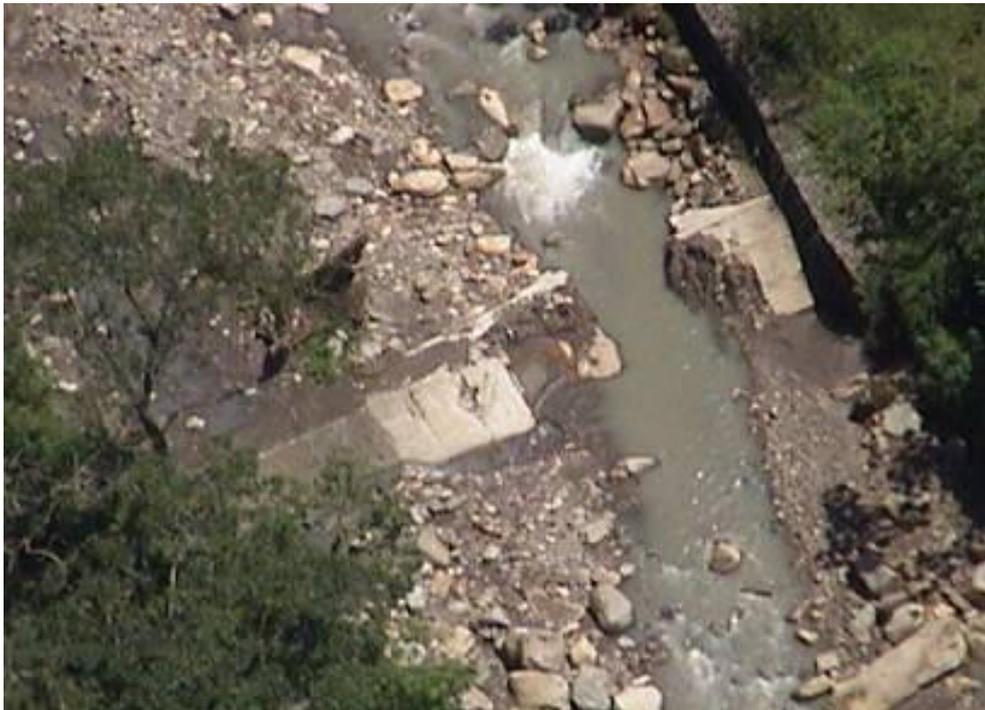
Causas: lluvias intensas, corrientes de agua de alta pendiente, cambio de uso del suelo, y cuencas con gradientes altos y áreas medias, lo cual implica cortos tiempos de concentración y altas velocidades de las corrientes.



Efecto en ductos: exposición del ducto sometiéndolo a la acción de sedimentos y bloques transportados en tramos no protegidos, pérdida de soporte en tramos de ductos aéreos. Daño del recubrimiento del ducto.

Acciones de mitigación: placas de concreto o acorazamiento con enrocado en el cauce, sedimentadores en lecho, profundización de tapada del ducto, estructuras de fijación y refuerzo del lecho, entre otras.

Monitoreo: estudios hidrológicos de crecientes y capacidad de socavación, estudio de características de material del lecho, sensores de nivel de ríos, batimetrías y verificación de cobertura (tapada), patrullajes e inspecciones periódicas.



Fuente: OCENSA (2015).

Figura 3.35 Socavación pronunciada debida a una avenida torrencial



Fuente: Rizkalla M., García H. (2013). Tutorial de Manejo del riesgo geotécnico. IPG 2013 Bogotá. Colombia.

Figura 3.36 Avenida torrencial

3.3. Erosión

Concepto: la erosión es uno de los procesos más representativos de la alteración de la condición normal de un DDV. "La erosión es el resultado de la acción de las fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento. En el caso de la erosión producida por el agua, el proceso puede analizarse a partir del desprendimiento de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia y al mismo tiempo ocurre el proceso de flujo superficial o escorrentía, inicialmente por la acción de una delgada capa o película de agua (erosión laminar) y luego por canalículos o hilillos, surcos, zanjas y cárcavas, a medida que se aumenta la magnitud del proceso. Como resultado de esto, las partículas removidas son incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo. Adicionalmente, las corrientes generan procesos de desprendimiento de partículas por acción de la fuerza del agua en movimiento. Los procesos son muy complejos y es común que varios de ellos actúen en conjunto."³⁶

A continuación se presentan las características de los tipos de erosión con mayor acción sobre los DDV.

3.3.1. Surcos y zanjas

Concepto: proceso que comprende la concentración de un flujo sobre alguna sección transversal o longitudinal del DDV, principalmente en pequeños microcanales de una dimensión de hasta 10 cm de

³⁶ Suárez (2001) con ligeras modificaciones.



profundidad que se profundizan de acuerdo con la acción de dicho flujo. Normalmente, los microcanales se desarrollan de manera paralela.

De acuerdo con Morgan (1995) se considera que los surcos y zanjas se ubican a una distancia crítica talud abajo, cuando el flujo superficial o no concentrado comienza a canalizarse en un proceso ya resumido de formación de microcanales (hilillos o canalículos) o con desarrollo de trayectorias de flujos preferenciales o principales; pueden formarse después trayectorias secundarias que al converger con las anteriores causan un incremento en el microcaudal, se intensifica el movimiento de partículas del suelo y se originan los surcos.

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta meses.

Causas: recomposición deficiente del DDV, deforestación, lluvias, huellas de caminos de paso sobre el DDV, y suelos susceptibles.

Efecto en ductos: pérdida de tapada, deforestación, transporte de sedimentos a fuentes hídricas, degeneración en cárcavas y movimientos de masa.

Acciones de mitigación: reconfiguración del DDV, reforestación, manejo superficial de aguas, construcción de cortacorrientes, y cobertura de superficies con vegetación o mortero.

Monitoreo: patrullaje e inspección y sobrevuelos del DDV.

Ejemplos:



Fuente: OCENSA (2015).

Figura 3.37 Erosión por surcos, DDV en el Magdalena medio Colombiano



3.3.2. Cárcavas

Concepto: “Los surcos pueden profundizarse formando canales profundos o la concentración en un sitio determinado de una corriente de agua importante puede generar canales largos y profundos llamados cárcavas. Una vez se inicie la cárcava es muy difícil de suspender el proceso erosivo”.³⁷

Dichas cárcavas se presentan de manera transversal o paralela al DDV y producen un efecto significativo, de transporte y depositación de material, sobre las zonas adyacentes al DDV.

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta meses.

Causas: recomposición deficiente del DDV, deforestación, lluvias, huellas de caminos de paso sobre el DDV, fuerte pendiente del DDV o zonas adyacentes, y diseño inadecuado de la entrega de canales colectores y cortacorrientes, suelos susceptibles, monitoreo deficiente.

Efecto en ductos: pérdida de tapada, deforestación y deformación excesiva por pérdida de apoyo que puede llevar a la rotura del ducto.

Acciones de mitigación: reconformación de la cárcava y el DDV, redireccionamiento de flujos de agua, manejo superficial de aguas, llenado y compactación de la cárcava, construcción de diques de gaviones o de saco-suelo, muros de geotextil tejido, reforestación, entre otros.

Monitoreo: patrullaje e inspección y sobrevuelos del DDV.

Ejemplos:



Fuente: OCENSA (2015).

Figura 3.38 Erosión por cárcavas en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos

³⁷ Suárez (2001).



3.3.3. Pérdida de cobertura vegetal y nivel de tapada

Concepto: el proceso de pérdida de cobertura vegetal, por efectos de periodos prolongados de verano, extracción mecánica, incendios, entre otros, acompañado con el efecto del viento y la lluvia, genera la exposición del suelo desnudo a la erosión, y consecuentemente la disminución del nivel de tapada.

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta meses.

Causas: recomposición deficiente del DDV, deforestación, suelos poco fértiles, lluvias, e incendios.

Efecto en ductos: pérdida de tapada, deforestación, transporte de sedimentos a fuentes hídricas, y generación de erosión concentrada.

Acciones de mitigación: reconformación del DDV, mejoramiento de la fertilidad del suelo y reforestación, y manejo superficial de aguas mediante la construcción de cortacorrientes.

Monitoreo: patrullaje e inspección y sobrevuelos del DDV.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2014).

Figura 3.39 Pérdida de cobertura vegetal y de nivel de tapada

3.3.4. Erosión eólica

Concepto: el proceso de actividad en el desierto o en terrenos expuestos a fuertes vientos, es muy variado, se pueden presentar socavaciones y erosiones por el viento, transporte de arena, limos y polvo en general, que cambian la geomorfología del DDV. Es importante mencionar que la erosión eólica comprende 3 fases: desprendimiento, transporte y depositación de las partículas.



En el desierto se presentan dos tipos de erosión eólica: por deflación y por abrasión. La deflación es el removimiento de material y la abrasión es el desgaste de la superficie por la acción de partículas más finas cuya energía proviene del viento. Igualmente existen dos tipos de depósitos ocasionados por el viento: dunas y depósitos repentinos.³⁸

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta horas.

Causas: velocidad del viento, tamaño de partículas del suelo, presencia de dunas migrantes, humedad del suelo y el medio, cambio de forma de dunas por acción antrópica.³⁹

Efecto en ductos: exposición de ductos, daño en revestimiento producto de la abrasión, etc.

Acciones de mitigación: a) estudios: determinación de velocidades de viento y tipos de dunas en la zona del DDV; b) obras: incremento del espesor de tapada, muros de gaviones, o enrocados paralelos al eje del ducto, barreras contra viento, etc.

Monitoreo: registros de topografía mediante marcadores de nivel de arena (*sand markers*), recorridos aéreos, análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales multitemporales.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2014).

Figura 3.40 Erosión eólica en un DDV

³⁸ Reading (1986).

³⁹ Idem ³⁸.



3.3.5. Por oleaje

Concepto: Las fuerzas de las olas al ascender y descender por una superficie de suelo producen el desprendimiento y el transporte de partículas.⁴⁰

Tiempo de ocurrencia: desde minutos hasta días.

Causas: DDV sobre un abanico de sedimentación cercano al mar o a un lago o laguna en un área inundada, y fuertes vientos sobre corrientes de agua u océano.

Efecto en ductos: pérdida de tapada y exposición del ducto, especialmente en las líneas submarinas.

Acciones de mitigación: reconformación del DDV, construcción de espolones, enrocados, y protecciones con bolsacretos o colchacretos que mitiguen la acción del oleaje, cambio de trazado.

Monitoreo: patrullaje e inspección y sobrevuelos del DDV, monitoreo meteorológico, y monitoreo topográfico.

Ejemplos:



Fuente: www.tabascohoy.com (2014). Tabasco, México.

Figura 3.41 Erosión por oleaje

3.3.6. Erosión interna (piping)

Concepto: la erosión interna es uno de los eventos más interesantes que pueden afectar la integridad de un ducto. Es una acción bajo la superficie del terreno (o del DDV) de remoción y transporte de partículas interna oculta, de avance lento o rápido, que no es perceptible en los monitoreos comunes de un DDV y puede abarcar grandes longitudes del DDV afectadas por dicho fenómeno. La manifestación en superficie puede ser un asentamiento súbito del terreno debido al colapso del suelo por la formación de la caverna, o la aparición en superficie de flujos sub-superficiales paralelos al ducto.

⁴⁰ Suárez (2011).

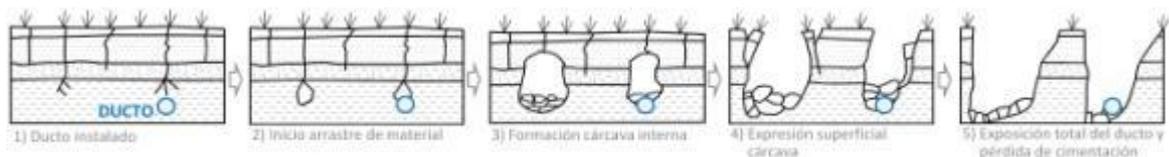


"La erosión interna incluye el transporte de partículas en solución, suspensión y arrastre a través de cavernas interconectadas, o ductos y tubificación, o a lo largo del fondo de cimentaciones. Los factores que pueden iniciar un proceso de erosión interna son:

- a) Rellenos no compactados (zanjas para enterrar ductos).
- b) Agrietamiento por cambios de humedad.
- c) Desaparición de la cobertura vegetal.
- d) Existencia de capas impermeables dentro del perfil del suelo.
- e) Gradientes hidráulicos internos muy altos.
- f) Presencia de fracturas de neotectónica o estructuras heredadas en un suelo residual.
- g) Dispersividad o solubilidad del suelo.

En relación con el efecto que se puede evidenciar en un DDV, debido a grandes pendientes (más del 30%), especialmente en zonas de alta montaña, en la zanja dentro de la cual se coloca el ducto se produce un flujo interno de agua con velocidades importantes. El flujo que generalmente se localiza al fondo de la zanja genera arrastres de sedimentos formándose cavernas de erosión que pueden producir carcavamiento superficial o erosión debajo de la cimentación de la tubería."⁴¹

En la Figura 3.4 se pueden observar las diferentes etapas de la ocurrencia del evento de erosión interna.



Fuente: Oliveros (2014) adaptada de Suárez (2001).

Figura 3.42 Etapas de erosión interna en ductos enterrados

Tiempo de ocurrencia: desde días hasta meses.

Causas: compactación inadecuada del relleno de la zanja, falta de obras de drenaje sub-superficial, infiltración, altos gradientes hidráulicos internos, altas pendientes del terreno, falta de barreras en la zanja, suelos susceptibles de dispersión o erosión, etc.

Efecto en ductos: generación de cárcavas internas, exposición del ducto, y pérdida de terreno de soporte de tapada.

Acciones de mitigación: instalación de barreras o tapones en la zanja, filtros sub-superficiales, reconformación del DDV, adecuada compactación de relleno de la zanja, y mejoramiento del suelo con cal o cemento y revegetación.

Monitoreo: patrullaje e inspección y sobrevuelos del DDV.

Ejemplos:

⁴¹ Suárez (2001).



Fuente: ARPEL (2014). Curso de Gestión de Integridad de Ductos, módulo III.

Figura 3.43 Erosión interna

3.3.7. Asentamientos

Concepto: los asentamientos se evidencian comúnmente en aquellos sitios donde los suelos presentan las siguientes características: no se encuentran compactados adecuadamente, carecen de la competencia suficiente para dar soporte al ducto, o contienen materiales arcillosos y orgánicos con un alto grado de humedad. Los tipos principales de asentamientos se dan por: a) deformación elástica (suelos arenosos o suelos arcillosos no saturados), b) densificación, que se manifiesta en la salida del agua del suelo (suelos arcillosos), c) desplazamiento de las partículas del suelo desde las zonas más cargadas hacia las menos cargadas, y d) subsidencia debida a acciones de minería subterránea.

Normalmente, se recomienda no tener una distancia del ducto mayor de 5 ductos suspendidos sin apoyos intermedios debido a que el ducto queda vulnerable a sufrir deformaciones permanentes. Este número es apenas un valor guía, pues la longitud del ducto no soportada tolerable por éste, se basa en un análisis de flexión función del Grado API, espesor y diámetro. En este caso particular, se sumaría la sobrecarga, y el análisis del ducto actuando como viga, con carga distribuida.

Tiempo de ocurrencia: desde días hasta años.

Causas: materiales con alto grado de humedad, reptación y diversidad de capas de materiales con diferente permeabilidad. Ver también el numeral 4.3.6.

Efecto en ductos: carga sobre eje del ducto y generación de cárcavas.

Acciones de mitigación: extracción del material del área con asentamiento, reconfiguración del DDV, y construcción de barreras en la zanja.

Monitoreo: patrullaje e inspección y sobrevuelos del DDV, inventario de minas y monitoreo meteorológico.

Ejemplos:



Fuente: COGA (2015). Oficina Técnica Geotecnia.

Figura 3.44 Asentamiento

3.4. Actividad Sísmica: tectónica / volcánica

La actividad sísmica puede generarse, entre sus principales causas, por origen tectónico o por eventos volcánicos. Estos eventos se podrían cuantificar, entre otros, mediante medidas a través de escalas subjetivas y objetivas para el caso de sismos tectónicos, y a través de la escala IEV⁴² para erupciones volcánicas⁴³.

| IEV | Clasificación | Descripción | Altura columna eruptiva | Volumen material arrojado | Periodicidad | Ejemplo | Total erupciones históricas |
|-----|--|----------------|-------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 0 | Erupción hawaiana | no-explosiva | < 100 m | > 1000 m ² | diaria | Kílauea | - |
| 1 | Erupción stromboliana | ligera | 100-1000 m | > 10.000 m ² | diaria | Stromboli | - |
| 2 | Erupción vulcaniana / stromboliana | explosiva | 1-5 km | > 1.00.000 m ² | semanal | Galeras, 1993 | 3477 |
| 3 | Erupción Vulcaniana (sub-pliniana) | violenta | 5-15 km | > 10.00.000 m ² | anual | Nevado del Ruiz, 1985 | 868 |
| 4 | Vulcaniana (sub-pliniana)/ pliniana | cataclísmica | 10-25 km | > 0,1 km ² | 10 años | Galunggung, 1982 | 278 |
| 5 | Pliniana | paroxística | > 25 km | > 1 km ² | 10 años | St. Helens, 1980 | 84 |
| 6 | Pliniana / Ultra-Pliniana (krakatoana) | colossal | > 25 km | > 10 km ² | 100 años | Krakatoa, 1883 Santa María, 1902 | 39 |
| 7 | Ultra-Pliniana (krakatoana) | super-colossal | > 25 km | > 100 km ² | 1.000 años | Tambora, 1815 Maipo, 500.000 a.C. | 4 |
| 8 | Ultra-Pliniana (krakatoana) | mega-colossal | > 25 km | > 1000 km ² | 10.000 años | Toba, 69.000 a.C. | 1 |

El conteo de erupciones históricas está actualizado hasta 1994 de acuerdo al Global Volcanism Program del Instituto Smithsonian

Fuente: board.mx.ikariam.gameforge.com

Tabla 3.4 Índice de Explosividad Volcánica - IEV

⁴² Índice de Explosividad Volcánica, de sus siglas en inglés: Volcanic Explosivity Index.

⁴³ Para mayor información, referirse a las siguientes fuentes: <http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/escalas.htm>
http://www.upv.es/dit/cefire/Magnitud_Volcan.htm



Las principales amenazas asociadas con actividad sísmica se pueden identificar como⁴⁴:

1. Rotura superficial primaria de la falla que origina el sismo.
2. Sacudidas fuertes del terreno.
3. Licuación de suelos, proceso que puede ocurrir en suelos en los cuales predomina la arena fina de baja densidad (*suelta*), así como arenas y gravas limosas saturadas, como en los depósitos de inundación del pasado, mantos de ceniza volcánica u otros.
4. Fallas de taludes inducidas por el sismo.
5. Tsunamis.

Las amenazas 2 y 5 se deben a las ondas sísmicas generadas por la amenaza 1 y se miden en términos de la frecuencia, amplitud, velocidad, desplazamiento de partículas y aceleración. Las amenazas 3 y 4 ocurren al propagarse las ondas sísmicas a través de suelos y rocas.

En relación con los criterios de diseño, en los proyectos de ingeniería se llevan a cabo investigaciones geológicas y geomorfológicas para identificar y caracterizar la localización, severidad y frecuencia de las amenazas sísmicas que tienen posibilidad de ocurrir en la zona del proyecto.

Con base en el conocimiento de lo anterior, se procede a determinar aspectos del proyecto como los siguientes:

- a) Evaluar si el sitio seleccionado es adecuado.
- b) Desarrollar criterios de diseño ingenieril de las diversas estructuras, instalaciones o sistemas.
- c) Establecer la probabilidad de que un evento exceda los criterios de diseño para una instalación o estructura específica.
- d) Evaluar el riesgo residual de una instalación o estructura a partir de las condiciones geológicas de un sitio o región.

Para ductos enterrados, las rupturas o distorsiones severas están asociadas con frecuencia a movimientos relativos originados por movimientos de fallas, deslizamientos, licuación, pérdida de soporte, o movimientos diferenciales en interfases abruptas entre roca y suelo, o entre dos tipos o densidades de suelo. Además, se han registrado roturas en las conexiones de ductos donde han ocurrido grandes diferencias relativas en la respuesta a dichos movimientos, como entre ducto enterrado restringido por el suelo y estructuras menos restringidas o tanques.

Para movimientos significativos de suelo, las deformaciones en el ducto pueden exceder el punto de fluencia mínimo. Sin embargo, cuando se deforma en tensión, un ducto de acero bien diseñado es muy dúctil y capaz de desarrollar grandes deformaciones asociadas con fluencia en tracción significativa antes de la rotura. Con un buen control de calidad para promover la uniformidad de las propiedades del ducto, y una inspección adecuada de las soldaduras para minimizar los defectos en éstos, pueden tolerarse límites de deformaciones de tensión máximas de diseño del 2 al 5%.

⁴⁴ García López (2012).



3.4.1. Actividad sísmica: tectónica

Los sismos de origen tectónico, son aquellos producidos por fracturas o colisiones de grandes áreas de las placas tectónicas de la corteza terrestre, entre los cuales pueden generar principalmente, por su importancia y recurrencia, fallas geológicas y licuefacción, las cuales se describen a continuación:

3.4.1.1. Efecto de fallas geológicas

Concepto: "La neotectónica (o tectónica reciente) comprende el estudio y análisis de las fallas geológicas activas y potencialmente activas, es decir, las que tienen la capacidad para moverse y producir sismos catastróficos.

Se entiende por falla activa, aquella que se ha movido varias veces durante el Holoceno (los últimos 10.000 años) y tiene el potencial de generar vibraciones fuertes del terreno o sismos catastróficos, además de inducir deslizamientos, avalanchas, hundimientos del terreno y fenómenos de licuación y expansión lateral de suelos.

Sus periodos de recurrencia varían de algunas decenas a pocos cientos de años para las magnitudes bajas y de algunos cientos a miles de años para las magnitudes altas. Estas fallas, aunque pertenecen a sistemas tectónicos de gran longitud, en las cordilleras, por lo general están conformadas por segmentos individuales, que varían en promedio entre 20 y 70 km."⁴⁵

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta días.

Causas: sismos, existencia de fallas geológicas activas, etc. De la misma manera, los siguientes factores afectan el comportamiento de ductos ante movimientos sísmicos, en el cruce de fallas geológicas⁴⁶:

- Profundidad de enterrado ("tapado") el ducto.
- Configuración de la zanja.
- Magnitud del movimiento relativo de la falla.
- Ángulo entre el ducto y la falla en el sitio donde la cruza.
- Propiedades del suelo en el cual se localiza la zanja.
- Longitud efectiva del ducto no anclado.
- Propiedades del material del ducto.
- Geometría del alineamiento del ducto.
- Presión interna en el ducto.

Efecto en ductos: exposición, daño en revestimiento, desplazamiento de su eje, deformaciones permanentes, rotura, etc.

*Acciones de mitigación*⁴⁷:

- a) Colocar el ducto aéreo, sobre un terraplén construido con suelo de baja resistencia al corte.
- b) Colocar el ducto aéreo sobre elementos de soporte deslizante (o que permitan su movimiento).

⁴⁵ García López (2012).

⁴⁶ Idem ⁴⁴.

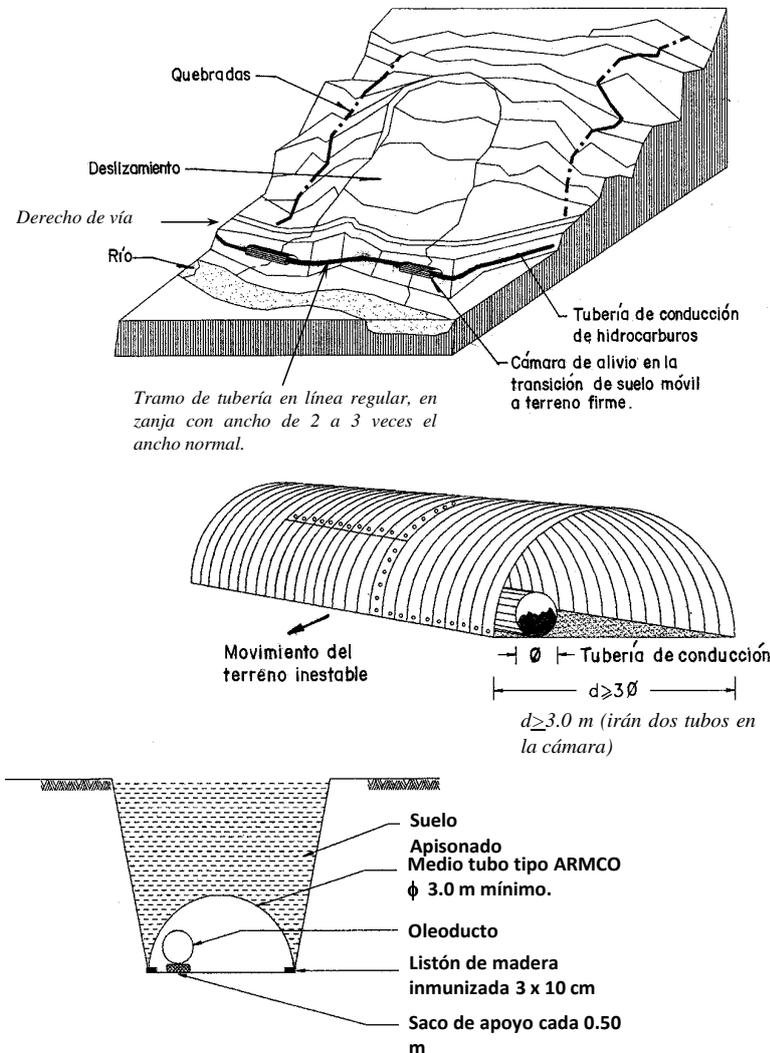
⁴⁷ Idem ⁴⁴.



- c) Colocación del ducto en zanjas de tamaño mayor que el normal, rodeado de material desmoronable de baja resistencia o de un relleno seleccionado.
- d) Encamisar el ducto dentro de tubos de mayor diámetro.
- e) Siempre y cuando haya posibilidad, en el cruce de una falla de rumbo, el ducto debe orientarse de tal manera que quede sometido predominantemente a tracción.
- f) Las fallas inversas deben interceptarse con un ángulo oblicuo que debe ser tan pequeño como sea posible para minimizar deformaciones de compresión; también si se anticipa desplazamiento de rumbo significativo, el ángulo de cruce del ducto con la falla debe escogerse de manera tal que se promueva la deformación por tensión en el ducto.
- g) En todas las áreas de ruptura potencial del terreno, los ductos deben dejarse en tramos relativamente rectos, para evitar cambios fuertes en dirección y elevación. Al respecto, y en la medida de lo posible, éstos deben construirse sin codos, curvas y “flanges”, que tiendan a anclarlo.
- h) La profundidad de tapada (o de enterramiento del ducto) debe minimizarse en las zonas de falla, para reducir la resistencia del suelo a su movimiento durante el movimiento de la falla (en el caso de sismo).
- i) Incrementar el espesor de la pared del ducto para mejorar su resistencia ante el desplazamiento de la falla, a un nivel dado de máxima deformación por tensión. Puede ser apropiado usar ductos de paredes relativamente gruesas en longitudes de aprox. 300 m (1.000 pies) a cada lado de la falla. Debe atenderse con cuidado la integridad de la soldadura, sobre todo tratándose de espesores de pared grande.
- j) La reducción del ángulo de fricción entre el tubo y el suelo que lo rodea también aumentará la capacidad del ducto ante desplazamientos de la falla, a un nivel dado de deformación máxima. Una forma de lograr esto es el uso de un revestimiento en los tubos que sea duro y liso, tal como los revestimientos epóxicos en la vecindad del cruce de la falla.

Monitoreo: registros de topografía, recorridos aéreos, análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales, análisis e inspecciones post-sismo, estudios de amenaza sísmica, y red de sismógrafos.

Ejemplos:



Fuente: García López (2012). Sismicidad en ductos. 1° Encuentro Geología y Geotecnia en Ductos. Lima, Perú.

Figura 3.45 Medidas preventivas de los efectos de sismicidad en ductos

3.4.1.2. Licuación o licuefacción

Concepto: en términos generales, la licuación o licuefacción se presenta en suelos granulares (arenas y limos) con escasos finos (arcillas - normalmente en porcentaje inferior al 12% de material que pasa el Tamiz N°200) y en presencia de agua (saturados o parcialmente saturados) ante esfuerzos cíclicos (por sismos, vibración producida por equipos, entre otros). Desde el punto de vista técnico: "Es la transformación de un sedimento en estado granular sólido al estado líquido como resultado del aumento en la presión del agua intergranular (de los poros). La causa puede ser el sacudimiento (cíclico) del sedimento por ondas sísmicas. El sedimento así licuado puede ser expulsado hacia arriba, rompiendo en su trayecto los sedimentos suprayacentes y resultando en la extrusión en superficie y la



formación de volcanes de arena (*sand blows* o *sand volcanoes*). En profundidad, la evidencia es en forma de diques de arena donde el conducto del volcán de arena corta los sedimentos⁴⁸. Estos conductos pueden ser fisuras o las madrigueras pre-existentes de animales⁴⁹.⁵⁰

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta minutos.

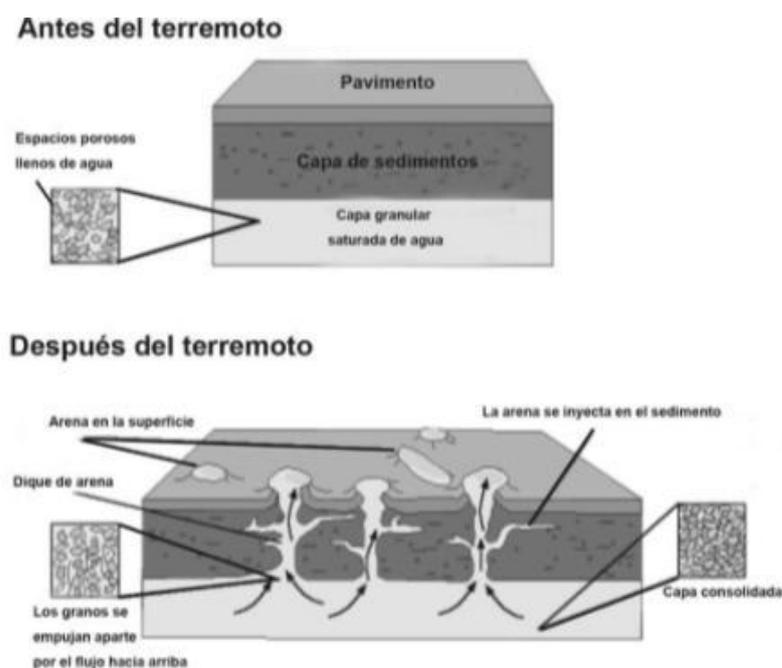
Causas: efecto de ocurrencia de un terremoto.

Efecto en ductos: exposición de ductos, deformaciones permanentes, desplazamiento del alineamiento de los ductos, etc.

Acciones de mitigación: desarrollo de estudios geológicos que permitan identificar las zonas con potencial efecto de licuefacción. Cruce dirigido bajo estratos susceptibles, evitar la instalación de puntos fijos como válvulas, o estaciones en zonas susceptibles.

Monitoreo: recorridos aéreos, análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales, análisis e inspecciones post-terremoto, estudios de amenaza sísmica, y zonificación de áreas susceptibles.

Ejemplos:



Fuente: Publicación geológica multinacional N°7 (2009, p.50).

Figura 3.46 Licuefacción derivada de un terremoto

3.4.2. Actividad sísmica: volcánica

Concepto: entre las geoamenazas más destructivas que se pueden tener sobre las instalaciones de ductos de transporte de hidrocarburos están las erupciones volcánicas, ya que las mismas, en muchos casos pueden acontecer con frecuencia y violencia (dependiendo de su clasificación en el índice IEV).

⁴⁸ Montes y Sandoval (2001).

⁴⁹ Audemard y de Santis (1991).

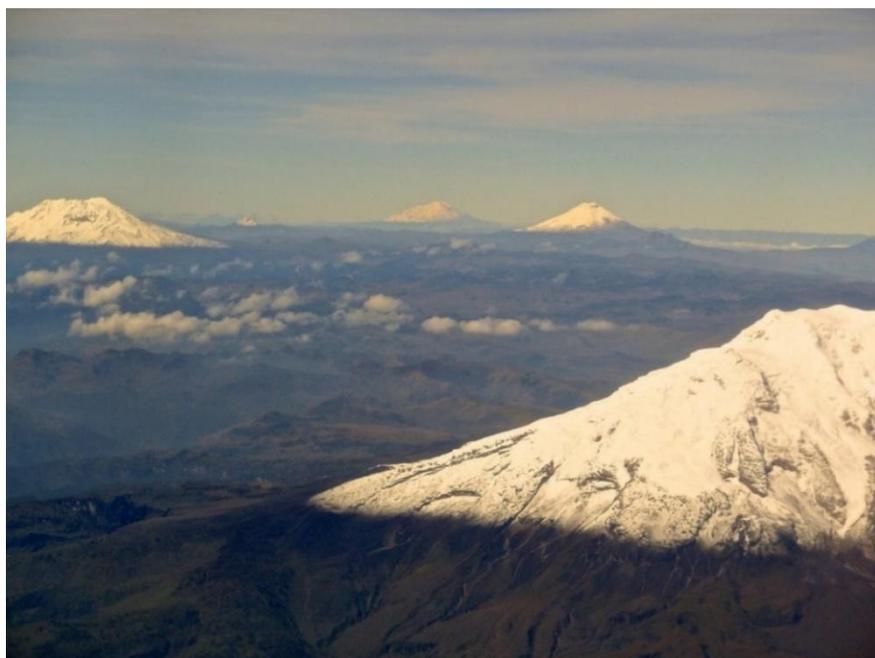
⁵⁰ Publicación geológica multinacional N°7 (2009).



Las erupciones violentas se caracterizan por presentar:

- Diversas manifestaciones primarias (tremores, emisión de cenizas y gases, abombamiento del edificio volcánico, etc.)
- Dificultad media de predicción e impacto geográfico variable, desde local hasta global. Las cenizas volcánicas en erupciones como las del Pinatubo en Filipinas, o el Chichón en México, se han extendido a lo largo de fajas que circundaron el globo terráqueo; y la gran erupción del Tambora en Indonesia (1815) produjo cambios climáticos de terribles consecuencias en los países del norte de Europa, Canadá y norte de los Estados Unidos, que llevaron a lo que se denominó “el año sin verano” en 1816.
- Gran poder destructivo y una rehabilitación lenta de la zona afectada.

La cadena volcánica existente a lo largo del cinturón de fuego del Pacífico, que incluye muchas islas del Pacífico Sur, Occidental y Norte, así como el Japón y muchas zonas extensas del borde occidental de América, incluyendo Centroamérica, El Caribe y grandes áreas de la Cordillera de los Andes, representa un riesgo potencial, debido a la gran cantidad de volcanes activos en estado eruptivo, los cuales son considerados peligrosos puesto que sus erupciones tienden a ser muy explosivas, caracterizadas por el crecimiento de domos, la generación de grandes flujos piroclásticos, caída de ceniza y formación de lahares.



Fuente: <http://www.elcomercio.com/galerias>

Figura 3.47 Avenida de los Volcanes - Callejón Interandino, Ecuador

El peligro de un volcán activo proviene de dos clases de erupciones con diferentes grados de explosividad, lo cual a su vez determina los diferentes tipos de amenaza:

- *Erupciones explosivas:* se originan por la disolución rápida y expansión de gases de la roca fundida a medida que ésta se aproxima a la superficie de la tierra. Las explosiones son un riesgo al dispersar bloques de rocas, fragmentos y lava a diferentes distancias del volcán.



- *Erupciones difusivas:* en las cuales el flujo de material más que las explosiones es el principal peligro. Los flujos varían en naturaleza (lodo, cenizas, lava) así como en cantidad y puedan originarse en múltiples fuentes. Los flujos están gobernados por la gravedad, por la topografía circundante y por la viscosidad del material.

Los volcanes activos del cinturón de fuego del Pacífico Sur presentan dos tipos principales de eventos volcánicos, dependiendo del tipo de magma: uno de carácter andesítico; y el más peligroso de carácter riolítico.

Los eventos andesíticos tienen poco alcance, 15 km aproximadamente desde el cráter. En cambio, los eventos de carácter riolítico, han producido flujos de escombros y lodo de más de 40.000.000 m³, que han llegado hasta valles, ríos y zonas pobladas con instalaciones de infraestructura industrial a varias decenas de kilómetros del cráter.

Tiempo de ocurrencia: ocurrencia desde segundos a minutos.

Causas: la amenaza puede ser directa o primaria (impacto directo de los productos de la erupción), e indirecta o secundaria (consecuencias secundarias de la erupción).

Son amenazas volcánicas directas:

- Los flujos piroclásticos: oleadas, flujos de pómez y ceniza o nubes ardientes.
- Caídas de tefra: ceniza, lapilli, bloques y bombas.
- Avalanchas volcánicas.
- Colapso estructural.
- Gases volcánicos.

Por otro lado, las amenazas volcánicas indirectas son:

- Deslizamientos.
- Flujos de lodo.
- Lahares.
- Tsunamis.
- Lluvia ácida.
- Circulación atmosférica de cenizas y material particulado.

El daño potencial de una erupción está en función de: tipo de volcán; características y magnitud de la erupción; topografía; condiciones meteorológicas; y vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Efectos en ductos: la actividad volcánica y sus efectos asociados, determinan una elevada vulnerabilidad por parte de las instalaciones de infraestructura hidrocarburífera, dado que en las cercanías de un volcán, donde hay una superposición de todos los fenómenos volcánicos, los efectos son de alto impacto y concentrados en un área restringida a unos pocos kilómetros.

Entre los principales efectos de un evento volcánico se encuentran:

- Desplazamiento del ducto de su DDV.
- Desestabilización de suelos por efectos erosivos.
- Exposición del ducto.
- Deformaciones estructurales (arrugas, ovalamientos, doblados).



- Sobreesfuerzos externos por exceso de enterramiento (riesgo de colapso).
- Roturas y efectos consecuentes: ambientales, explosiones e incendios, daños a terceros, etc.
- Daños en revestimiento por efecto de agentes químicos.

Acciones de mitigación: para este tipo de geoamenaza, se debe mencionar que es de gran importancia contar con un **programa de inspecciones** a los volcanes como a las zonas de impacto de las erupciones, ya que sirven para evaluar tanto los peligros a que está sometida una estructura de importancia, así como su vulnerabilidad. Esta actividad se puede realizar por varios métodos:

- i. Estudio de los efectos causados por erupciones pasadas (observación)
- ii. Aplicación de modelos teóricos de los fenómenos (predicción)
- iii. Estudio de los efectos de erupciones pasadas en una zona concreta (ductos)
- iv. Modelización de los efectos de la erupción esperada
- v. Estudios geológicos de las zonas de interés

Monitoreo: el objetivo de las inspecciones y el monitoreo es detectar los eventos críticos que son de interés para la ingeniería del ducto, su integridad y operación segura, así como los eventos menores que pueden ser sentidos por la comunidad en general.

En este sentido, son de interés análisis de la necesidad de implementar refugios o rutas de evacuación en caso de flujos piroclásticos por proximidad de alguna facilidad a la trayectoria de estos, la verificación de la capacidad de las estructuras para soportar la carga de cenizas (aplica para facilidades y cruces aéreos), instalación de los ductos a una profundidad mayor que la de la socavación producida por el paso de lahares o flujos de lava.

En el Anexo 3.2. se presentan criterios para el análisis de la amenaza de actividad volcánica.

Ejemplos:



Fuente: EPPETROECUADOR (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.48 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002



Fuente: EPPETROECUADOR (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.49 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002



Fuente: EPPETROECUADOR (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.50 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002



Fuente: EPPETROECUADOR (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.51 Efecto de la actividad volcánica sobre un DDV – Volcán Reventador. Ecuador, 2002

3.5. Meteorológicas

3.5.1. Descargas eléctricas/rayos

Concepto: descarga natural de electricidad estática, de gran magnitud, producida durante una tormenta eléctrica con la capacidad de generación de un pulso electromagnético.

Tiempo de ocurrencia: desde segundos hasta horas.

Causas: son debidas a la acumulación de cargas estáticas significativas de corriente generada en la atmósfera. Puede darse a partir de diversos fenómenos asociados al rayo y a la tormenta. Otras causas que producen electricidad en la atmósfera son la evaporación desde la superficie de la tierra, los cambios químicos que tienen lugar sobre la superficie de la tierra, así como la expansión, la condensación y la variación de la temperatura relacionada con la humedad de la atmósfera. Usualmente se presentan en condiciones de tormentas, sin embargo, las descargas eléctricas pueden ocurrir en condiciones de cielos despejados.

Efecto en ductos: los efectos de la caída de un rayo, directa e indirectamente, originan cargas estáticas y diferencial de potenciales que pueden ocasionar daño a las personas (incluso la muerte) que están expuestas al contacto, generación de puntos calientes debido a las cargas estáticas, y problemas en los equipos de comunicaciones y de protección catódica en el caso de no contar con protectores de corriente, tensión y voltaje.



Acciones de mitigación: programación adecuada de actividades sobre el DDV, acordes a los pronósticos meteorológicos, puesta a tierra de equipos susceptibles, mantenimiento adecuado de equipos de protección catódica.

Monitoreo: consiste en medir las condiciones ambientales y climáticas de un lugar específico. En el caso de descargas eléctricas, al estar asociadas en su gran mayoría a tormentas eléctricas, el monitoreo de variables atmosféricas vía satélite es una de las herramientas más usadas para este propósito. La medición más precisa requiere la determinación del campo eléctrico en la atmósfera, el cual -en condiciones de atmósfera normal y cielo despejado- se encuentra entre 0 y 200 mV. Durante la tormenta, el campo eléctrico se carga debido a la acumulación de energía por fricción en la atmósfera, y al llegar a niveles superiores a +/- 2.000 mV el potencial de presentarse la tormenta es alto. Para la medición del campo eléctrico se utilizan medidores de potencial que se instalan en tierra en arreglo triangular (para poder determinar la distancia y dirección de la tormenta y evaluar si esta se acerca o se aleja del punto de monitoreo). Esta red de monitoreo provee información que permite evaluar la potencialidad de ocurrencia de tormentas eléctricas, pero no predice la ocurrencia del rayo. En campo, durante la ejecución de labores al aire libre, se utilizan monitores portátiles para la detección de tormentas, los cuales, -unidos a la red fija- permiten realizar labores seguras ante este meteoro (ver Figura 3.52).

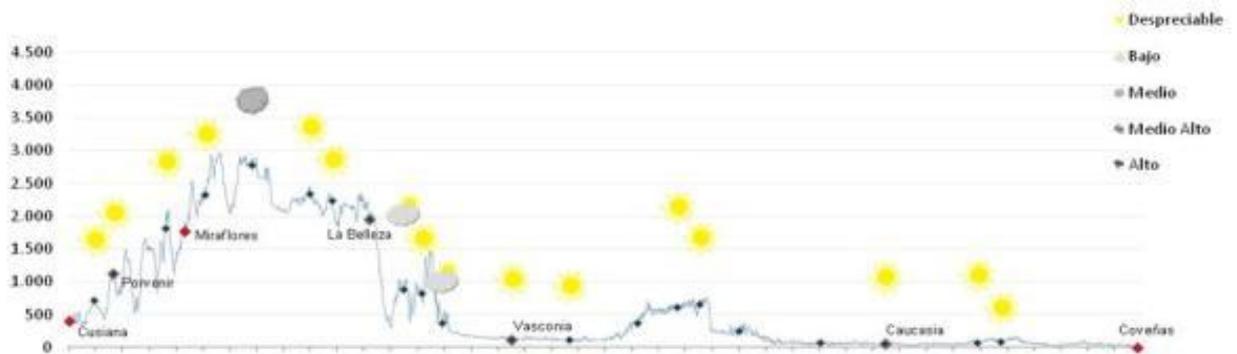


Fuente: <http://www.ubergizmo.com/2007/07/thunderstorm-detector-for-your-home>.

Figura 3.52 Detector portátil de descargas eléctricas



Ejemplo:



Fuente: OCENSA (2014). Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.

Figura 3.53 Ejemplo de pronóstico meteorológico de un STD

3.5.2.Lluvias torrenciales

Las lluvias torrenciales, pueden ser motivo de eventos no habituales en las zonas donde no es común que este fenómeno meteorológico ocurra, pudiendo desencadenar uno o más de los siguientes eventos, todos los cuales inducen procesos de inestabilidad en las laderas:

- superar la capacidad de conducción de los cauces.
- ocasionar inundaciones, incrementando la socavación de los cauces.
- saturar las capas superficiales de las laderas.
- generar deslaves.
- incrementar los niveles de agua en el subsuelo, con la consecuente pérdida de resistencia al corte de los materiales térreos que inducen procesos de inestabilidad en las laderas.

Para interpretar este fenómeno se debe tener en cuenta la siguiente clasificación, a modo de ejemplo para el caso de España:

| Clase | Intensidad media en una hora (mm/h) |
|--------------|-------------------------------------|
| Débiles | ≤ 2 |
| Moderadas | $> 2 \text{ y } \leq 15$ |
| Fuertes | $>15 \text{ y } \leq 30$ |
| Muy fuertes | $>30 \text{ y } \leq 60$ |
| Torrenciales | >60 |

Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). España.

Tabla 3.5 Clasificación de la precipitación según la intensidad

Como se puede apreciar en la Tabla 3.5, las precipitaciones deben superar los 60 mm/h para considerarse torrenciales. Pero la cantidad de agua caída per se, no es factor desencadenante de un fenómeno geotécnico, sino que está asociada directamente a:

- Tipo de suelo.



- Recurrencia del evento meteorológico.
- Topografía.
- Hidrografía.

Es claramente entendible que en suelo rocosos, por más fuerte que sea la precipitación, esta tardará muchos años en generar un cambio significativo en la morfología del lugar. Lo contrario ocurre en zonas de suelos poco cohesivos, donde una lluvia torrencial puede ocasionar algunos de los fenómenos descriptos en el primer listado de este apartado.

Como los ductos usualmente evitan las zona rocosas por las dificultades lógicas que ello implica, se tiene que -por lo general- las lluvias torrenciales tienen algún tipo de efecto en los ductos. Al mismo tiempo, y debido al cambio climático, existen zonas donde estos fenómenos meteorológicos no eran un problema en el momento en que se realizó la locación del ducto, y hoy sí lo son.

Ante estas dificultades, el monitoreo constante y tener un plan de contingencia adecuado, son las medidas más recomendadas para tratar estas situaciones.

3.5.2.1. Ejemplo de situación creada por lluvia torrencial

El ejemplo presentado se refiere a un camino interno a un predio en el campo, en la provincia de Córdoba, Argentina. Las lluvias inusuales socavaron el terreno dejando el ducto -que tenía 60 cm de tapada- expuesto. El suelo es de tipo arcillo-limoso.



Fuente: YPF.

Figura 3.54 Camino erosionado por lluvia torrencial



Fuente: YPF.

Figura 3.55 Desmoronamiento por lluvia torrencial

3.5.3. Huracanes o tornados

Son de los fenómenos meteorológicos más devastadores ya que pueden destruir grandes superficies y territorios alcanzando velocidades superiores a los 250 km/h. Las causas de los huracanes son muy variadas y de procedencia distinta. Existen numerosos factores que influyen en la aparición de los huracanes, desde los fenómenos meteorológicos, pasando por las regiones en las que se originan, hasta la propia estructura del huracán.

Los huracanes comienzan como perturbaciones tropicales en aguas oceánicas cálidas con temperaturas superficiales de al menos 80° Fahrenheit (26,5° Celsius). Estos sistemas de baja presión se alimentan de la energía de los mares cálidos.

También pueden recibir nombres distintos atendiendo a la velocidad a la que se producen:

- **Depresión tropical:** vientos cuya velocidad máxima al nivel del mar es inferior o igual a 62 km/h.
- **Tormenta tropical:** ciclón tropical de núcleo caliente, cuyo viento máximo al nivel del mar oscila entre 63 y 117 km/h.
- **Huracán:** ciclón tropical de núcleo caliente cuya velocidad media al nivel del mar puede ser 118 km/h o superior, dependiendo de la categoría del huracán.



Fuente: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/desastres-naturales/hurricane-profile>

Figura 3.56 Huracán

Existe una serie de causas y disposiciones favorables para que se produzcan los huracanes. Así, en aguas cálidas del trópico suelen formarse sistemas de baja presión y ondas tropicales. Se puede decir que existen 5 factores fundamentales que deben estar presentes para que ocurra un huracán:

- **Disturbio atmosférico** preexistente en el que se incluyan tormentas.
- **Temperaturas oceánicas cálidas**, de al menos 26°C, desde la superficie del mar hasta 15 metros por debajo de ésta. A esa temperatura, el agua del océano se evapora a una velocidad suficiente como para que se forme el huracán. Este proceso de evaporación, y la condensación eventual del vapor de agua en forma de nubes, libera la energía que da la fuerza al sistema tormentoso para generar vientos fuertes y lluvia.
- **Viento**: vientos débiles en los niveles altos de la atmósfera, que no cambien mucho su dirección y velocidad. La presencia de viento cálido cerca de la superficie del mar permite que haya mucha evaporación y que comience a ascender sin grandes contratiempos, originándose una presión negativa que arrastra al aire en forma de espiral hacia adentro y arriba, permitiendo que continúe el proceso de evaporación. En los niveles altos de la atmósfera los vientos deben ser débiles para que la estructura se mantenga intacta y no se interrumpa este ciclo.
- **El giro**: la rotación de la tierra eventualmente le da movimiento en forma circular a este sistema que comienza a girar y desplazarse como un gigantesco trompo. Este giro se realiza en sentido anti-horario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur.
- **Humedad**: el huracán necesita la energía de evaporación como combustible, y para ello tiene que haber mucha humedad. La humedad se da con mayor facilidad sobre el mar, de modo que su avance e incremento en energía ocurre allí más fácilmente, debilitándose en cambio al llegar a tierra firme.

Los huracanes son motores enormes de calor que generan energía a una escala asombrosa. Estos extraen el calor del aire oceánico cálido y húmedo y lo liberan, por condensación del vapor, como tormentas. Los huracanes giran en torno a un centro de baja presión conocido como el "ojo". El aire descendiente



calma notoriamente éste área de 20 a 30 millas (32 a 48 km). Pero el ojo está rodeado por una pared circular, "pared del ojo", que aloja los vientos y lluvias más intensos de la tormenta.

Estas tormentas conllevan varias formas de destrucción en tierra. Cuando un huracán toca tierra, a menudo produce una marejada devastadora que puede alcanzar 20 pies (6 m) de altura y extenderse alrededor de 100 millas (161 km). En un huracán, los vientos también son destructivos y pueden generar tornados. Las lluvias torrenciales causan daños adicionales por inundaciones y deslizamientos de tierra, que pueden ocurrir a muchos kilómetros tierra adentro. Los huracanes también tienen la energía suficiente como para afectar la infraestructura asociada a los ductos de transporte de hidrocarburos, incluso a los ductos mismos. Esto es potencialmente peligroso en los casos en que los ductos son aéreos, no así en los casos en que se encuentran soterrados. Aún así, al generar fenómenos asociados como lluvias e inundaciones, los huracanes pueden afectar la integridad del ducto en forma indirecta, desplazando volúmenes de suelo aledaños al mismo, o afectando a todo tipo de instalación aérea como ser, estaciones de bombeo, o derribando líneas eléctricas que alimentan a las válvulas de bloqueo y a los equipos rectificadores de protección catódica.

La mejor defensa contra un huracán es un pronóstico exacto que dé tiempo a la población para salir de su camino⁵¹. Asimismo, al ser un fenómeno en ocasiones predecible, pero de ninguna manera controlable, la mejor protección que se le puede dar al ducto y sus instalaciones complementarias ante ellos es tener un plan de contingencia adecuado e implementado para actuar lo más rápidamente posible ante los daños que pudiesen ocasionar.

En el Anexo 3.1 "Principales geoamenazas con potencial afectación a STD" que se incluye a continuación se resumen los aspectos de tipo, ocurrencia, efecto en ductos, mitigación y monitoreo de los diferentes tipos de geoamenazas descritas en este capítulo.

En el Anexo 3.2 se presentan los criterios para la Evaluación de la Amenaza de Erupciones Volcánicas.

⁵¹ <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/desastres-naturales/hurricane-profile>.



ANEXO 3.1 PRINCIPALES GEOAMENAZAS CON POTENCIAL AFECTACIÓN A STD

GEOAMENAZAS - GEOTÉCNICAS

| | TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|----------------|----------------|--------------------|------------------------------|--|--|--------------------------------------|
| Deslizamientos | Rotacionales | De segundos a días | Lluvias | Exposición | Descarga, terráceo y redistribución de masas de suelo o roca | Instalación de inclinómetros |
| | Traslacionales | | Sismos | Levantamiento | Estructuras de contención (muros de gaviones o concreto, muros en tierra reforzada, secciones verticales artificiales, pantallas de concreto, de pilotes o con anclajes) | Instalación de piezómetros |
| | | | Meteorización | Deformaciones permanentes | Obras de sub-drenaje (filtros francés, sub-drenes, galerías de drenaje) | Instalación de galgas de deformación |
| | | | Cambio del uso del suelo | Torsiones en límites con los flancos del deslizamiento | Obras de drenaje superficial (canales, cortacorrientes, descoles, cunetas, trinchos terrazas estabilizadoras, revegetación, reforestación) | Monitoreo topográfico |
| | | | Fuerte pendiente de terrenos | Roturas | Obras en márgenes de cruces subfluviales o aéreos (diques, muros marginales de gaviones o bolsacreto, acorazamiento del fondo del lecho, check dams, entre otros). | Fibra óptica geotécnica |
| | | | | Ducto suspendido entre 2 puntos fijos | | Chimeneas fijas al ducto |
| | | | | Incremento de carga | | Inspecciones geotécnicas rutinarias |
| | | | | | | Recorridos aéreos |
| | | | | | | Imágenes satelitales |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|---------------------------------|---------------------|---|---|---|--|
| Reptación | De meses a años | <p>Cambios en la condición de saturación de los suelos (dependiendo de su tipo y la ocurrencia de los diferentes modos estacionales)</p> <p>Presencia de materiales expansivos</p> <p>Deforestación</p> <p>Intercalaciones de materiales en forma paralela, en el sentido de la pendiente del terreno</p> <p>Presencia de paleo cauces</p> | <p>Concentración de esfuerzos o deformaciones axiales o transversales (inclusive en tramos fuera del área con evidencia de reptación)</p> <p>Rotura</p> <p>Deformaciones permanentes</p> <p>Cambios en el eje del ducto</p> | <p>Disminución de tapada</p> <p>Cruce dirigido por el estrato competente</p> <p>Liberación de tensiones</p> <p>Cambio de ruta</p> <p>Instalación de manejo de agua superficial y sub-superficial</p> <p>Instalación de marcos H</p> <p>Eliminación de la interacción suelo-ducto mediante alcantarillas, poliestireno expandido u otro tipo de obras civiles que permiten aislar el ducto del suelo</p> | <p>Patrullaje y sobrevuelos del DDV</p> <p>Monitoreo meteorológico</p> <p>Monitoreo topográfico (del terreno y ducto)</p> <p>Correlación con registro de pasaje de herramienta inercial</p> |
| Expansión o propagación lateral | De segundos a meses | <p>Esfuerzos cíclicos asociados a sismos, en los que contribuyen la fragilidad de los materiales (relación de la resistencia pico con la resistencia al corte en estado de falla)</p> <p>La disposición de estratos rocosos con geometría definida y en el mismo sentido de la pendiente longitudinal del área afectada</p> <p>Los bloques se desplazan lateral y lentamente a favor de pendientes muy bajas. No son movimientos frecuentes y suelen ser bastante</p> | <p>Concentración de esfuerzos o deformaciones axiales o transversales</p> <p>Rotura</p> <p>Deformaciones permanentes</p> <p>Cambios en el eje del ducto</p> <p>Flotación</p> | <p>Disminución de tapada</p> <p>Liberación de tensiones</p> <p>Cambio de ruta</p> <p>Instalación de manejo de sub-drenaje</p> | <p>Patrullaje y sobrevuelos del DDV</p> <p>Monitoreo meteorológico</p> <p>Monitoreo topográfico</p> <p>Correlación con registro de pasaje de herramienta inercial</p> <p>Monitoreo por efecto co-sísmico</p> |



| | TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|--------|---|---------------------|---|---|---|--|
| Flujos | Detritos Suelo o tierra Lodo Avalanchas Lahares | De segundos a días | extensos y complejo de identificar | | | |
| | | | Eventos sísmicos Tremores Lluvias extraordinarias Deshielo Deforestación Cambio de uso del suelo Meteorización Fuertes pendientes de terreno adyacente o longitudinal al DDV Falla de masas acumuladas en áreas de volcanes Represamiento de afluentes y quebradas | Exposición del ducto Levantamiento del eje del ducto Deformaciones permanentes Torsiones en límites con los flancos del canal de transporte del cuerpo del flujo Roturas Suspensión o flotación del ducto Incremento de carga Oxidación y afectación por presencia de azufre (en el caso de lahares) | En la parte alta del flujo: distribución de cargas en zona de potencial deslizamiento, incremento de obras de drenaje y sub-drenaje, construcción de obras para el confinamiento del DDV, tales como; muros de gaviones, pilotaje, pantallas, evaluación de alternativas de nuevo eje del DDV, etc. En la parte media del flujo: profundización del ducto mediante cruces dirigidos, evaluación de alternativas de nuevo eje del DDV. En la parte baja del flujo: descarga del DDV, redistribución de cargas, obras de drenaje y subdrenaje, evaluación de alternativas de nuevo eje del DDV. | Instalación de instrumentación geotécnica como inclinómetros y piezómetros Monitoreo topográfico Fibra óptica geotécnica Chimeneas fijas al ducto Inspecciones geotécnicas rutinarias Recorridos aéreos Registro de actividad sísmica y volcánica Verificación de revestimiento de los ductos |
| Caídas | Rocas Suelos | De segundos a meses | Eventos sísmicos Geomorfología del talud | | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|------|------------|-----------------------------------|---------------------------|--|--|
| | | Pendiente del talud | Pérdida de tapada | | |
| | | Tipo de roca | Exposición de los ductos | Construcción de obras de control de erosión | Patrullaje |
| | | Rugosidad de la superficie | Suspensión | Construcción de obras de sub-drenaje | Sobrevuelo del DDV |
| | | Agrietamientos | Deformaciones permanentes | Confinamiento del DDV mediante obras de contención (pernos, anclajes, mallas ancladas, pantallas ancladas, muros de contención, sistemas de pilotaje, concreto lanzado, entre otros) | Monitoreo meteorológico |
| | | Fallas o discontinuidades | Sobrecarga en los ductos | Obras de retención y control de caídos (barreras artificiales o naturales, muros, bermas, trincheras) | Monitoreo topográfico |
| | | Lluvias extraordinarias | Impactos | Cubiertas de protección (falso túnel) | Correlación de pasaje herramienta inercial |
| | | Cambios bruscos de la temperatura | Taponamiento del DDV | Variante - cambio de ruta | Monitoreo del efecto co-sísmico |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|-------------------------------|---------------------|--|----------------------|---|------------|
| Volcamiento | | Variaciones de humedad | Abolladuras | Revegetación y reforestación | |
| | | Vientos extraordinarios | Aplastamientos | | |
| | | Aguas subterráneas | | | |
| | | Vibraciones por voladuras o detonaciones | | | |
| | De segundos a meses | Buzamiento | Pérdida de tapada | Construcción de obras de control de erosión | Patrullaje |
| | | Estratificación de discontinuidades | Exposición de ductos | Construcción de obras de sub-drenaje | |
| Tamaños de bloques inclinados | Suspensión | Confinamiento del DDV mediante obras de contención (pernos, anclajes, mallas ancladas, pantallas ancladas, muros de contención, sistemas de pilotaje, concreto lanzado, entre otros) | Sobrevuelo del DDV | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|-----------------------|------------------------|---|---|--|---|
| | | Morfología y rugosidad de la superficie | Sobrecarga de los ductos | Obras de retención y control de caídos (barreras artificiales o naturales, muros, bermas, trincheras). | Monitoreo metereológico |
| | | Agrietamientos | Impactos | Cubiertas de protección (falso túnel) | Monitoreo topográfico |
| | | Lluvias extraordinarias | Abolladuras | Variante - cambio de ruta | Correlación de pasaje herramienta inercial |
| | | Sismos | Aplastamientos | Revegetación y reforestación | Monitoreo del efecto co-sísmico |
| | | Vientos | Deformación permanente | | |
| Movimientos complejos | De segundos hasta años | Considera aspectos de varios tipos de los movimientos mencionadas anteriormente | Genera efectos de varios tipos de los movimientos mencionadas anteriormente | Puede considerar varios tipos de obras de mitigación de los movimientos mencionadas anteriormente | Puede considerar varios tipos de los monitoreos mencionadas anteriormente |



GEOAMENAZAS - HIDROTÉCNICAS

| TIPO | | OCURRENCIA | CAUSAS | EFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|------------|-------------------------|---|---|---|---|------------------------------|
| Socavación | De fondo De márgenes | De minutos a años | Lluvias intensas de corta duración | | | |
| | | | Periodos de lluvia prolongados | Exposición de ductos | | |
| | | | Fuerte pendiente longitudinal | Abolladuras, golpes al ducto | Determinación de caudales máximos extraordinarios en zonas del cruce | Verificaciones de topografía |
| | | | Amplia cuenca hidrográfica | Daños en revestimiento | Obras de acorazamiento de fondo mediante enrocados, gaviones, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto | Batimetría |
| | | | Localización inadecuada del ducto en la llanura de divagación | Desgaste mecánico | Profundizar el ducto. Bajado de cota. | Limnigráficas y de caudales |
| | | | Cruce del ducto en zona de curvas o meandros | Desplazamiento del eje de los ductos | Obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto, revestimiento de taludes en concreto, bolsacretos. | Recorridos aéreos |
| | | Cambios bruscos de dirección de cauces por confluencias | Rotura de ductos | Cruces aéreos con soportes en los extremos. | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|-------------------------------|-------------------|---|--------------------------------------|--|------------------------------|
| Curso de agua paralelo al DDV | De minutos a años | Angostamientos u obstrucciones | | | |
| | | Obras hidráulicas con sección mínima | | | |
| | | DDV al mismo nivel del cuerpo a agua y en su llanura de inundación | Exposición de los ductos | Determinación de caudales máximos extraordinarios en zonas del cruce | Verificaciones de topografía |
| | | Lluvias intensas | Abolladuras y golpes en el ducto | Obras de acorazamiento de fondo mediante enrocados, gaviones, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto. | Batimetría |
| | | Fuerte pendiente longitudinal de la corriente | Daños en revestimiento del ducto | Profundizar el ducto. Bajado de cota. | Limnigráficas y de caudales |
| | | Amplia cuenca hidrográfica | Desplazamiento del eje de los ductos | Obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto, bolsacretos, tablestacas. | Recorridos aéreos |
| | | Localización inadecuada del ducto en la llanura de divagación del río | | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFEECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO | |
|--|------------------------------------|---|---|--|---|------------------------------|
| Inundaciones | | Meandros o ríos emplazados | Rotura de ductos | Estudios de posible redireccionamiento en el río | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales | |
| | | Obras hidráulicas con sección mínima | | | | |
| | De minutos a horas | Lluvias intensas de corta duración | Exposición de ductos | Daño en revestimiento | Estudios de determinación de zonas adyacentes al DDV, mediante modelos de elevación digital | Verificaciones de topografía |
| | | Fuerte pendiente longitudinal de la corriente previo a depresión topográfica | | | | |
| | | Amplia cuenca hidrográfica | | | | |
| | | Localización inadecuada del ducto en el ancho histórico de divagación lateral del río | | | | |
| Represamiento de corrientes de agua paralelos al DDV | Desplazamiento en el eje del ducto | Implementación de planes integrales de manejo de la cuenca | Aforos de caudales (levantamientos limnigráficos) | | | |
| Obras hidráulicas con sección mínima | Abolladuras y golpes en el ducto | Obras de acorazamiento de fondo mediante enrocados, gaviones, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto. | Recorridos aéreos | | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO | | | |
|-------------------------------|--------------------|---|---|--|--|----------------------------------|---|-----------------------------|
| Abandono del cauce (avulsión) | | Zonas de baja pendiente como ciénagas | Rotura de ductos | Obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes con concreto, bolsacretos | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales | | | |
| | | Cambio de patrones de uso del suelo asociados al cambio climático | | | | | | |
| | | Alto nivel freático | | | | | | |
| | De minutos a horas | Lluvias intensas de corta duración | Exposición de ductos sometiéndolos a la acción de sedimentos, bloques y rocas en tramos no protegidos | Estudios para determinar máximos anchos de divagación del cauce | Estudios hidrológicos de amplitud histórica del cauce | | | |
| | | Temporadas de lluvia extendidas | | | | | | |
| | | Represamiento aguas arriba del cruce | | | | Daño del revestimiento | Lastrado del ducto en toda la zona del cruce extendido | Batimetría |
| | | Acción antrópica | | | | Abolladuras y golpes en el ducto | Cruce subfluvial dirigido | Verificaciones topográficas |
| | | | | | | | Obras de acorazamiento de fondo mediante enrocados, gaviones, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto. | Recorridos aéreos |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|-----------------------|--------------------|---|---|---|--|
| Avenidas torrenciales | De minutos a horas | Cambio de pendiente del cauce | Rotura de ductos | Obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes de concreto, bolsacretos | <p>Patrullajes</p> <p>Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales</p> |
| | | Lluvias intensas | Exposición de ductos sometiéndolos a la acción de sedimentos, bloques y rocas en tramos no protegidos | Obras de acorazamiento de fondo mediante enrocados, gaviones, sedimentadores, revestimiento de ductos con concreto. | Estudios Hidrológicos de crecientes y capacidad de socavación |
| | | Corrientes de agua de alta pendiente | Daño del revestimiento | Obras de protección de márgenes: diques, enrocados laterales, muros de gaviones marginales, revestimiento de taludes de concreto, bolsacretos | Estudios de características del material del lecho del río |
| | | Cambio del uso del suelo | Abolladuras y golpes en el ducto | Profundizar el ducto. Bajado de cota | Sensores de monitoreo de nivel del río |
| | | Cuencas con gradientes altos y áreas medias | Rotura de ductos | | <p>Batimetría</p> <p>Monitoreo de tapada del ducto</p> <p>Patrullajes</p> |



GEOAMENAZAS - EROSIÓN

| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|---|--------------------|--------------------------------------|---|--|---|
| Surcos y zanjas | De minutos a meses | Mala recomposición del DDV | Pérdida de tapada | | |
| | | Desforestación | Desforestación | Reconformación del DDV | |
| | | Lluvias | Transporte de sedimentos a fuentes hídricas | Reforestación y cobertura vegetal | Patrullaje |
| | | Falta de cobertura vegetal | Formación de cárcavas | Obras de control de erosión superficial (cortacorrientes, canales) | Sobrevuelos |
| | | Huellas de caminos sobre el DDV | Movimientos de remoción en masa | En zonas donde se realiza la cobertura vegetal colocar biomantos | Análisis de fotografías satelitales multitemporales |
| | | Paso continuo de animales por el DDV | Destape del ducto | | |
| Suelos susceptibles (ej. suelos arenosos y limo-arenosos) | | | | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|----------|--------------------|--|---|---|---|
| Cárcavas | De minutos a meses | Mala recomposición del DDV | | Redireccionamiento de flujos de escorrentía | |
| | | Deforestación | Pérdida de tapada | Reconformación de cárcavas y de la zona | |
| | | Lluvias | Deforestación | Reforestación y cobertura vegetal | Patrullaje |
| | | Falta de cobertura vegetal | Transporte de sedimentos a fuentes hídricas | Obras de control de erosión superficial (cortacorrientes, canales) | Sobrevuelos |
| | | Huellas de caminos sobre el DDV | Movimientos de remoción en masa | En zonas donde se realiza la cobertura vegetal colocar biomantos | Análisis de fotografías satelitales multitemporales |
| | | Fuerte pendiente del DDV o taludes adyacentes | Destape del ducto | Construcción de diques en la zona de cárcava para su reconformación | |
| | | Diseño inadecuado de descoles de canales o cortacorrientes | | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|--|--------------------|----------------------------|---|--|---|
| Pérdida de cobertura vegetal y nivel de tapada | De minutos a meses | Mala recomposición del DDV | Generación de erosión concentrada | | |
| | | Deforestación | Pérdida de tapada | Reconformación del DDV y zonas adyacentes afectadas | |
| | | Lluvias | Deforestación | Mejoramiento de la fertilidad del suelo | Patrullaje |
| | | Falta de cobertura vegetal | Transporte de sedimentos a fuentes hídricas | Reforestación y cobertura vegetal | Sobrevuelos |
| | | Suelos poco fértiles | Movimientos de remoción en masa | Obras de control de erosión superficial (Cortacorrientes, canales) | Análisis de fotografías satelitales multitemporales |
| | | Incendios | Destape del ducto | En zonas donde se realiza la cobertura vegetal colocar biomantos | |
| | | Intervención de terceros | | | |
| Eólica | De minutos a horas | Velocidad del viento | | Estudios de determinación de velocidad y dirección del viento | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO | |
|------|------------|--|--|--|---|-------------------------|
| | | Dirección del viento | Exposición de los ductos | Determinación de tipo de dunas sobre el DDV | Monitoreo de tapada mediante colocación de marcadores de tapada | |
| | | Tamaño de partículas del suelo | Daño de revestimiento producto de la abrasión | Levantamientos de tapada | Recorridos aéreos | |
| | | Existencia de dunas migrantes | Desplazamiento del eje del ducto | Protección de los ductos mediante muros de saco suelo paralelos al eje de los ductos | Patrullajes | |
| | | Humedad del suelo y del medio | | Reconformación de dunas | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales | |
| | | Cambio de formas de las dunas por acción antrópica | | | | |
| | Por oleaje | De minutos a días | DDV sobre un abanico de sedimentación cercano al mar | Pérdida de tapada | Pronósticos de oleajes | Patrullaje |
| | | | Fuertes vientos sobre corrientes de agua u océano | Exposición del ducto | Reconformación del DDV | Sobrevuelos del DDV |
| | | | Oleaje anómalo | Desplazamiento del eje del ducto | Construcción de espolones | Monitoreo metereológico |
| | | | | | | |
| | | | | | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|---|--------------------------------|---|---|---|-----------------------|
| Erosión Interna (Piping) | De días a meses | Tsunami | | <p>Construcción de enrocados</p> <p>Protecciones con bolsacretos o colchacretos</p> | Monitoreo topográfico |
| | | Deficiente recomposición y compactación de la zanja de los ductos | | | |
| | | Agrietamientos por cambios de humedad | Pérdida de tapada | | |
| | | Falta de cobertura vegetal | Generación de cárcavas internas | Adición de barreras en zanja | |
| | | Existencia de capas impermeables dentro del perfil del suelo | Transporte de sedimentos a fuentes hídricas | Reconformación de la zona de la zanja y del DDV | Patrullaje |
| Gradientes hidráulicos internos muy altos | Saturación de los suelos | Reforestación y cobertura vegetal | Sobrevuelos | | |
| Existencia de fracturas de neotectónica o estructuras heredadas en suelo residual | Exposición y destape del ducto | Obras de drenaje subsuperficial en la zanja y el DDV | Monitoreo metereológico | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO | |
|---------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--|---|--|
| Asentamientos | | Insuficiencia de barreras en zanja | Pérdida de cimentación del ducto | Adecuada compactación de materiales en la zanja | | |
| | | Suelos susceptibles (ej. arenas) | Daños en el revestimiento del ducto | Mejoramiento del suelo con aditivos (ej. cal, cemento) | | |
| | | Falta de obras de drenaje subsuperficial | | | | |
| | De días a años | Dispersibilidad o solubilidad del suelo | | | | |
| | | Presencia de suelos arenosos o suelos arcillosos no saturados | | | Extracción del material del área del asentamiento | |
| | | Desplazamiento de partículas del suelo desde zonas más cargadas hacia las menos cargadas | Carga sobre el eje del ducto | Reconformación del DDV en la zonas del asentamiento | Monitoreo metereológico | |
| | Materiales con alto grado de humedad | Generación de cárcavas | Adición de barreras en zanja | Recorridos aéreos | | |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|------|------------|---|----------------------------------|--|-------------|
| | | Zonas con procesos de reptación Estratificación con capas de diferente permeabilidad | Desplazamiento del eje del ducto | Obras de control de erosión superficial (cortacorrientes, canales) Obras de control de flujos sub-superficiales | Patrullajes |



GEOAMENZAS - Actividad Sísmica: Tectónica / Volcánica

| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|-----------------------------|--------------------|--|------------------------------------|--|--|
| Efecto de fallas geológicas | De segundos a días | Sismos | | | |
| | | Existencia de fallas geológicas activas | | Colocar el oducto aéreo en la zona de falla: sobre un terraplén con baja resistencia al corte | Monitoreos topográficos |
| | | Profundidad de enterrado del ducto | Exposición del ducto | Colocar el ducto sobre elementos de soporte deslizante Colocar el ducto en zanjas de tamaño mayor, rodeado de material desmoronable de baja resistencia o un relleno seleccionado | Recorridos aéreos |
| | | Configuración de la zanja | Daño en el revestimiento del ducto | Encamisar el ducto dentro de tubos de alcantarilla u otros conductos de mayor tamaño | Patrullaje |
| | | Magnitud relativo de movimiento de la falla | Desplazamiento del eje del ducto | En el cruce de una falla de rumbo el ducto debe orientarse de tal manera que quede sometido predominantemente a tracción | Colocación y monitoreo de strain gages |
| | | Ángulo entre el tubo y la falla en el sitio donde la cruza | Deformaciones permanentes | En fallas inversas se debe interceptarse con ángulo oblicuo tan pequeño como sea posible con el fin de minimizar deformaciones de compresión | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales |
| | | Propiedades del suelo donde se encuentra la falla | Rotura | Los ductos en fallas geológicas deben dejarse preferiblemente en tramos rectos | Análisis e inspecciones post-sismo |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO | |
|--------------------------|-----------------------|---|----------------------------------|--|---|--|
| Licuación o Licuefacción | | Longitud efectiva del ducto no anclado | | La profundidad de tapada debe ser mínima en las zonas de falla, para mejorar la capacidad del ducto a desplazamiento en la zanja | Elaboración de estudios de amenaza sísmica | |
| | | Propiedades del material del ducto | | Reducción del ángulo de fricción entre el tubo y el suelo que lo rodea | Instrumentación con sismógrafos y acelerómetros | |
| | | Geometría del alineamiento del ducto | | Colocar revestimiento del ducto duro y liso, pueden ser revestimientos epóxicos en la vecindad del cruce de la falla | | |
| | | Presión interna del ducto | | | | |
| | De segundos a minutos | Efecto de ocurrencia ante sismos/terremotos | Exposición del ducto | | Estudios geológicos que permitan identificar zonas con potencial efecto de licuación | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales |
| | | | Deformaciones permanentes | | Cruces dirigidos en suelos susceptibles | Recorridos aéreos |
| | | | Desplazamiento del eje del ducto | | En sitios susceptibles evitar instalación de puntos fijos como válvulas | Patrullajes e inspecciones post-sismo/terremoto |
| | | | Rotura de ducto | | Cambiar de granulometría uniforme del suelo a granulometría variable en zonas donde es susceptible a licuefacción | Estudios de amenaza sísmica y zonificación de áreas susceptibles |



| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFEECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|---------------------|-----------------------|--|---|---|---|
| Actividad volcánica | De segundos a minutos | Flujos piroclásticos: oleadas, flujos de pómes y ceniza, nubes ardientes | Falta de sustentación del ducto | Instalación de válvulas de bloqueo antes y después de las zonas susceptibles a rotura | Recorridos aéreos |
| | | Caídas de trefa: Ceniza, lapilli, bloques y bombas | Exposición del ducto | Estudios de los efectos causados por erupciones pasadas | Análisis de fotointerpretación y de imágenes satelitales |
| | | Avalanchas volcánicas | Deformaciones permanentes | Aplicación de modelos teóricos de los fenómenos | Obtención de información predictiva de las redes de observación geofísica |
| | | Colapso estructural | Desplazamiento del eje del ducto | Estudios geológicos en zonas de interés | Patrullajes e inspecciones post-erupciones |
| | | Deslizamientos | Desestabilización de los suelos por efectos erosivos | Construcción de variantes fuera de zonas susceptibles | Estudios de amenaza volcánica y zonificación de áreas susceptibles |
| | | Tsunamis | Rotura de ducto | En zonas donde pueden pasar lahares realizar cruces dirigidos | Instrumentación con sismógrafos y acelerómetros |
| | | Lahares | Daños en revestimiento por efecto de agentes químicos | Falta de sustentación del ducto | Cámaras de vigilancia |



GEOAMENZAS – METEOROLÓGICAS

| TIPO | OCURRENCIA | CAUSAS | EFFECTO EN DUCTOS | MITIGACIÓN | MONITOREO |
|------------------------------|---------------------|--|--|---|---|
| Descargas eléctricas - rayos | De segundos a horas | <p>Acumulación de cargas estáticas significativas de corriente generada en la atmósfera</p> <p>Evaporación desde la superficie de la tierra</p> <p>Cambios químicos en la superficie de la tierra</p> <p>Expansión, condensación y variación de temperatura relacionada con la humedad de la atmósfera</p> | <p>Generación de cargas estáticas generando puntos calientes</p> <p>Daño en equipos de comunicaciones</p> <p>Daño en los sistemas de protección catódica</p> | <p>Programación de actividades en el DDV. No hacer trabajos en tormentas eléctricas y fuertes lluvias</p> <p>Mantenimiento adecuado de los sistemas de protección catódica</p> <p>Instalación de pararrayos en platas e instalaciones de superficies y campamentos sobre el DDV</p> | <p>Recorridos aéreos - post-tormentas eléctricas</p> <p>Análisis de predicciones meteorológicas</p> <p>Obtención de información predictiva de las redes de observación geofísica</p> <p>Patrullajes e inspecciones post-tormentas eléctricas</p> <p>Durante la ejecución de labores al aire libre utilizar monitores portátiles para detección de tormentas que unidos a la red fija permiten realizar labores seguras ante este fenómeno</p> |

Tabla 3.6 Principales geoamenazas con potencial afectación a STD



ANEXO 3.2 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR ERUPCIONES VOLCÁNICAS⁵²

Se define la amenaza volcánica A_v , mediante la siguiente expresión:

$$A_v : f (I \times P)$$

Donde:

- I:** Intensidad, magnitud o volumen, duración del evento, alcance, extensión, velocidad, temperatura.
- P:** Probabilidad de ocurrencia de un determinado tipo de proceso eruptivo en un intervalo de tiempo dado.

La amenaza volcánica es la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico de una determinada intensidad, alcance o distribución, en un tiempo y área determinada.

Evaluación de la amenaza volcánica:

- **A mediano y largo plazo**, qué implica la identificación, evaluación, cartografía y zonificación de la amenaza volcánica, en función de su probabilidad e intensidad.
- **A corto plazo**, estudios referidos al monitoreo volcánico y a la preparación para enfrentar un posible proceso eruptivo.

La base para la evaluación de la amenaza de un volcán es la reconstrucción de las erupciones históricas y las prehistóricas, la geología y estratigrafía del área, por tanto la disponibilidad de información geológica abundante es fundamental para llevar a cabo una evaluación de amenazas y poder construir los mapas de amenaza correspondiente.

Intensidad del evento

Cada uno de los parámetros físicos influencia la capacidad del fenómeno de producir daño, por ejemplo, las variables que determinan la extensión de un flujo de lava, de una corriente de densidad piroclástica o de un lahar son: volumen, movilidad, velocidad y transformaciones del flujo; mientras que, para las caídas de tefra, la intensidad se basa en la magnitud en función del volumen total de tefra caída, o en la relación *espesor versus distancia* del centro de emisión, lo cual puede ser conocido de anteriores caídas de tefra y de los modelos regionales de circulación de los vientos. Otros autores han definido zonas circulares a varias distancias y han identificado los sectores hacia los cuales el viento sopla con mayor frecuencia.

En el caso de los flujos de lava, la intensidad se puede medir en función de los espesores de los flujos, la velocidad del movimiento y la extensión del área que cubren estos flujos. A manera de resumen se presentan en la tabla siguiente una serie de parámetros, para cada proceso eruptivo, y la intensidad que puede estar asociada a ellos:

⁵² Mapas de Amenazas por Erupción Volcánica, Recomendaciones Técnicas para su elaboración. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agosto de 2005.



| Proceso Eruptivo | INTENSIDAD | | | Índice de explosividad (VEI) |
|-------------------------|---|---|--|---------------------------------------|
| | Distancia del impacto (km desde el centro de emisión) | Volumen (m ³) | Espesor | |
| Flujos piroclásticos | < 10 Extremo 10-20 Alta > 10 Media | | | > 4 Alta 2 - 4 Media 0 - 2 Baja |
| Flujos de lava | < 10 Alta 10-30 Media > 30 Baja | | | |
| Gases | < 30 Alta 30-100 Media > 100 Baja | | | |
| Caídas de Tefra | < 30 Alta 30-100 Media > 100 Baja | > 10 ³ Alta 10 ⁶ – 10 ⁸ Media > 10 ⁶ Baja | > 1m Alta 0,3 - 1 m Media > 0,3 Baja | |
| Proyecciones balísticas | < 1 Alta 1-5 Media > 5 Baja | | | |

Fuente: Mapas de Amenazas por Erupción Volcánica, Recomendaciones Técnicas para su elaboración. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agosto 2005.

Tabla 3.7 Procesos eruptivos y su intensidad

Probabilidad del evento

Los eventos de carácter volcánico son sistemas complejos gobernados por procesos de difícil determinación, por lo que -para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica de características definidas- es importante realizar un análisis estadístico de los patrones históricos de actividad volcánica en el pasado. Una posible escala de frecuencia de ocurrencia, se puede resumir en el siguiente cuadro:

| Periodo | Frecuencia | Periodo de retorno |
|-----------------|------------|---------------------|
| Anual y Decenal | Alta | Tr ≤ 50 Años |
| Centenario | Media | 50 Años < Tr ≤ 200 |
| Centenario | Baja | 200 Años < Tr ≤ 500 |
| Milenio | Muy Baja | Tr ≥ 500 Años |

Fuente: Mapas de Amenazas por Erupción Volcánica, Recomendaciones Técnicas para su elaboración. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agosto 2005.

Tabla 3.8 Ejemplo de escala de frecuencia de ocurrencia



Probabilidad de alcance y distribución en un evento volcánico

De la misma manera que se puede estimar probabilísticamente la ocurrencia de un evento volcánico de una magnitud dada, también se puede estimar la probabilidad de que un determinado evento tenga una extensión o alcance determinado. Para dicha estimación, los rangos para la probabilidad de alcance máximo de los productos de un proceso eruptivo o la probabilidad de distribución espacial de los mismos, se pueden determinar con base en estudios de eventos históricos y extrapolaciones de probabilidad. Un ejemplo de este tipo de estimaciones se resume en el siguiente cuadro.

| Proceso Eruptivo | Alcance (km desde el centro de emisión) | Probabilidad del alcance | Distribución Espacial (Km) | Probabilidad de distribución espacial |
|-------------------------|---|--------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Flujos piroclásticos | < 10 | Muy Alta | Decenas | Alta |
| | 10-20 | Alta | Centenas | Media |
| | > 20 | Media | Miles | Baja |
| Flujos de lava | < 10 | Alta | Decenas | Alta |
| | 10-30 | Media | Centenas | Media |
| | > 30 | Baja | Miles | Baja |
| Gases | < 30 | Alta | Decenas | Alta |
| | 30-100 | Media | Centenas | Media |
| | > 100 | Baja | Miles | Baja |
| Caídas de Tefra | < 30 | Alta | Decenas | Alta |
| | 30-100 | Media | Centenas | Media |
| | > 100 | Baja | Miles | Baja |
| Proyecciones balísticas | < 1 | Alta | Decenas (m) | Alta |
| | 1-5 | Media | Centenas | Media |
| | > 5 | Baja | Miles | Baja |

Fuente: Mapas de Amenazas por Erupción Volcánica, Recomendaciones Técnicas para su elaboración. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agosto 2005.

Tabla 3.9 Ejemplo de análisis de eventos históricos



Determinación de los niveles de amenaza por erupción volcánica

Conforme a lo descrito anteriormente, para una primera aproximación de los rangos o niveles para los mapas de amenazas, se pueden relacionar la frecuencia y la intensidad de la siguiente manera:

| | | | | | |
|-------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Intensidad | Extrema | | | | |
| | Alta | | | | |
| | Media | | | | |
| | Baja | | | | |
| Leyenda: | | Alta | Media | Baja | Muy Baja |
| Amenaza Extrema |  | Al menos un evento en 50 años o + | Al menos un evento en 100 años | Al menos un evento en 500 años | Al menos un evento en 1.000 años |
| Amenaza Alta |  | Tr < 50 años | 50 > Tr < 200 | 200 > Tr < 500 | Tr > 500 años |
| Amenaza Media |  | Frecuencia / Tr | | | |
| Amenaza Baja |  | | | | |

Fuente: Mapas de Amenazas por Erupción Volcánica, Recomendaciones Técnicas para su elaboración. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agosto de 2005.

Tabla 3.10 Ejemplo de relación Frecuencia - Intensidad

Ejemplos

El caso que aparece como más crítico es el de Ecuador, ya que tanto el oleoducto como el poliducto, pueden verse afectados en varios tramos porque ambos cruzan las zonas de alta amenaza del volcán Reventador y del Guagua Pichincha, así como por la zona de lahares provenientes del Cotopaxi, que llegarían hasta la provincia costera de Esmeraldas.

Le sigue en importancia el caso de Colombia, donde algunos tramos de gasoductos y poliductos cruzan por zona de influencia de los volcanes Nevado del Ruiz y Cerro Bravo.



Fuente: Proyecto Prevención de riesgos asociados con la erupción del Volcán Cotopaxi, PREVOLCO. Adaptación con georeferenciación, EP PETROECUADOR.

Figura 3.57 Estimación de la afectación del oleoducto y tiempo de llegada de flujos. Volcán Cotopaxi, Ecuador.



4. SUPERVISIÓN E INSPECCIONES DEL DDV

Las inspecciones del DDV se realizan periódicamente con el propósito de determinar y localizar eventos geotécnicos existentes en la superficie del terreno y sus zonas adyacentes, que puedan ocasionar daños significativos al ducto: nuevas construcciones de caminos; zanjas; cunetas; evidencias de derrames en la superficie; e invasiones al DDV. Todas las geoamenazas y novedades que se detecten en los recorridos del DDV deben ser evaluadas y corregidas, de ser el caso, a la brevedad posible, ya que también pueden afectar la integridad de las líneas de transporte.

El monitoreo de la superficie del terreno abarca una gran cantidad de técnicas que buscan identificar oportunamente cualquier amenaza a la integridad de las líneas de transporte. En el desarrollo de esta guía, se incluye en este capítulo el detalle de las inspecciones visuales (patrullajes o recorridos a cadena pisada) independiente de la forma de ejecución, y se deja para el siguiente capítulo (Capítulo 5) una serie de técnicas de monitoreo convencional en algunos casos con instrumentos de medición, que buscan cuantificar oportunamente cualquier amenaza a la integridad de las líneas de transporte.

Para clasificar las secciones del DDV regular de un ducto se pueden establecer tres categorías o clases del mismo, sin importar su ubicación geográfica. La base de esta categorización la constituye el nivel de complejidad para establecer una frecuencia adecuada de inspección de rutina y evaluación periódica de ingeniería, además de un programa de mantenimiento adecuado del DDV.⁵³

Los aspectos que son tomados en cuenta para establecer la categorización para las secciones del DDV regular de un ducto son:

- Morfología del terreno.
- Características de los suelos.
- Patrones de drenaje.
- Accesibilidad al DDV.
- Condiciones de inestabilidad.
- Cobertura vegetal.
- Trabajos de restauración final en el DDV (características y efectividad).
- Condiciones climáticas.
- Información geotécnica y de estabilidad del terreno durante la construcción; historial de eventos naturales que han tenido un impacto significativo en el área.
- Interacción con la infraestructura existente; y actividades de terceros.
- Consecuencias de daños ocurridos en el ducto y en el área adyacente al DDV.

Considerando lo anterior, se pueden definir las categorías de secciones en el DDV regular de un ducto, con su frecuencia de inspección correspondiente, según se detalla a continuación:

- **Nivel 1:** secciones del DDV regular del ducto que requieran, debido a sus características específicas, niveles bajos de inspección periódica de rutina, evaluación de ingeniería y trabajos de mantenimiento. Las secciones del DDV correspondientes a este nivel 1, deben ser inspeccionadas

⁵³ Procedimiento: Inspección y Mantenimiento del DDV, OCP ECUADOR S.A., Documento No.OCPE-L-GP-20116



rutinariamente a intervalos que no excedan las tres semanas (21 días), pero no menos de veintiséis (26) veces en cada año calendario⁵⁴.

- **Nivel 2:** secciones del DDV regular del ducto que requieran, debido a sus características específicas, un nivel moderado de trabajos de inspección periódica de rutina, evaluación de ingeniería y trabajos de mantenimiento. Las secciones del DDV correspondientes a este nivel 2, deben ser inspeccionadas rutinariamente a intervalos que no excedan los catorce (14) días.
- **Nivel 3:** secciones del DDV regular del ducto que requieran, debido a sus características específicas, un nivel alto de inspección periódica de rutina, evaluación de ingeniería y trabajos de mantenimiento. Las secciones del DDV designadas como nivel 3 deben ser inspeccionadas rutinariamente a intervalos que no excedan los nueve (9) días.

Desde el inicio de operación de un ducto, se deben evaluar los requerimientos de inspección y mantenimiento del DDV y -con base en los resultados- se debe realizar la categorización correspondiente; si se registran cambios en la dinámica o importancia de los hallazgos, y cuando se detecten áreas sensibles, como amenazas naturales del ducto, se puede variar el nivel asignado al tramo. Es importante documentar y mantener un registro de la categorización realizada en todo el DDV del ducto.

La inspección general rutinaria del DDV se puede realizar mediante dos metodologías:

- a) Recorrido aéreo
- b) Recorrido terrestre

4.1. RECORRIDOS AÉREOS DE INSPECCIÓN

Este tipo de inspección se utiliza generalmente para localizar riesgos potenciales en zonas de difícil acceso, tales como áreas pantanosas o zonas de topografía accidentada, y para determinar la presencia de eventos geotécnicos específicos y probables amenazas que puedan afectar al DDV y al ducto.

Esta evaluación se realiza regularmente utilizando helicópteros o drones (aeronaves no tripuladas), y tiene la ventaja de que se cubren grandes distancias en un tiempo corto y permite obtener una visión regional de los problemas geotécnicos o hidrotécnicos existentes (en especial, movimientos de masas y procesos erosivos) y de las acciones humanas no autorizadas, como ser: labores de desmonte, quema de vegetación, explotación de minas y canteras, y ubicación de maquinaria pesada trabajando en las cercanías del DDV, que puedan afectar significativamente al ducto. Se pueden evidenciar además movimientos regionales de masa o amenazas que afecten al DDV, lo cual es más complicado de visualizar desde tierra.

4.1.1. Frecuencia de inspección aérea

La frecuencia de los recorridos aéreos utilizando helicópteros o drones se debe actualizar periódicamente dependiendo de las necesidades existentes (considerando el nivel de las secciones del DDV), al menos cada 90 días y, para la obtención de un registro en video del recorrido que se realice, cada 6 meses, en el cual se deben comentar las principales novedades de riesgo detectadas

⁵⁴ Code of Federal Regulations, DOT part 195.412 Inspection of rights-of-way and crossings under navigable waters.



que requieran acción inmediata⁵⁵. Esta frecuencia podría ser menor dependiendo de las políticas o procedimientos de cada operadora.

Se recomienda que el equipo de trabajo que realice la inspección aérea, esté constituido por:

- Un profesional especialista en geotecnia, geología e hidráulica fluvial y
- Un profesional o supervisor con experiencia certificada en las siguientes especialidades: control de erosión, estabilización de taludes, obras civiles, labores de trazado, construcción y mantenimiento de carreteras, obras de arte y construcción, obras de protección de riberas, trabajos de mantenimiento en DDV de oleoductos/poliductos/gasoductos, e integridad de ductos.

El equipo mínimo necesario para las inspecciones aéreas puede estar constituido por cámaras digitales, cámaras de video, GPS, laptop, mapas, etc.

Todas las observaciones y anomalías que se encuentren durante la inspección aérea se deben registrar en los reportes de resultados correspondientes (Reporte de Resultados – Recorrido Aéreo), recomendando las acciones y medidas de corrección necesarias para su análisis e implementación correspondiente.



Fuente: Oleoducto Ocesa en el sector de Casanare, Colombia,

Figura 4.1 Deslizamiento identificado en recorrido aéreo

En el reporte de resultados se debe incluir la siguiente información:

- Información general (descripción del recorrido cumplido, fecha de inspección, tramos o ductos evaluados, etc.).
- Equipo, personal y medio utilizado.
- Condiciones de la inspección.

⁵⁵ Adaptación de Norma PEMEX: Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos. NRF-030-PEMEX-2009.



- Croquis.
- Tipo de hallazgo encontrado, grado de emergencia, investigación inmediata o de rutina.
- Recomendaciones técnicas (planes de acción requerida).

Los informes con el registro de datos y resultados deben ser entregados al personal responsable del mantenimiento de ducto involucrado, junto con las fotografías y esquemas y de ser el caso, con los videos y recomendaciones aplicables. Se recomienda tomar las fotografías con cámaras que dispongan de GPS o enlazadas a un navegador, de manera que luego se pueda observar la ruta y el sitio y dirección de las fotografías, lo cual facilita la identificación posterior.

Dado que desde el aire no se pueden medir con exactitud las dimensiones de un hallazgo o su distancia al DDV (deslizamientos, por ejemplo), se debe realizar una visita puntual de inspección por tierra a las principales novedades encontradas en el recorrido aéreo.

La priorización inicial sirve para jerarquizar los hallazgos y dar un tiempo establecido para la visita puntual. De esta manera, un hallazgo prioritario necesitaría una visita inmediata o una novedad de seguimiento de obras que se referencie simplemente para llevar el archivo histórico temporal. En el Anexo 4.1 se incluye un modelo de ejemplo de formato para inspecciones aéreas.

4.2. RECORRIDOS TERRESTRES DE INSPECCIÓN

Este tipo de inspección se debe realizar mediante el uso de vehículo y con recorridos paso a paso sobre la totalidad del DDV y para llegar a los sectores o zonas que serán inspeccionadas.

Este recorrido debe realizarse a lo largo del DDV y sus zonas vecinas, por personal de mantenimiento de línea (inspector del DDV con el apoyo de una cuadrilla) y -de requerirse- por profesionales especialistas. En este recorrido debe realizarse un reconocimiento a fondo y en detalle de los problemas que no se pueden ver desde el aire, y para dimensionar los que se detectaron en el recorrido aéreo. En esta inspección se deben localizar y evaluar los riesgos potenciales existentes en el DDV, incluyendo las zonas de difícil acceso, tales como áreas pantanosas o de topografía accidentada. Complementariamente, se pueden verificar todos los accesorios, válvulas y conexiones del ducto aprovechando dichos recorridos.

En el terreno, además de observar el estado del DDV, es recomendable observar el entorno, el estado de árboles, postes, cercas (verificar alineamiento y tensión en los alambres), piedras, edificaciones, para detectar evidencias de movimiento del terreno.

4.2.1. Frecuencia de inspección terrestre

Las condiciones de superficie del DDV y de aquellas áreas adyacentes designadas como de Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3, deberán ser inspeccionadas rutinariamente, a menos que sean casos emergentes, conforme a los intervalos establecidos inicialmente.

Se recomienda que la inspección terrestre rutinaria del DDV la realice un inspector de DDV con el apoyo de una cuadrilla, según las necesidades, y en caso de requerirse, inspecciones puntuales especializadas, con el siguiente personal técnico:



- Un profesional especialista en geotecnia, geología e hidráulica fluvial y
- Un profesional o supervisor con experiencia certificada en algunas de las siguientes especialidades: control de erosión, estabilización de taludes, obras civiles, labores de trazado, construcción y mantenimiento de carreteras, obras de arte y construcción, obras de protección de riberas, trabajos de mantenimiento en DDV de oleoductos/poliductos/gasoductos, e integridad de ductos.
- En DDV donde el ingreso es complejo (desiertos, zonas con altitud mayores a 4000 msnm, zonas de selva, etc.), se recomienda el acompañamiento de un enfermero y 2 ayudantes, como mínimo, en caso de considerarse necesario.
- En zonas que representen un peligro para la integridad física del personal, se puede solicitar el apoyo logístico de personal militar, cuya actuación deberá realizarse bajo las normativas de control y seguridad establecidas en el ámbito del ducto correspondiente.

La inspección general debe cubrir como mínimo lo siguiente:

- a) Estabilidad del ducto, del DDV y zonas adyacentes.
- b) Condición de puntos de apoyo y anclajes del ducto.
- c) Condición de cruces (aéreos, con ríos y sobre puentes, entre otros).
- d) Tramos aéreos o semi-enterrados.
- e) Condición de la señalización existente e identificación de los faltantes.
- f) Asentamientos humanos y actividades de control sobre el DDV.
- g) Obras de captación y conducción de flujo superficial (cunetas, zanjas de coronación, bajantes y otros).
- h) Limpieza y vegetación que pueda dañar el ducto.
- i) Construcciones y tomas clandestinas (por ejemplo: válvulas ilícitas).
- j) Obras especiales para la protección geotécnica de deslizamientos, erosión, socavamientos, escorrentías, etc., y para la liberación de cargas externas sobre los ductos.
- k) Accesorios y válvulas del ducto.
- l) Golpes y abolladuras del ducto.
- m) Vibración del ducto.
- n) Uso del suelo.

Todas las observaciones y anomalías que se encuentren durante la inspección terrestre, se deben registrar en los reportes de resultados correspondientes (reporte de resultados del recorrido terrestre), indicando las necesidades de mantenimiento para su análisis e implementación correspondiente.

En el reporte de resultados se recomienda incluir la siguiente información:

- Información general (descripción del recorrido cumplido, fecha de inspección, tramos o ductos evaluados, etc.).
- Equipo, personal y herramientas utilizados.
- Condiciones de la inspección.
- Reporte fotográfico.

Específicamente, para cada novedad encontrada se debe determinar:

- Punto de abscisa o progresiva (o kilométrico, Pk).



- Coordenadas de localización geográfica.
- Forma de acceso.
- Nombre de propietario o comunidad (cuando es posible determinarlo en el recorrido).
- Tipo de hallazgo (deslizamiento, erosión, socavación, etc., y características generales).
- Croquis (esquema del estado actual y obras a construir).
- Resultado de la inspección visual.
- Priorización del hallazgo.
- Recomendaciones técnicas de obras o monitoreos a ejecutar.
- Recomendación de estudios especializados adicionales.

Los informes con el registro de datos y resultados deben ser entregados a los responsables del mantenimiento del ducto involucrado, junto con las fotografías y esquemas con las recomendaciones aplicables.

En el numeral 4.7 se presenta un modelo básico de formato de registro de sitios de interés geotécnico en el DDV e información complementaria.

| TIPOS DE INSPECCIÓN | LOCALIZACIÓN | ACTIVIDAD | EQUIPO | PERSONAL | FRECUENCIA DE INSPECCIÓN |
|---------------------|--|---|--|---|---|
| TERRESTRE | DUCTO SUPERFICIAL INTERFASES AIRE-TIERRA, CRUCES, ACCESORIOS, CRUCES DE VIA, ENTRE OTROS | OBSERVACIÓN VISUAL PARA LOCALIZAR ZONAS, TRAMOS O PUNTOS DE RIESGO A LO LARGO DEL DUCTO | MEDIANTE USO DE VEHICULO TERRESTRE Y A PIE PARA ACCEDER A LAS INSTALACIONES QUE SERÁN INSPECCIONADAS | INSPECTOR DDV CON APOYO DE CUADRILLAS O PROFESIONAL EN GEOTECNIA E HIDROLOGÍA FLUVIAL O CON ESPECIALISTAS | NIVEL 1 = CADA 21 DIAS NIVEL 2 = CADA 14 DÍAS NIVEL 3 = CADA 9 DÍAS |
| AÉREA | | | INSPECCIÓN MEDIANTE EL EMPLEO DE HELICÓPTEROS O DRONES | PROFESIONAL EN GEOTECNIA, GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA FLUVIAL O CON ESPECIALISTAS | CADA 90 DÍAS Y CADA 6 MESES (CON OBTENCIÓN DE VIDEOS) |

Fuente: EP PETROECUADOR.

Tabla 4.1 Cuadro resumen de inspección del DDV (aérea y terrestre)

La Tabla 4.1 muestra un ejemplo de referencia para las frecuencias de las inspecciones. Cabe aclarar que éstas dependen de las condiciones de cada línea de transporte de hidrocarburos, incluso de cada tramo. El óptimo se obtiene con base en los diagnósticos y en el análisis del comportamiento observado.

4.3. INSPECCIONES PUNTUALES

La razón fundamental para inspeccionar y examinar el DDV es la de identificar novedades (defectos o deficiencias) existentes en el mismo, las cuales podrían ser corregidas mediante trabajos de mantenimiento o trabajos específicos de intervención no programados en el DDV. En el Capítulo 3 se puede encontrar una lista con sitios de interés geotécnico, y con las posibles obras que se pueden utilizar para mitigar o manejar las diferentes geoamenazas.

Cuando se detecta una anomalía en el recorrido aéreo o se recibe, por ejemplo, un reporte de la comunidad, es necesario hacer una inspección puntual terrestre detallada al sitio para verificar y



clasificar el hallazgo, tomar las dimensiones de la afectación y organizar el esquema de solución. La inspección puntual busca la atención rápida y la priorización de la acción necesaria frente al hallazgo.

4.3.1. Sitios sin obras de estabilización

La inspección general de la superficie de las secciones del DDV regular del ducto, constituye el recorrido y evaluación de la superficie del DDV en sí, para detectar, identificar y rastrear cualquier condición inusual de dicha superficie que pudiera ser causada por procesos de inestabilidad de cierta naturaleza.

Se describen a continuación los requerimientos mínimos para llevar a cabo dicha inspección, los cuales deben ser observados por el inspector o responsables durante los recorridos y evaluaciones del DDV:

- El perfil de cortes, terraplenes y suelos reconformados del DDV deben ser inspeccionados a fin de determinar si se están suscitando procesos de inestabilidad y si éstos podrían causar mayores problemas de mantenimiento. Los indicadores de inestabilidad tales como: deslizamientos de tierra, derrumbes, depresiones, asentamientos, escarpes, fisuras, marcas, hundimientos, desplazamientos de suelo, cambios en la vegetación, etc., deben ser evaluados para determinar su causa y consecuencias predecibles.
- La superficie del DDV debe ser examinada para detectar fisuras en el suelo; desalineación de carreteras, árboles, cercas, postes de luz, estructuras de drenaje y otros elementos lineales; caída de árboles, torres de transmisión, edificaciones, etc.; inundaciones; flujos volcánicos; líneas costeras alzadas o hundidas; y toda señal visible de daños en el subsuelo o en otras líneas de servicios públicos (agua, alcantarillado, etc.).
- Los daños inusuales a propiedades o a zonas adyacentes al DDV, deben ser evaluados para determinar su causa, ya que podrían estar vinculados a la inestabilidad del suelo que podría terminar afectando al DDV o al ducto.
- Todo deslizamiento, flujo o caída que pudiera conllevar a una acumulación de escombros en la superficie del DDV provenientes de cortes del DDV o de laderas adyacentes, debe ser detectado y programado para ser limpiado y removido. Si se sospecha que los desechos pudieran tornarse fácilmente en una complicación de estabilidad para el DDV debido al volumen de desechos acumulados en sí, o a la predisposición de éstos desechos para absorber agua y sobrecargarlo, personal de ingeniería debe ser notificado para revisar la evaluación inicial realizada por el inspector del DDV, respecto al espacio de tiempo adecuado para removerlos y tomar medidas paliativas.
- La actividad de terceros, o la evidencia reciente de actividad de terceros sobre el DDV y zonas adyacentes que se encuentre causando -o que pudiera causar- interferencias no planificadas en el DDV, debe ser evaluada para determinar si tales interferencias pudieran comprometer la estabilidad del mismo o la integridad del ducto. Las interferencias sobre el DDV pueden ser de la siguiente naturaleza: edificaciones, tanques sépticos, campos de infiltración, pozos de agua, postes de luz, vías de acceso, actividad de construcción en las cercanías que pudieran impactar al ducto, cualquier obstrucción inusual sobre el DDV, cultivos de árboles maderables, etc.
- La inspección de rutina del DDV y su evaluación periódica por parte de ingeniería, deben contribuir a evaluar la efectividad y condiciones de control de la vegetación en el DDV y sus áreas adyacentes, tomando en cuenta el acceso al ducto para su operación, mantenimiento, reparación, visibilidad para inspecciones e identificación del mismo por el público. La



vegetación dentro del DDV o el corredor operacional del ducto deberá ser mantenida razonablemente baja, a fin de facilitar el acceso y la visibilidad a lo largo del mismo.

- La condición general de letreros, tales como marcadores aéreos de kilómetros, letreros de advertencia, postes de protección catódica, etc., deberá ser inspeccionada para planificar si se deben reparar o reemplazar, de ser necesario, durante el siguiente ciclo de trabajos de mantenimiento de rutina.
- Durante las inspecciones rutinarias y las evaluaciones periódicas de ingeniería al DDV, se deben llevar a cabo revisiones de la profundidad de tapada del ducto a lo largo de las secciones del DDV en donde la probabilidad de perder la tapada debido a socavación, erosión, escorrentía, inundación, movimiento de la superficie del suelo, presencia de campos arables, etc., haya sido identificada. Asimismo, la profundidad de tapada del ducto en cruces de esteros, quebradas, cañadas, zanjas, cunetas, caminos, autopistas y vías, debe ser revisada periódicamente de una manera aleatoria o por sospecha de pérdida de la misma (para mayor información, ver el Capítulo 3).

El inspector del DDV debe informar sobre nuevas particularidades en el mismo con la localización geográfica por medio de GPS o referencias mediante levantamientos topográficos de precisión, cuya información permitirá actualizar los planos *As Built*. Las nuevas particularidades a las constituirán: carreteras, caminos, senderos para vehículos, zanjas de drenaje, canales de irrigación, cruces de ductos foráneos, edificaciones, patios, estanques, líneas de transmisión de energía, cultivos y cualquier otro elemento que debe ser registrado necesariamente de forma periódica.

La vegetación que cubra las laderas adyacentes al DDV, en especial si aquellas laderas son largas y de fuerte pendiente, debe ser considerada significativamente durante las inspecciones del DDV. La cubierta vegetal provee protección al suelo contra la erosión y la saturación e infiltración de agua, lo cual contribuye a la estabilidad de las laderas.

La inspección del DDV, o la evaluación periódica de ingeniería, deben determinar si cualquier tipo de actividad externa (construcción, viviendas, sembríos, ganadería, deforestación, etc.) en las cercanías del mismo pudiera poner en riesgo a su estabilidad en el futuro cercano.

Si durante la inspección rutinaria o evaluación periódica de ingeniería se identificase una sospecha temprana de falla del terreno que pudiera afectar al DDV, mediante la detección de asentamiento, rotura, desplazamiento de suelo o montículos en el DDV, la estabilidad de aquella sección en particular debe ser monitoreada de cerca hasta que se hayan tomado acciones y se compruebe que éstas han sido efectivas. Si la inestabilidad se tornara en una gran complicación para la integridad del ducto, se debe considerar la implementación de instrumentación geotécnica o mediciones topográficas de alta precisión, a fin de monitorearla sobre una base continua.

4.3.2. Sitios con obras de estabilización

Todas las obras de estabilización implementadas en el DDV deben ser inspeccionadas regularmente para confirmar sus buenas condiciones actuales.

Los muros de gavión, los muros de concreto, las tabla-estacas metálicas, los pilotes de tubos de acero, etc., deben ser inspeccionados a fin de asegurar que no se hayan inducido en ellos tensiones o



cargas inaceptables debidas a sobrecargas sobre la estructura de retención, y que las condiciones generales de la estructura sean aceptables.

Los trabajos geotécnicos tales como el revestimiento con geotextil o geomallas de las pendientes, laderas, cortes o rellenos del DDV u otro similar de protección geotécnica de la superficie del suelo, deben ser inspeccionados para confirmar que las medidas se encuentren todavía sirviendo al propósito para el cual fueron instaladas.

De igual manera, las medidas de control de drenaje y erosión del DDV, así como también para el drenaje de la escorrentía superficial, deben ser inspeccionadas a fin de confirmar su efectividad y determinar la necesidad de trabajos de reparación, modificación, mejora o sustitución (cortacorrientes, cunetas, zanjas, canales, etc.). Las medidas de drenaje y control de erosión protegidas con cualquier tipo de revestimiento (sacos suelo, sacos suelo-cemento y geotextil), deben ser evaluadas para confirmar las condiciones del revestimiento a fin de determinar la necesidad de reparación o reemplazo.

Todas aquellas secciones del DDV, con instrumentación geotécnica, tal como deformímetros o inclinómetros, deben ser monitoreadas tomando todas las lecturas y mediciones requeridas de forma oportuna según los procedimientos señalados en el Capítulo 5, sección 5.5.



Fuente: OCENSA.

Figura 4.2 Visitas puntuales para seguimiento a funcionamiento de obras existentes

A continuación se presenta un cuadro resumen de aplicabilidad de los sistemas correctivo y preventivo de inestabilidad de taludes.



| CAMBIO CAUSADO | ACCIONES O EVENTOS DESESTABILIZANTES | POSIBLE MEDIDAS REMEDIALES |
|--------------------------------------|---|---|
| Geometría de talud. Carga externa | Excavaciones en ladera. Cortes y rellenos para carreteras y ferrocarriles. Erosión en la base por corrientes de agua u oleaje. Cargas estructurales sobre el talud; edificios, estribos de puentes, muros, agua, nieve, hielo y acumulación de desechos. Cargas de tránsito, vibraciones, sismos. Desembalse rápido. | Proveer soporte en la base, retirar materiales de la cabeza del talud. Reducir empinamiento; hacer el talud más largo, construir bermas para evitar fallas superficiales. Evitar acumulación de agua, hielo y nieve. Localizar y preparar sitios para desviar el tránsito. Eliminar fuentes de vibraciones. Hacer más lentos o graduales los cambios en niveles de embalses. Suministrar soporte estructural mediante muros apoyados en estratos competentes. Colocar anclajes para introducir fuerzas estabilizantes. Cambiar la geometría de la masa en posibilidad de moverse. |
| Estado interno de esfuerzos | Remoción de restricción lateral en suelos sobreconsolidados puede llevar a reducción de esfuerzos horizontales. Formación de grietas y fisuras debido a influencias ambientales. Cambios estructurales y de esfuerzos debidos a subsidencia en áreas de minería o sometidas a karstificación. Excavaciones subterráneas, túneles. Erosión interna (tubificación). Movimiento a lo largo de fallas geológicas. Cambios de esfuerzos debidos a reptación. Formación de hielo. Crecimiento de raíces en grietas. Suelos y rocas expansivos. | Reducir efectos de factores ambientales que producen grietas y fisuras (la vegetación puede ayudar). Evitar penetración de raíces. Rellenar grietas donde puede acumularse agua. Introducir fuerzas de tensión por medio de anclajes pasivos (pernado de suelos) que pueden ser desarrolladas al progresar el movimiento. Utilizar sistemas de anclaje activo, que incrementen la resistencia por fricción a lo largo de superficies de falla. |
| Presión de poros e infiltración | Fluctuación de niveles freáticos. Aumento de la infiltración debido a lluvias, ductos rotos, modificación de la permeabilidad del suelo. Disipación de presiones de poros negativas. Presiones excesivas en el agua o aire de los poros debidas a cargas dinámicas externas. | Abatir el nivel freático (o colgado) por medio de drenaje por gravedad o por bombeo desde pozos. Captar y desviar aguas de escorrentía. Reparar conductos que aporten agua a masas de suelo inestables. Evitar el acceso de agua a suelos no saturados instalando barreras impermeables y sistemas apropiados de drenaje. Reducir los niveles de saturación e incrementar la permeabilidad al aire (la vegetación puede ayudar), donde sea posible. |
| Resistencia al corte | Pérdida de resistencia debido a efectos físico-químicos (lixiviación, meteorización, humedecimiento-secado, congelación-deshielo) que pueden causar cambio en la estructura del suelo (disminución de fuerzas de atracción entre partículas, rompimiento de enlaces cementantes). Remoldeo de arcillas sensibles. Aumento de las presiones de poros o colapso de la estructura que puede llevar a licuación y fluidificación. | Remoción de suelos débiles y reemplazo por materiales resistentes. Mejoramiento de suelos en sitio por medio de compactación, consolidación, aditivos, refuerzo, tratamiento térmico. Reducir efectos de meteorización. Reforzar con vegetación. |

Fuente: Hausman (1992), adaptado por García López (2014).

Tabla 4.2 Aplicabilidad de los sistemas correctivo y preventivo de inestabilidad de taludes⁵⁶

4.3.2.1. Estructuras (obras) de contención

Las obras más comunes utilizadas para la estabilización de zonas con riesgo de deslizamientos, deben ser evaluadas y diseñadas previamente por personal especializado. Entre ellas, se indican las siguientes:

⁵⁶ García López, Manuel. *Conceptos Básicos para la Gestión de Integridad y de Ductos Frente a las Geoamenazas*, Taller ARPEL “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre de 2014 -Cartagena de Indias, Colombia.



4.3.2.2. Muros de contención y sostenimiento

La construcción de muros se utiliza para reforzar la zona de pie de un talud, evitando la degradación en esta zona crítica, siendo efectivos frente a inestabilidades superficiales. El muro de contención tiene el inconveniente de que se debe excavar al pie del talud para su construcción, lo que favorece la inestabilidad y no evita posibles deslizamientos a favor de superficies de rotura por encima o debajo del muro. El muro de sostenimiento se construye separado del pie del talud, rellenando posteriormente el trasdós (espacio entre el muro y el talud).

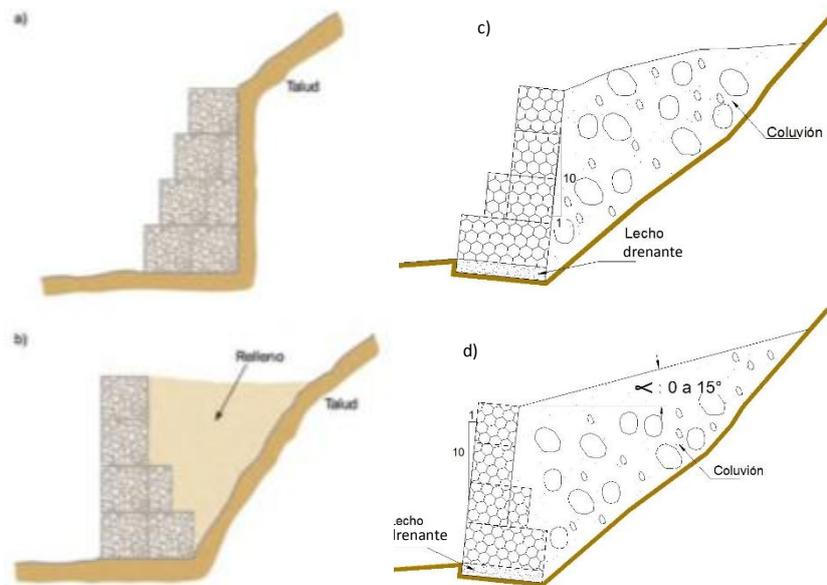
Los muros de revestimiento se utilizan para proteger el terreno de la erosión y proporcionar un peso estabilizador a pie del talud.

4.3.2.3. Gaviones

Los gaviones son envolventes o cajas flexibles de contención, de forma rectangular fabricadas con enrejado de malla de alambre reforzado, galvanizado y de triple torsión, rellenos de piedra de canto rodado. Funcionan por gravedad y rozamiento y evitan los empujes de tierras en sitios inestables con afloramientos de agua, así como también se utilizan en zonas erosivas con arrastres de tierras. Las estructuras de gaviones se pueden diseñar para que trabajen solidariamente con el terreno, a manera de tierra reforzada, lo cual aumenta su eficiencia ya que se aprovecha su flexibilidad y resistencia. El diseño por gravedad es ineficiente debido a la baja densidad de los gaviones, respecto a estructuras de tierra o de concreto.

En las Figura 4.3 (a) y (b) se representan dos tipos convencionales de muros de gaviones, y en las Figuras 4.3 (c) y (d) dos variantes de dichos tipos de estructuras de gaviones, desarrolladas para terrenos montañosos de los Andes Sudamericanos, y en especial cuando el terreno que debe contenerse está formado por coluviones o por mantos gruesos de suelo residual. En general, las estructuras de gaviones deben dotarse de medios de drenaje, tanto en la pared interna como en la base, ya sean filtros convencionales de materiales gradados o geosintéticos⁵⁷.

⁵⁷ García-López, 2003



a) Intradós escalonado; b) Trasdós escalonado, con relleno entre el muro y el talud; (c) y (d) Muros de gaviones con inclinación hacia el talud y drenaje en la base.

Fuente: (a) y (b): L. González de Vallejo, 2002. (c) y (d): García-López, 2003.

Figura 4.3 Muros de gaviones

4.3.2.4. Barreras

Son estructuras que normalmente se conforman con sacos rellenos con suelo seleccionado, en ocasiones con suelo-cemento, y permiten el confinamiento del material de relleno en las zanjas evitando su colapso por flujo de agua.



Fuente: OCENSA.

Figura 4.4 Zanja confinada con sacos de suelo



4.3.2.5. Trinchos

Son estructuras que pueden ser de guadua, madera, sacos llenos de suelo-cemento u otro tipo de material que se preste para tal fin, dispuestas en forma de muro a fin de ayudar a formar terrazas para estabilizar taludes que han sufrido procesos de deslizamientos o en donde hay procesos de erosión (ver las Figuras 4.5 y 4.6). En estos casos, su finalidad es estabilizar el terreno para ayudar a que la vegetación se establezca nuevamente y acabe de estabilizar el talud de forma permanente por el amarre de raíces.

También se utilizan para disipar la energía cinética del agua de escorrentía, de acequias, quebradas y ríos, en donde la fuerza del agua provoca socavamiento de los cauces y bordes.



Fuente: Internet-images.

Figura 4.5 Trinchos



Fuente: OCENSA.

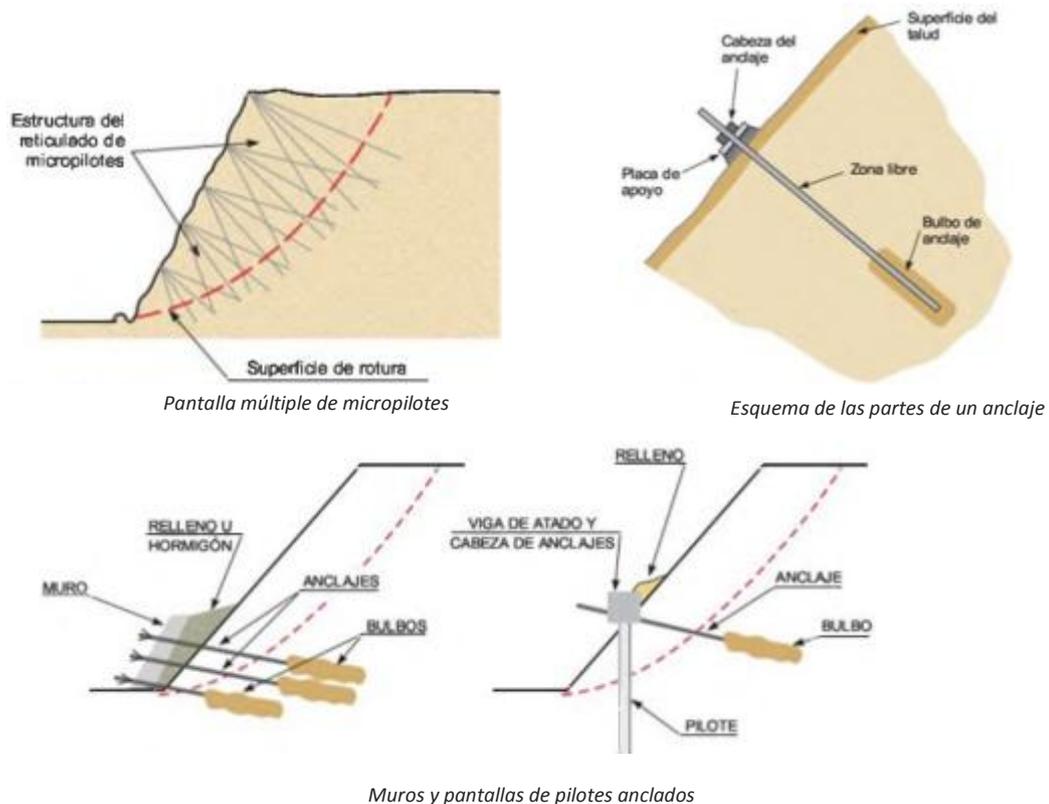
Figura 4.6 Deslizamiento estabilizado con trinchos metálicos y revegetación

4.3.2.6. Elementos estructurales resistentes

La introducción de elementos resistentes en el terreno aumenta la resistencia al corte a través de alguno de los siguientes sistemas (ver la Figura 4.7):



- Introducción de elementos para mejorar la resistencia del terreno en la superficie de rotura (pilotes o micropilotes).
- Introducción de elementos que aumentan las fuerzas tangenciales de rozamiento en la superficie de rotura (anclajes y bulones).



Muros y pantallas de pilotes anclados

Fuente: L. González de Vallejo. 2002; modificado de Oteo. 1995

Figura 4.7 Elementos estructurales resistentes

4.3.2.7. Pilotes metálicos

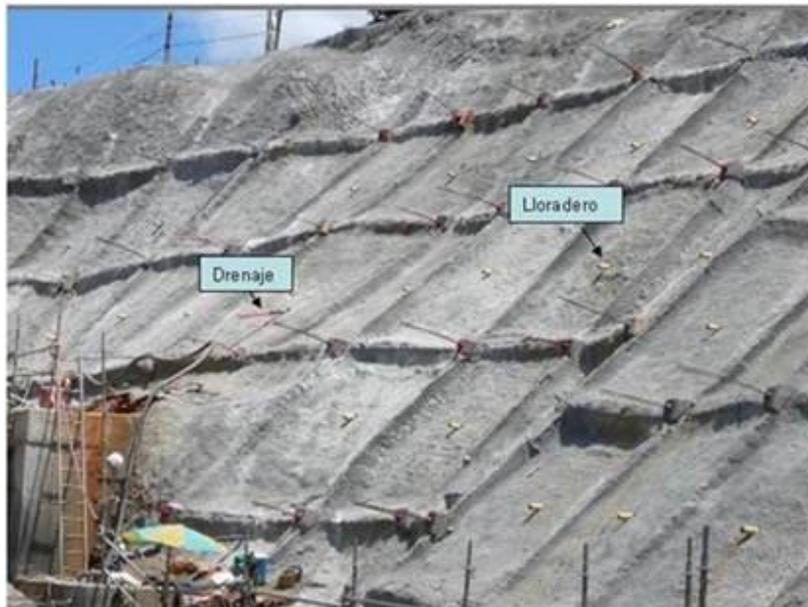
Son estructuras metálicas de diámetro variable entre 10,2 y 20,3 cm (4 y 8 pulgadas), cuya longitud depende de la profundidad del substrato firme (al cual deben llegar y empotrarse en él). Cuando se utilizan los pilotes se disponen de manera muy cercana y casi siempre al tresbolillo, es decir, intercalados en 2 filas sucesivas.

4.3.2.8. Obras de control de erosión y drenaje

4.3.2.9. Coberturas

En zonas susceptibles a la erosión se utilizan coberturas superficiales. Las mismas permiten el control y mitigación del impacto de las precipitaciones y vientos. Estas pueden ser coberturas vegetales de céspedón, mantos de fibra vegetal, de concreto enmallado (pañetes) o piedra mortero. Como elementos impermeables para la protección contra la erosión de diques, gaviones o estructuras

específicas, se utilizan geomembranas de polietileno y como elemento permeable de filtro y drenaje, se utiliza el geotextil no tejido, a fin de evitar el lavado de material fino.



Fuente: OCENSA.

Figura 4.8 Cara de concreto, anclajes y drenajes profundos para la estabilización del talud

4.3.2.10. Medidas de drenaje

Permiten eliminar o disminuir el agua presente en el talud y por lo tanto, las presiones intersticiales que actúan como factor desestabilizador en las superficies de rotura y grietas de tracción. El drenaje puede ser superficial, mediante zanjas de drenaje y canalizaciones, o profundo mediante drenes horizontales (ver la Figura 4.9), pozos o drenes verticales, galerías de drenaje y pantallas drenantes.



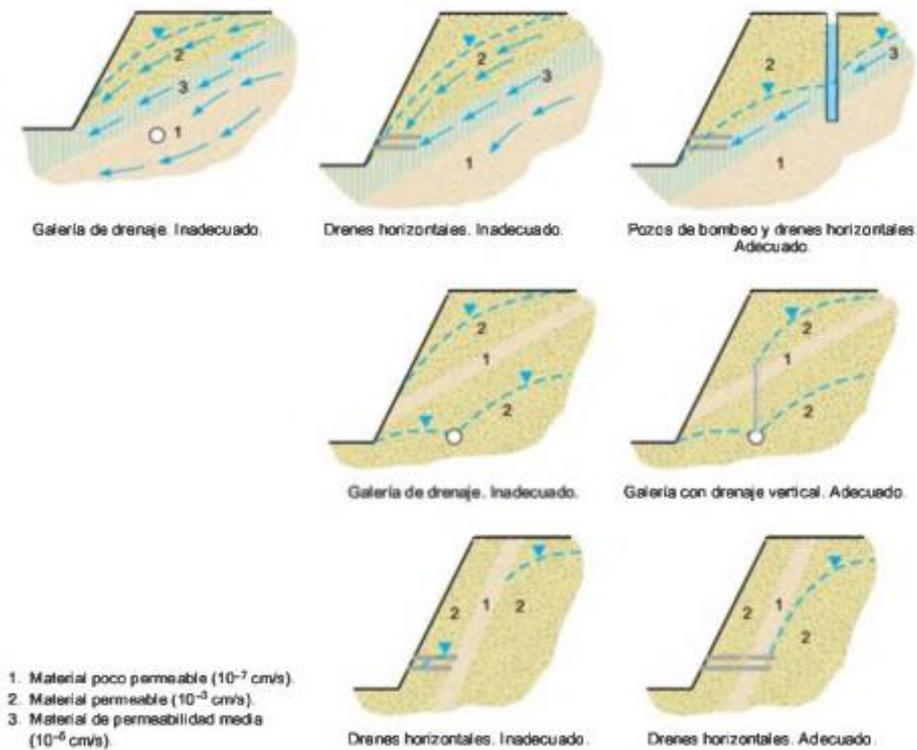
Fuente: OCENSA.

Figura 4.9 Construcción de drenes horizontales



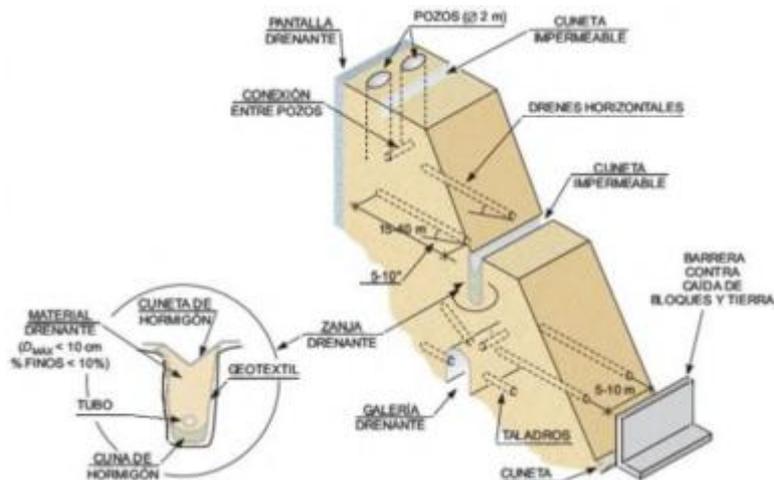
4.3.2.11. Sub-drenajes

Se hace referencia en general a los filtros profundos que buscan evacuar el agua de la masa de suelo, deprimiendo el nivel freático. Por lo común se utilizan filtros en zanja con rellenos de piedra limpia y durable, geotextil y tubo de drenaje que conduzca las aguas hacia un sitio específico, que casi siempre es un curso de agua o quebrada cercana.



Fuente: L. González de Vallejo. 2002; Modificado de Canmet. 1977

Figura 4.10 Disposición y eficacia de los sistemas de drenaje en un talud



Fuente: L. González de Vallejo. 2002; Modificado de Uriel. 1991

Figura 4.11 Medidas de drenaje y protección en taludes



4.3.2.12. Obras de control de escorrentía superficial

Estas suelen ser un complemento obligatorio de las obras mencionadas antes, ya que completan el manejo de agua que se le da a la masa de suelo inestable. Las obras permanentes de control de erosión se construyen en una etapa final, una vez que se haya alcanzado un grado de estabilización aceptable de la masa de suelo involucrada en el movimiento. Éstas se componen de cortacorrientes, canales o cunetas, colectores o descoles y coberturas con revegetación, entre otras.

4.3.2.13. Cortacorrientes

Elementos que se instalan en pendientes longitudinales y conforman un cauce de baja pendiente que cruza el DDV, a fin de evitar la erosión del fondo. Tienen una profundidad variable entre 0,2 y 0,6 m y su inclinación se distribuye de acuerdo a la geometría del terreno, su erodabilidad y la intensidad de las precipitaciones.

De acuerdo a la morfología del terreno, se realiza el desagüe a uno o ambos lados hasta llegar a cauces naturales o con elementos de conducción hacia un costado del DDV en forma de espina de pescado, o en una sola dirección.

| CORTACORRIENTES | PENDIENTE LONGITUDINAL |
|-----------------|----------------------------|
| TIPO I | $\leq 30\%$ |
| TIPO II | $> 30\% \text{ y } < 55\%$ |
| TIPO III | $\geq 55\%$ |

Fuente: 0802, Normas de Ingeniería de Oleoductos, Sistemas de Drenaje, ECOPELROL.

Tabla 4.3 Tipos de cortacorrientes de acuerdo a su pendiente longitudinal

4.3.2.14. Canales laterales

Estos canales conducen el agua desde los cortacorrientes hacia cauces naturales y se diseñan bajo criterios hidrológicos. Para evitar su erosión, se colocan enrocados, sacos de suelo-cemento o pequeños diques disipadores de energía.

4.3.2.15. Colectores (descoles)

Consisten en canales de mayores dimensiones para descargar toda la recolección de las aguas de drenaje del DDV a las corrientes naturales de desfogue. Se construyen en forma de escalinata con mampostería de roca, sacos de suelo-cemento o gaviones.

4.3.2.16. Bermas de desviación

Pueden tener un ancho de 1 a 2 metros y se colocan a diferencias de altura entre 5 y 7 metros, dependiendo de la calidad de los suelos, y en sitios de cambios de pendiente del talud. En suelos erosionables, la berma debe tener una pendiente de entre 5 y 10% adentro del talud, y con una cuneta revestida en su parte interior.



| DESESTIMULAR NUEVOS PROYECTOS EN ÁREAS PELIGROSAS | REGULACIÓN DE NUEVOS PROYECTOS EN ÁREAS PELIGROSAS | PROTECCIÓN DE PROYECTOS EXISTENTES EN ÁREAS AMENAZADAS | REMOCIÓN O RECTIFICACIÓN DE PROYECTOS INSEGUROS EXISTENTES |
|--|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Adopción de políticas de servicios públicos. • Creación de zonas o sectores que requieran evaluación especial. • Revelar la existencia de la amenaza a los negociantes de finca raíz. • Informar y educar a la comunidad. • Colocación de señales o avisos de peligro potencial. • Desincentivar inversión financiera. • Incluir la amenaza en los registros públicos. • Exigir seguros por deslizamiento no subsidiados, relacionados con el nivel de amenaza. | <ul style="list-style-type: none"> • Establecer normas para proyectos en laderas. • Establecer especificaciones o restricciones para el movimiento de tierras (excavaciones y rellenos). • Adoptar normas sanitarias y urbanísticas. • Crear zonas especiales de reducción de amenazas (zonas de protección de amortiguación) con las normas oficiales correspondientes. • Requerir zonificación adecuada sobre el uso de la tierra. | <ul style="list-style-type: none"> • Controlar los deslizamientos (efectuar medidas correctivas o remediales y de seguimiento). • Reorientar o desviar canales de flujos de lodo. • Poner en operación sistemas de monitoreo, alarma y evacuación. | <ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de áreas amenazadas. • Relocalización de comunidades amenazadas. • Mejoramiento de áreas públicas. • Descontinuar usos inadecuados de la tierra. • Reconstrucción de instalaciones públicas y líneas vitales. • Redesarrollo de áreas incomunicadas. |

Fuente: W. J. Kockelman. 1984, adaptado por García-López, 2000.

Tabla 4.4 Técnicas para mitigar amenazas por deslizamientos

| Tratamiento | Ventajas | Desventajas |
|---|---|--|
| Descarga y contrapeso  | Disminuye fuerzas desestabilizantes. Aumenta fuerzas resistentes | Dificultades de acceso a la parte superior y de maniobra de equipos por terreno blando y agrietado. Puede requerir intervención del terreno situado arriba o atrás del escarpe principal. |
| Aterrazamiento  | Disminuye la velocidad del agua escorrentía. Colecta sedimentos. Permite el acceso al talud para empradización y mantenimiento. Colecta aguas hacia el sistema de drenaje o el terreno natural. | Puede originar falta del talud si el agua se infiltra (necesita cunetas complementarias). Requiere terreno adicional. No es posible en todos los terrenos. |
| Recubrimiento (enrocado u otros)  | Da protección inmediata para zonas críticas y bajo estructuras. Puede utilizarse elementos fundidos en el sitio o prefabricados. | Costoso. Dificil de colocar en taludes empinados o grandes. Puede ser difícil de mantener. Requiere subdrenaje eficiente. |
| Empradización  | De protección inmediata. Ayuda a proteger áreas vecinas contra sedimentación y turbiedad. | Dificil colocarla antes de terminar la excavación. Los cespedones no siempre se consiguen. Puede ser muy costosa. |
| Berma en la corona del talud  | Evita escurrimiento sobre el talud. Conduce el agua al sistema de drenaje. Puede ser construida antes de ejecutar la excavación. | Acceso a la corona del talud. Dificil construirla en laderas empinadas o rocosas. La concentración de agua puede requerir canales revestidos y disipadores de energía. Puede promover la infiltración. |
| Dique y canal interceptor  | Capta y conduce el agua a sitios seleccionados reduciendo la erosión potencial. Puede incorporarse al sistema de drenaje permanente. | Dificultades de acceso. Requiere mantenimiento frecuente si no está revestido. El material alterado o la berma pueden ser fáciles de erosionar. |
| Drenaje de la cara del talud (revestimientos, ducto, etc.)  | Previene la erosión. Puede ser temporal o permanente. Puede ser construido o prolongado a medida que avanza el corte. | Requiere obras complementarias para coleccionar el agua. La construcción permanente no siempre es compatible con otras obras del proyecto. Exige disipadores de energía. |

Fuente: HRB – Synthesis of Highway Practice N°18, adaptado por García-López (2003).

Tabla 4.5 Métodos para control de erosión de taludes



4.3.2.17. Obras de protección de cauces

Ante la existencia de procesos de socavación de cauces en los cruces subfluviales menores, se requiere proteger los márgenes o riberas de los ríos con lo cual se hace necesaria la protección con muros de gaviones o enrocados, o sacos rellenos de suelo-cemento, o bolsacretos. Adicionalmente, dentro del lecho y de manera transversal, se pueden construir diques o trinchos con el objeto de levantar el nivel de depósitos para aumentar la tapada del ducto y disminuir la pendiente del cauce sobre el sitio de paso del mismo.

Con el fin de minimizar la vulnerabilidad de la estabilidad de un cauce contra la socavación durante crecientes, se pueden realizar obras de protección de tipo hidráulicas, estructurales, de monitoreo y de bioingeniería.



Fuente: OCENSA.

Figura 4.12 Protección de márgenes de corrientes de agua: gaviones y tablestacas

4.3.2.18. Hidráulicas

Se consideran medidas temporales y limitan la socavación mediante la modificación de las líneas de corriente y la protección del lecho y de las bancas del cauce, contra las fuerzas erosivas del flujo del agua. Su adopción depende de un análisis hidráulico detallado del sitio y de la corriente.

- a. Estructuras de control fluvial.
 - Estructuras longitudinales.
 - Revestimiento de taludes, retardadores de velocidad, tablestacas, pantallas, muros, muelles.
 - Estructuras transversales (refuerzo del lecho).
 - Estructuras combinadas (paneles sumergidos).
- b. Protección local.
 - Revestimientos.



- Vegetación, enrocados, losas de concreto, gaviones.
- Pilas auxiliares y pantallas aguas arriba.
- Diques de encauzamiento.
- c. Otras medidas.
 - Dragado de cruces.
 - Cierre de brazos secundarios.
 - Corte de curvas (meandros).

4.3.2.19. Estructurales

Se consideran medidas permanentes y modifican la estructura original a fin de mejorar las condiciones de estabilidad de la cimentación.

- a. Reforzamiento de la cimentación de la estructura.
 - Recalces.
 - Encamisados.
 - Profundización.
 - Extensión de la cimentación.
 - Mejoramiento del suelo.
- b. Modificaciones.
 - Geometría.
 - Reemplazo de elementos parciales.
 - Reemplazo de la estructura.

4.3.2.20. Monitoreo

Es un conjunto de medidas preventivas que permite la recolección continua de información del cauce y de la estructura, para emitir una alerta temprana sobre fallas o problemas potenciales.

- a. Monitoreo visual.
- b. Monitoreo con instrumentación post creciente.
- c. Monitoreo con instrumentación en tiempo real.
 - Instrumentación móvil.
 - Instrumentación fija.

4.3.2.21. Bioingeniería

Es una medida alternativa que permite la estabilización biotécnica de los cauces en la que se puede combinar el uso de vegetación con elementos estructurales. No es utilizada para protección de estructuras como puentes, por lo que se siguen prefiriendo las soluciones clásicas de ingeniería.



| CAUSA | TIPO DE AMENAZA | | | |
|----------------------------------|--|---|---|--|
| | INUNDACIÓN | SEQUIA | CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS | INESTABILIDAD DEL TERRENO |
| Condiciones hidro-meteorológicas | <ul style="list-style-type: none"> Lluvia Nieve derretida Acumulación de hielo Olas costeras | <ul style="list-style-type: none"> Precipitación deficiente | <ul style="list-style-type: none"> Derivada de la precipitación (ej. lluvia ácida) Derivada de evaporación excesiva (ej. acumulaciones salinas) | <ul style="list-style-type: none"> Deslizamientos producidos por precipitación excesiva Flujo de lodos Sedimentación o erosión producida por la acción de las olas o crecientes. |
| Actividad humana | <ul style="list-style-type: none"> Presas Urbanización Deforestación Bloqueo de corrientes por basuras y escombros | <ul style="list-style-type: none"> Uso excesivo de la tierra | <ul style="list-style-type: none"> Escorrentía urbana Desalinización Disposición de desechos Vertederos Fertilizantes Pesticidas Insecticidas Intrusión de agua salada Minería Rellenos sanitarios (lixiviados) | <ul style="list-style-type: none"> Asentamientos regionales producidos por exceso de explotación de pozos artesianos y abatimiento del nivel freático. Colapso de dolinas cársticas inducido por abatimiento excesivo del nivel freático. Sedimentación o erosión costeras producidas por el desarrollo de proyectos en la costa. |
| Condiciones geológicas | <ul style="list-style-type: none"> Deslizamientos (ej. Represamiento de ríos) Movimiento de tierra (ej. Falla de una presa) Erupciones volcánicas (ej. Represamiento de ríos) Ajuste tectónico de la corteza terrestre | <ul style="list-style-type: none"> Permeabilidad de las rocas excesiva. Cenizas volcánicas. | <ul style="list-style-type: none"> Mineralogía de las rocas (ej. Domos salinos) Litología de las rocas (ej. Sedimentación excesiva procedente de "tierras malas") Cenizas volcánicas Fuentes geotérmicas | <ul style="list-style-type: none"> Colapso de dolinas cársticas Deslizamientos en rocas blandas y rocas saturadas Sedimentación y erosión costeras debidas a procesos geológicos Deformación o rotura por expansión-contracción de arcillas |

Fuente: Giusti. 1984. citado por García-López, 2000.

Tabla 4.6 Amenazas hidrogeológicas y sus causas

| MODIFICACIÓN DEL FLUJO Y CAUDAL | MODIFICACIÓN DEL DAÑO POTENCIAL | MODIFICACIÓN DE LA AMENAZA |
|---|---|---|
| TRATAMIENTO DE LA HOYA TRIBUTARIA <ul style="list-style-type: none"> Control de escorrentía Retención de aguas de lluvias Retardo de la infiltración Conservación de las funciones retardantes en la hoya Reforestación Control de cárcavas Obras preventivas de erosión y deslizamiento Corrección de deslizamientos Desembalse controlado en taponamientos OBRAS DE PROTECCIÓN <ul style="list-style-type: none"> Diques y jarrillones Mejoramiento de canales (rectificación y ampliación) Desvíos Muros de encauzamiento Barreras y trinchos Trampas de sedimentos | REGULACIÓN Y AJUSTE DEL USO DE LA TIERRA <ul style="list-style-type: none"> Regulación del uso de la tierra Regulación del desarrollo urbano Códigos de construcción Compra de tierras y propiedades por el gobierno ADECUACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES <ul style="list-style-type: none"> Cierre permanente de aberturas de baja altura Rellenos Cierre de válvulas de conductos de desagüe y alcantarillados Interiores a prueba de agua Estructuras reforzadas contra grandes impactos y presiones Construcciones elevadas | SOBRE EL MEDIO FÍSICO <ul style="list-style-type: none"> Evaluación de estabilidad de laderas Delimitación de zonas potencialmente inestables Pronóstico de inundaciones Lucha con la inundación Elaboración de mapas de amenazas RELACIÓN CON LOS HABITANTES <ul style="list-style-type: none"> Acciones de emergencia y reprogramación Información a la comunidad Preparación de la comunidad Planes de evacuación Alivio de desastres Reprogramación de operaciones Ayudas gubernamentales Seguros contra inundación Exención de impuestos <p>NOTA: Puede optarse por la inacción, que llevaría a la solución simple de sufrir las consecuencias del evento.</p> |

Fuente: Yamaguchi et. al., 1983, adaptado por García-López.

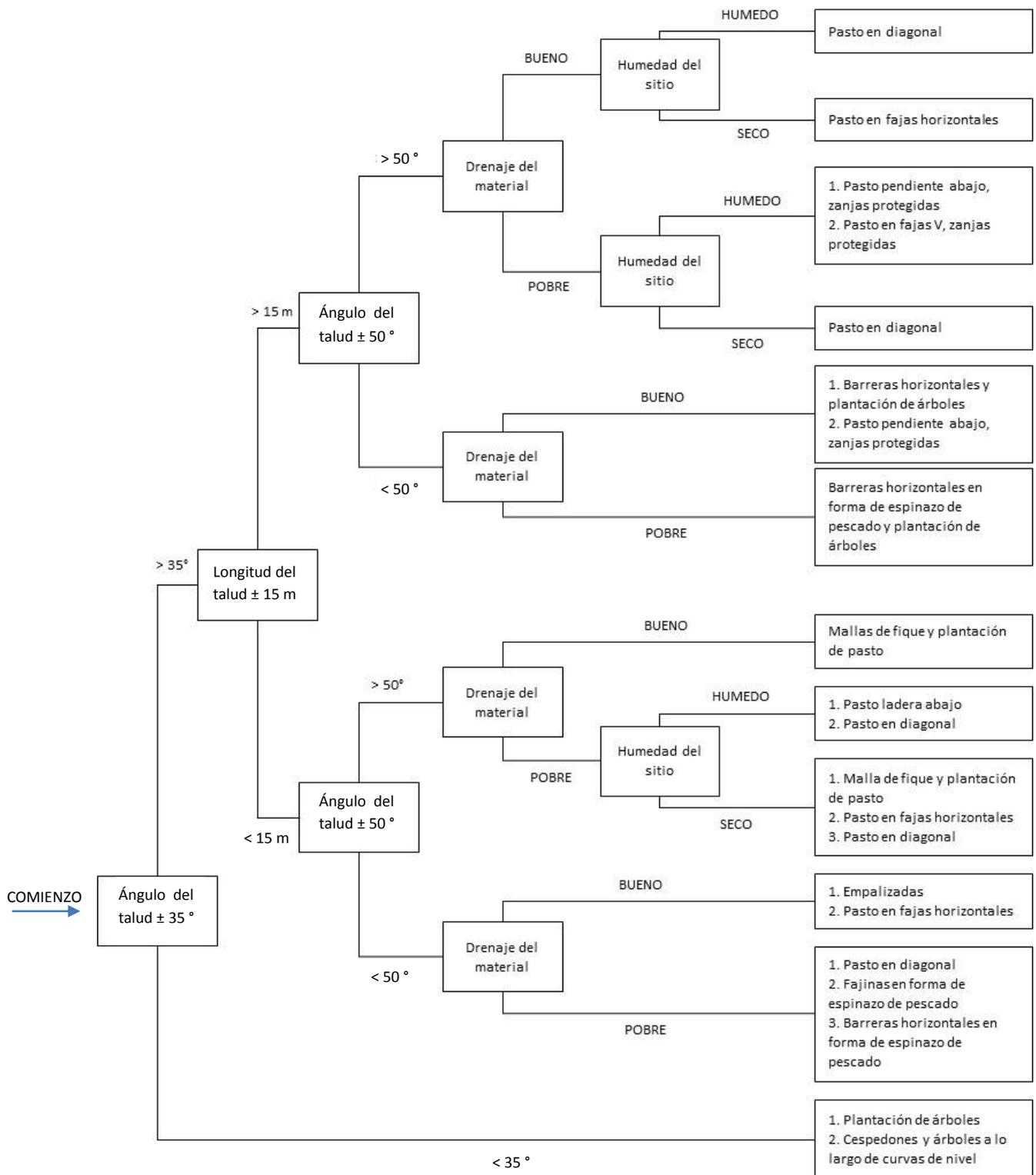
Tabla 4.7 Alternativas para mitigar amenazas por crecientes extraordinarias y avalanchas



| CATEGORIA | EJEMPLOS | USOS APROPIADOS | MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN O FUNCIÓN DE LA VEGETACIÓN | |
|--|---|--|---|--|
| OBRAS VIVAS Plantaciones convencionales | <ul style="list-style-type: none"> • Siembra de pasto • Empradización con céspedón • Transplantes | <ul style="list-style-type: none"> • Control de la escorrentía superficial y la erosión eólica | <ul style="list-style-type: none"> • Ligar y retener las partículas de suelo • Filtrar el suelo de las aguas de escorrentía • Interceptar caídas de agua • Mantener la infiltración • Cambiar el carácter térmico de la superficie del terreno | |
| OBRAS MIXTAS | Vegetación empleada como refuerzos y barreras contra el movimiento del suelo | <ul style="list-style-type: none"> • Estacas vivas • Barreras vivas en líneas de nivel • Capas de matorral • Trinchos de madera • Colchón de varas, ramas y troncos | <ul style="list-style-type: none"> • Control de la erosión por escorrentía superficial (zanjas y cárcavas) • Control de movimientos en masa superficiales (traslacionales) | <ul style="list-style-type: none"> • Igual al anterior, además refuerza el suelo y resiste los movimientos, ladera abajo por acción del arqueado del suelo |
| | Vegetación sembrada en aberturas frontales o intersticios de estructuras de contención | <ul style="list-style-type: none"> • Muro de revestimiento con siembra de plantas en el frente • Revestimientos con siembra de plantas en el frente (enrocados, entramados, colchonetas y bloques) • Estructuras atirantadas con bermas vegetalizadas • Barreras de malla metálica | <ul style="list-style-type: none"> • Control de movimientos en masa superficiales y resistencia a empujes de tierra moderados • Mejorar la apariencia y comportamiento de las estructuras | <ul style="list-style-type: none"> • Reforzar y endurecer el suelo o relleno detrás de la estructura • Agotar o remover la humedad del suelo o relleno detrás de la estructura |
| | Muros en el pie del talud usados en combinación con la vegetalización del talud | <ul style="list-style-type: none"> • Muros de encofrados vivos • Gaviones vegetalizados • Muros de geomallas vegetalizados • Antepechos vegetalizados | <ul style="list-style-type: none"> • Control de la erosión sobre cortes y taludes de terraplenes sometidos a socavación en la pata | <ul style="list-style-type: none"> • Detener o prevenir la erosión sobre la cara inclinada arriba de la estructura de contención |
| CONSTRUCCIONES MECÁNICAS Estructuras convencionales | <ul style="list-style-type: none"> • Muros de gravedad de concreto • Muros en voladizo cantilever • Muros de pilotes y "caissons" • Muros de tierra reforzada • Muros anclados | <ul style="list-style-type: none"> • Control de movimientos en masa profundos y soporte de grandes empujes de tierra • Contención de rellenos tóxicos o agresivos | <ul style="list-style-type: none"> • La vegetación cumple principalmente un papel decorativo en estos casos, pero mejora aspecto ambiental | |

Fuente: Gray & Leiser. 1982 y Gray & Sotir. 1996. Adaptado por García-López.

Tabla 4.8 Medidas de control biotécnico para la protección de taludes



Fuente: Howell et. al., 1991, adaptado por García-López, 2000.

Figura 4.13 Determinación de las técnicas de estabilización biotécnica a utilizar de acuerdo con las propiedades del sitio⁵⁸

⁵⁸ Propuesta para Nepal Oriental.



4.3.3. Sitio o punto crítico nuevo

Mediante las inspecciones geotécnicas e hidrotécnicas realizadas a lo largo del DDV, se determinan las zonas, cuya estabilización tiene una complejidad mayor, para realizar estudios geológicos – geotécnicos, geofísicos y ensayos de laboratorio, lo que permite obtener datos importantes para la consideración de sitios o puntos críticos.

Para la determinación del nivel de criticidad se recurre a los datos reales obtenidos durante la etapa de investigación de campo. A fin de establecer la efectiva inestabilidad del sitio o punto crítico, es necesario ampliar el área de influencia, de tal manera que se considere una distancia que también será inspeccionada y monitoreada entre 500 metros y 1 km, antes y después del sitio o punto crítico.

Los estudios geológicos – geotécnicos incluyen las descripciones de:

- Áreas potencialmente inestables
- Estructuras geológicas
- Áreas inestables activas
- Zonas afectadas por procesos volcánicos y sísmicos

Los estudios geofísicos se realizarán cuando la criticidad del sitio o punto inestable así lo exija, usando métodos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), para determinar los espesores de los estratos del subsuelo y la profundidad de la capa freática.

Los ensayos de laboratorio para la obtención de parámetros geomecánicos se realiza bajo normas y métodos ASTM (*American Society for Testing and Materials*) o normas locales de cada país.

Complementariamente, para iniciar el proceso de elaboración del diseño y estabilización de los sitios o puntos críticos nuevos, se realiza el levantamiento de la base topográfica y elaboración del plano topográfico de la zona identificada.

El monitoreo y la inspección de los puntos críticos determinados se debe ejecutar dentro (y fuera, si es el caso) del DDV, dependiendo de las condiciones del lugar de estudio, bajo un cronograma de inspecciones preestablecidos. Para la ejecución de este plan se deben priorizar los puntos críticos y determinar la frecuencia de recorrido correspondiente para cada uno de ellos.

Para la evaluación de los puntos críticos (medición de parámetros), se debe considerar la instalación de instrumentación geotécnica, con la finalidad de tener datos reales que permitan tener control y seguimiento del estado dinámico del punto crítico o evento natural que pueda afectar la integridad del ducto (ver Capítulo 5).

En casos específicos, cuando la interacción suelo-ducto necesita ser modelada, se desarrollan modelos de elementos finitos con el fin de predecir el comportamiento del ducto en los sitios más críticos. Estos modelos se preparan con la geometría real de la tierra y del ducto.

Los modelos referidos permiten realizar predicciones de datos de desplazamiento del suelo y comportamiento del ducto, obtenidos durante el monitoreo del sitio. Con dichos modelos, la magnitud de los esfuerzos axiales en el ducto (esfuerzos máximos) puede ser determinada para el desplazamiento del suelo, y se pueden implementar las respectivas actividades de mitigación, tales como alivio de tensión antes de que el ducto sufra deformaciones por encima de los niveles aceptables.



4.4. MONITOREO EN CRUCES DE CAMINOS

El monitoreo de cruces de carretables con ductos de alta presión, adquiere relevancia debido al potencial daño mecánico que puedan ocasionar terceros con actividades rutinarias, como por ejemplo, rectificación de abovedado de caminos rurales o por actividades no rutinarias, como ampliación de infraestructura.

A diferencia de los cruces de corrientes de agua (naturales o industriales), sobre los que se expondrán aspectos particulares en el Capítulo 5 (numerales 5.3 y 5.4), los cruces de caminos pueden ser objeto de seguimiento en el desarrollo de inspecciones del DDV, con las herramientas que este se desarrolla. Por esta razón se incluyen en esta sección (Capítulo 4).

Asimismo, exceden el alcance de lo comentado en esta sección, el seguimiento y acuerdos de orden interinstitucional por desarrollo de nuevos proyectos de infraestructura vial en zonas de interferencia (por cruce o paralelismo) con sistemas de transporte de hidrocarburos, sobre los cuales es necesario establecer revisiones conjuntas durante la etapa de diseño. En algunos países se establece que la empresa ejecutora debería solicitar en absolutamente todos los casos, el denominado “Pedido de Interferencia” a la operadora de la línea antes de realizar cualquier tipo de tarea preliminar. En este pedido, se procede a realizar la marcación del ducto, indicando su ubicación precisa y profundidad. Además, el sector de PPD (Plan de Prevención del Daño), dará los lineamientos necesarios para la protección del ducto.

En este sentido, es importante realizar una rápida categorización en función de la clase de la vía, toda vez que de ello depende la magnitud de las cargas (repetición y magnitud) y las actividades de mantenimiento de la misma que pueden impactar negativamente al derecho de vía:

- Autopistas o autovías.
- Rutas nacionales o provinciales pavimentadas.
- Rutas nacionales o provinciales sin pavimentar.
- Caminos rurales de acceso público.
- Caminos internos de campos.
- Vías del ferrocarril.

En todos los casos debe estudiarse si el cruce es perpendicular, sesgado o corre paralelo al camino, toda vez que tiene efectos importantes en la integridad del ducto, no sólo ante geoamenazas, como por ejemplo ante posibles apantallamientos al sistema de protección catódica, sino también por dificultades ante la necesidad de desarrollar actividades de mantenimiento al ducto.

Es muy importante tener un listado de estos cruces con base en los registros de construcción y contar con la respectiva ficha técnica en la que se establezca el proceso constructivo empleado (excavación a cielo abierto, tuneladora, perforación horizontal dirigida), el perfil longitudinal del ducto con respecto a la sección de la vía y el tipo de cruce en función de la estructura de pavimento.

Del mismo modo, es necesario conocer si la zona de cruce para la construcción de la vía se desarrolló sobre un corte, un terraplén, o una zona con transición corte/relleno, por los efectos que estas diferencias tienen en la integridad del ducto debido a sobrecarga (asentamientos o consolidación), rebote elástico, problemas de estabilidad de laderas, entre otros. En este sentido, la temporalidad y antecedencia de construcción de ambas infraestructuras también son relevantes (si el camino es previo



a la línea o posterior a ella, o lo que es mejor, si el ducto es una interferencia del camino o el camino una interferencia del ducto), toda vez que los efectos en la integridad del ducto también son diferentes.

Para explicar un poco lo anterior, se plantea el caso en el que un cruce de camino se encuentre en un tramo de la vía en terraplén. Si el ducto se instaló posterior a la existencia del camino, normalmente no se esperan efectos en la integridad del ducto, toda vez que, tanto las condiciones de entorno como del mismo ducto, pueden ser tenidas en cuenta en el diseño del cruce. Si el camino se construyó posterior a la existencia del camino, si no se realiza el adecuado seguimiento a la interferencia en la etapa del diseño, se pueden presentar efectos adversos sobre la integridad del ducto (que incluyen aumento de la profundidad de enterramiento con posterior inconveniente para el mantenimiento) como lo son los asentamientos elásticos y la consolidación por sobrecarga con incremento de esfuerzos y deformaciones diferenciales que absorbería el ducto.

Se puede esperar de un adecuado seguimiento a la interferencia que, si el camino es posterior, se hayan tomado las medidas necesarias en el paquete estructural (base - sub base – sub rasante) para resguardar al ducto, o bien se haya realizado la obra de arte correspondiente.

En lo que respecta al monitoreo del cruce, es necesario tener en cuenta tanto las características del camino como del ducto.

Con relación al camino, en caso de capas de rodadura tipo mezclas asfálticas, emulsiones o concretos hidráulicos, se puede monitorear la presencia de fisuras y grietas derivadas de deformaciones por levantamiento o asentamiento de la estructura. Es necesario diferenciar esta condición de la generada por el tránsito (i.e. pieles de cocodrilo en estado incipiente). Para cruces con capas de rodadura en afirmado o material natural, dado que las fisuras y las grietas son difíciles de identificar o suelen no ser perceptibles hasta que se presentan estados de daño avanzado, se debe realizar seguimiento a las deformaciones que dejen entrever una interacción con el ducto (asentamientos, hundimientos o levantamientos generalizados del camino en el cruce).

Con relación al ducto, el monitoreo se puede realizar de diversas maneras y debe identificar cambios en el alineamiento del ducto o pérdida de la altura de tapada, por lo que esto es función de la profundidad a la que se encuentra el mismo.

Uno de los métodos es a través de las corridas de herramienta inteligente, que se pueden encontrar de forma detallada en el Capítulo 7 de esta guía, pero que -de forma general- se puede mencionar que permiten identificar cambios en el alineamiento (vertical u horizontal) del ducto y permiten calcular las deformaciones a partir del análisis de varias corridas y de la información del mapeo inercial de una corrida en particular.

Con relación a la altura de tapada, la manera más efectiva de monitorearla es mediante un detector de cañería (tipo Radiodetection RD 8000) en el modo “conducción” lo que requiere la conexión a un mojón con bornera. La limitación es la profundidad, ya que a más de 6 m se pierde precisión y el detector pierde eficacia. El modo “inducción” de estos equipos puede llevar a confusión, ya que se puede estar detectando una instalación que no es la que se desea monitorear. La manera alternativa es mediante cateo manual, pero tiene las dificultades obvias en caminos pavimentados.

En todo caso, normas internacionales, como es el caso de ASME B31.4, dan indicaciones de la profundidad de enterramiento mínima deseada, que para el caso de cruces de carreteras es de 1,2 m.



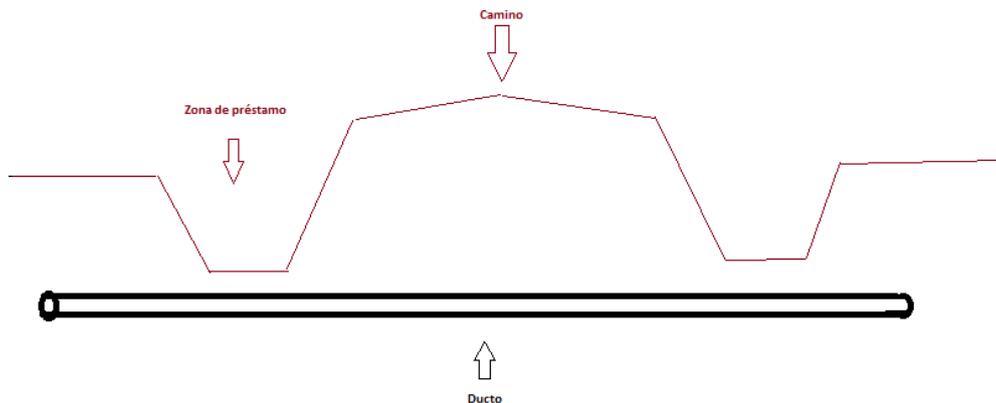
Una situación particular es el cruce temporal de maquinaria sobre el ducto para mantenimiento propio o de líneas adyacente, por ejemplo. En este caso, dado que por la naturaleza temporal de la intervención, no hay capas de base y sub-base colocadas como en el caso de las vías, la práctica recomienda un enterramiento mínimo de 1,8 m; de no tenerlo se debe colocar un realce o camellón en tierra que garantice dicha profundidad.

4.4.1. Algunos ejemplos con relación a posibles interferencias y sus riesgos potenciales

Los casos posibles a presentarse y sus cuidados y mitigaciones más usuales utilizados en Argentina, son los siguientes:

4.4.1.1. Ducto perpendicular a caminos

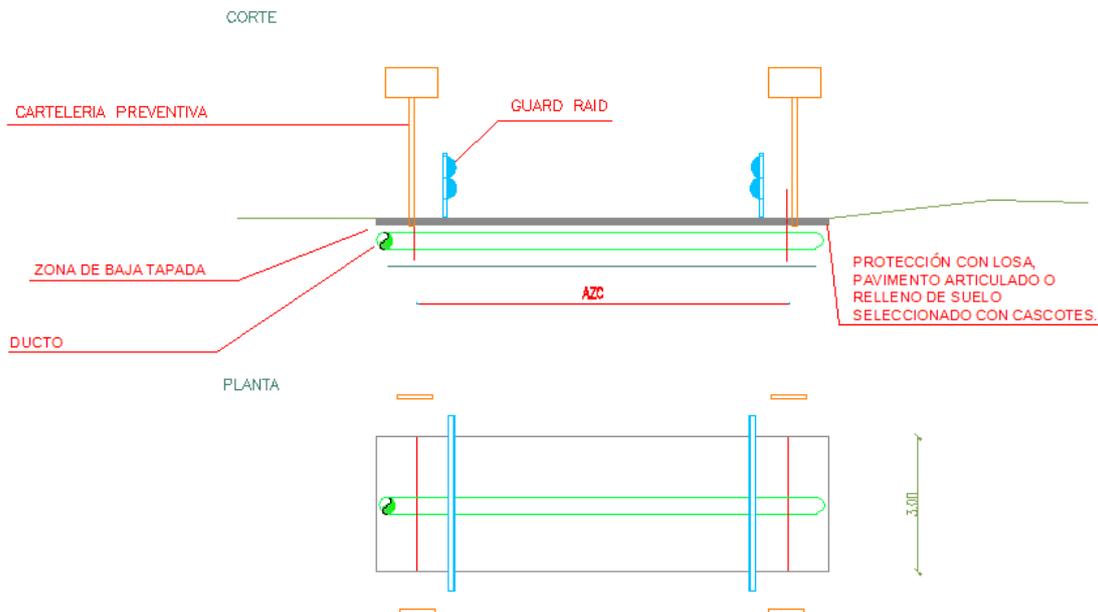
En este caso, el monitoreo debe centrarse en las zonas de préstamo de los caminos. Estas zonas son zanjones que corren paralelos a los caminos, y es de donde fueron tomados los suelos para generar el paquete estructural de la carretera. Aquí la dificultad se presenta a la hora de rectificarlos, ya que si el ducto no se encuentra perfectamente identificado, una máquina retroexcavadora de limpieza podría tocarlo y dañarlo seriamente.



Fuente: YPF

Figura 4.14 Corte lateral del camino cuando el ducto es perpendicular

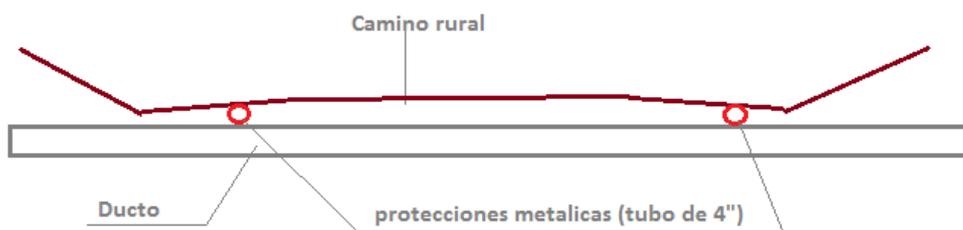
Como se ve en esta simple representación (Figura 4.14), la zona de préstamo es la más vulnerable por poseer la tapada menor. El siguiente esquema (Figura 4.15), tiene como fin mostrar una posibilidad de señalización y protección superior para un ducto que cruza una vía.



Fuente: YPF

Figura 4.15 Señalización y protección superior de un ducto que cruza una vía

Cuando se presenta la situación de tener una baja tapada en los lados del camino, para ductos que cruzan los mismos, es posible colocar un caño metálico de no menos de 4" en forma perpendicular al ducto. De esta manera, ante un perfilado, el equipo (por ejemplo motoniveladora) tocaría este elemento rígido antes de descender más en el perfilado e impactar al ducto. Esta es una solución provisoria, pero económica y de alta eficacia.

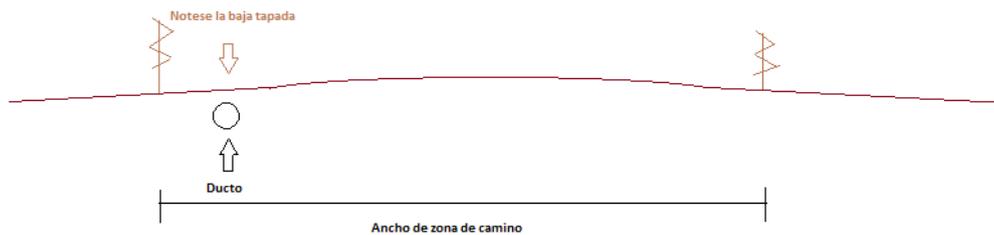


Fuente: YPF

Figura 4.16 Protecciones metálicas para ductos que cruzan caminos

4.4.1.2. Ducto paralelo al camino

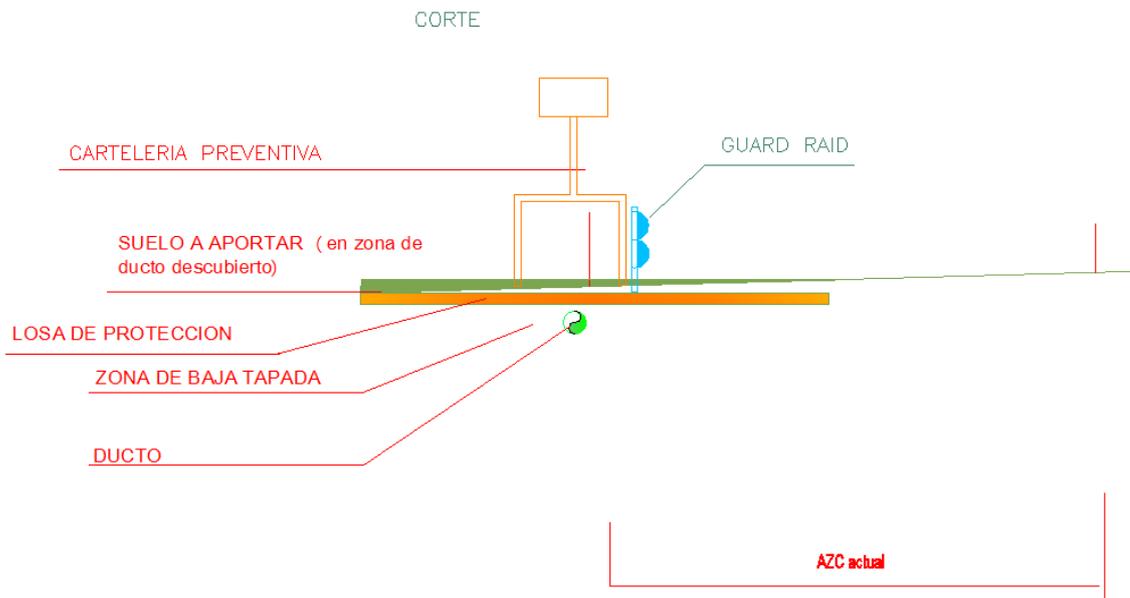
Aquí es de vital importancia una buena tapada continua del ducto, muy especialmente en caminos de tierra, los cuales son pasibles de ser rectificadas con moto-niveladoras. El relevamiento, la determinación de la tapada y posterior seguimiento son vitales para la integridad del ducto. Si la tapada es adecuada (mayor o igual a 0,70 m), se la puede considerar una zona de riesgo bajo; a profundidades menores, el mantenimiento del camino por parte de la Dirección de Vialidad o de los propietarios puede ocasionar daños serios al ducto.



Fuente: YPF

Figura 4.17 Corte transversal de un camino con ducto paralelo

Una moto-niveladora podría -en el caso presentado- dañar el ducto con su cuchilla en el trabajo de perfilado. En estos casos, se pueden tomar medidas de mitigación, como la colocación de cartelería.



Fuente: YPF

Figura 4.18 Señalización y protección superior de un ducto paralelo al camino



La solución definitiva en estos casos podría ser:

- Desplazar el camino unos metros para que el ducto no quede en la banquina.
- De no ser posible, se podría colocar una loseta sobre el ducto, previo aporte de suelo para que la tapada sea de al menos 0,50 m antes de apoyarla. Sumando a esto, la colocación de cartelería.
- Bajada de cañería por flexión natural.

4.5. EVALUACIÓN DE ESTADO Y FUNCIONAMIENTO DE OBRAS

El control de obras de estabilización permite garantizar que éstas se encuentren funcionando y cumpliendo su objetivo. Esta labor puede ser realizada como parte del mantenimiento rutinario, periódico o extraordinario, dependiendo de la severidad de los procesos externos. Este control debe ser prioritario antes de las temporadas de lluvias y después de un evento extremo.

Algunos criterios para la inspección de las obras y el terreno son:

- Control de oclusión o taponamiento en los sub-drenes.
- Control de canales y descargas o bajantes.
- Control de hundimientos o erosión en los muros de contención.
- Control de socavación retrógrada o cambio del flujo de agua.
- Control de “*piping*” (tubificación o erosión interna) que afecte la estructura del suelo y la fundación de las estructuras presentes.

4.5.1. Inspecciones geológicas-geotécnicas y monitoreo instrumental

Los datos del monitoreo e inspección geológica-geotécnica, deben ser registrados en un mismo tipo de informe con formato establecido, detallando la información solicitada a continuación. Se inicia con las inspecciones enfocadas en el punto crítico, y la información generada debe describir:

- Situación actual y descripción.
- Objetivos.
- Características identificadas en el sitio.
- Características geológicas.
- Características geotécnicas.
- Resumen del fenómeno de inestabilidad (ver formato de registro a modo de ejemplo a continuación)

| PROCESO DE INESTABILIDAD | | | | |
|--------------------------|------|---------------------------|--|---------|
| ABSCISA | TIPO | CARACTERÍSTICAS DEL SITIO | VULNERABILIDAD (BAJA, MEDIA Y ALTA) Y MITIGACIÓN | FOTO N° |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |



4.5.2. Inicio de monitoreo instrumental

Se comienza con el monitoreo instrumental, el cual está enfocado en la descripción de parámetros geológicos-geotécnicos e hidrológicos medibles. La información generada debe ser registrada en un formato preestablecido, por ejemplo:

| ABSCISA | TIPO DE OBRA INSPECCIONADA Y TIPO DE EVENTO GEOTÉCNICO | FECHA REPORTADA DEL DAÑO GEOTÉCNICO | AREA AFECTADA (m ²) | ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS | | | | | CAUDAL | | ÁNGULO LADERA O TALUD (°) | DIRECCIÓN MASA DESLIZADA | PANTALLA PILOTE O MURO DE GAVIONES | | | DESPLAZAMIENTO | | PRECIPITACIÓN (m) | FOTO N° |
|---------|--|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------|-----------|-----------------|-----------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|--------------|----------------|----------------|-------------------|---------|
| | | | | DENSIDAD DE FISURAS | LONGITUD (m) | ANCHO (m) | PROFUNDIDAD (m) | RUMBO (°) | BUZAMIENTO (°) | VOLUMEN (m ³) | | | ÁREA (m ²) | INCLINACIÓN (°) | LONGITUD (m) | ANCHO (m) | HORIZONTAL (m) | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

- Estado actual del daño geotécnico
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Registro fotográfico

El levantamiento de estos datos se puede hacer utilizando instrumentos geotécnicos, como el goniómetro o clinómetro, aforadores, brújula de geólogo, cinta de medir, etc.

Este tipo de informes debe ser reportado de acuerdo al cronograma de inspecciones, para elaborar un informe especial o resumen al final de cada jornada, utilizando el mismo formato establecido.

4.5.3. Monitoreo del eje del ducto

Este tipo de monitoreo se basa en la recolección de datos para determinar la extensión del área del movimiento, su ruta a través de los ductos y para la verificación topográfica de la posición del ducto vs. la información del *As Built*. Para la toma de las medidas se debe realizar el replanteo topográfico del eje del ducto para levantar, a continuación, el eje con el detector de ductos y finalmente ver su posible desplazamiento.

Este tipo de monitoreo se emplea en zonas donde existen evidencias de posible desplazamiento del ducto. Para llevar el control y monitoreo del eje del ducto, es necesario registrar la siguiente información en el siguiente formato de ejemplo:



- Litología.
- Hidrogeología.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.
- Registro topográfico.
- Planos, figuras y esquemas (planos y corte geológico).
- Trabajos de campo, en este parámetro se desarrolla la exploración geotécnica con obtención de especímenes para el análisis de laboratorio.

| LECTURA CALICATA | |
|--------------------------|--------------|
| PROYECTO: | |
| CALICATA: | |
| LOCALIZACIÓN: | |
| FECHA DE REALIZACIÓN: | COORDENADAS: |
| SUPERVISOR: | X: |
| HERRAMIENTAS UTILIZADAS: | Y: |
| PROFUNDIDAD: | |
| DESCRIPCIÓN: | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| NIVEL FREÁTICO: | |
| REGISTRO | |
| COLUMNA ESTRATIGRÁFICA | FOTOS |
| | |

4.5.5. Análisis y evaluación de información

La información diaria generada de los monitoreos e inspecciones geológicas-geotécnicas, inspecciones regulares sobre invasiones, rupturas, denuncias de la comunidad y otros, debe ser procesada y registrada en un formato al final de cada jornada (en casos manuales), y estructurada en herramientas de consulta dinámica (en casos de levantamientos digitales). Estos resultados deben ser registrados en la matriz principal de puntos críticos, y cerrada al finalizar un período pre-establecido.

En caso de que el personal del DDV requiera la información generada en campo, o los estudios realizados por otras empresas, tendrá que ingresar a la matriz de puntos críticos.

Si con toda esta información generada se detecta que las condiciones geodinámicas del suelo están poniendo en riesgo la integridad del ducto y del DDV, es conveniente realizar estudios con más detalle, para obtener posteriormente el diseño y las recomendaciones de estabilización. Se procederá de la misma manera si -por las condiciones intrínsecas de la naturaleza- existieran eventos



no deseables de mayor potencialidad que estén poniendo en riesgo al ducto, en especial en épocas invernales, ya que el riesgo se incrementa.

La localización de los fenómenos geológicos investigados en el DDV y área de influencia se hará preferiblemente mediante el uso de tecnologías SIG y relacionadas, como GPS, planos *As Built*, información cartográfica, mapas dinámicos, bases de datos y otros. La información debe quedar registrada de acuerdo con su nivel de criticidad en los formatos establecidos. Para efectos del levantamiento de datos de campo con equipos y tecnologías SIG online (ver Capítulo 8), es necesario que se establezcan medios de consulta accesibles vía internet, que contengan toda la información sobre inspecciones o monitoreos diarios.

Para proceder con el análisis final de los resultados obtenidos en el campo, los puntos con alto grado de peligrosidad se someten a un proceso de análisis por parte de las jefaturas responsables del mantenimiento del DDV, quienes definirán las acciones a tomar, y cuyas decisiones deben ser registradas en un documento de seguimiento.

4.6. INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

La interpretación de la información obtenida mediante sensores remotos, fotografías y videos aéreos permite una manera rápida de identificación de actividades humanas en las zonas de estudio, así como la observación directa de los recursos naturales, geológicos y ambientes estructurales. Esta técnica es fundamental para todos los proyectos de ingeniería, geotecnia, ambiente, hídrica e hidrocarburos, y abarca múltiples aplicaciones:

- Mapas geomorfológicos y estructurales.
- Estudios hidrogeológicos.
- Caracterización de karstificación.
- Mapeo de lineamientos y estructuras para el desarrollo de recursos hídricos.
- Evaluación de drenajes de cuencas para el desarrollo de recursos hídricos.
- Uso del territorio, cobertura vegetal y suelos.
- Estimación y monitoreo de estabilidad de pendientes, erosión y transporte de sedimentos.
- Uso histórico del territorio.
- Caracterización inmobiliaria de sitios.
- Riesgos geológicos.
- Medida de la extensión de inundaciones y otros desastres naturales.
- Caracterización de cruce de ríos.
- Estudios para rutas de ductos y corredores de líneas de transmisión eléctrica.
- Exploración minera / hidrocarburos.
- Evaluaciones ambientales.

En general, existen 3 pasos básicos relacionados con el proceso de interpretación de sensores remotos y fotos aéreas, descritos a continuación.



4.6.1. Adquisición de imágenes y su interpretación

En estudios geotécnicos se utiliza normalmente la interpretación multi-escala, proveniente por ejemplo, de imágenes de satélite tipo *Landsat* de 1:250.000 a 1:500.000, las cuales permiten una visualización de las condiciones geológicas regionales sobre los 100 km². Varios rasgos geológicos que se extienden a través de distancias largas, como fracturas y fallas, pueden ser estudiados examinando estas imágenes de satélites de pequeñas escalas. Fotografías aéreas estereoscópicas desde altitudes elevadas, de escalas de 1:50.000 a 1:100.000, son utilizadas como análisis de escalas intermedias. La interpretación de fotografías estereoscópicas con escalas de 1:10.000 a 1:20.000 provee un nivel de detalle más alto.

Datos de diferentes fuentes pueden ser integradas para una mejor interpretación, por ejemplo, drenajes de aguas superficiales y mapas de estructuras geomorfológicas pueden ser desarrollados. Permite realizar un seguimiento de patrones de migración de fluidos tanto en planos horizontales como en verticales.

4.6.2. Confirmación de campo para verificar interpretación

El proceso de interpretación de sensores remotos y fotos aéreas debe estar generalmente soportado por observaciones de campo. La localización e identificación de fracturas, estructuras y análisis geológicos llevados a cabo vía interpretación de fotos aéreas debe ser corroborada con una inspección de campo para verificar las interpretaciones. La experiencia en campo es crítica para la verificación de campo de la interpretación de las imágenes, particularmente en valoraciones complejas, como fracturas y karstificación. En situaciones geológicas complejas, es necesario cierto número de correlaciones sucesivas entre las interpretaciones de fotos aéreas y la confirmación de campo de manera general, para un mejor entendimiento de las condiciones geológicas.

4.6.3. Integración de resultados

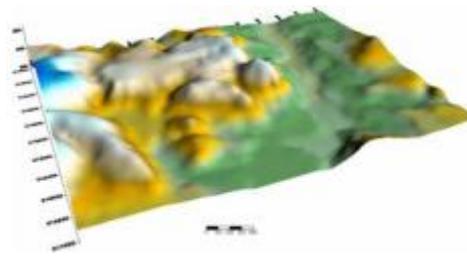
En situaciones geológicas complejas, o donde son requeridos los datos geológicos e hidrogeológicos más detallados, se realiza un estudio de la geofísica de superficie para lograr una mayor precisión en cuanto a la localización y caracterización de las estructuras. Subsecuentemente, se deben llevar a cabo estudios geofísicos en pozo e hidrogeológicos para lograr resultados representativos.

Las imágenes satelitales o fotos aéreas por sí solas no constituyen una interpretación. Los resultados de la interpretación de fotos aéreas deben ser compilados en un reporte soportado con figuras, describiendo los resultados de la interpretación y los procesos de verificación de campo. En casos donde la geología es complicada, son necesarios trabajos adicionales para una caracterización apropiada de las condiciones geológicas. Los resultados de la interpretación de sensores remotos y fotos aéreas deben ser integrados con los resultados de otros datos.

La herramienta SIG que se utiliza complementariamente para la integración de datos e interpretación de resultados, por su importancia requerida, se analiza de manera general en el Capítulo 8.



Ortho-foto aérea (1:25.000)



Modelo digital de terreno

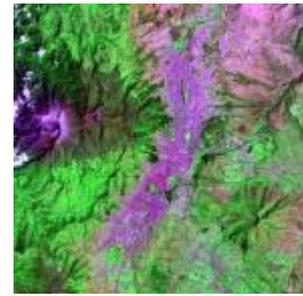


Imagen Landsat (Quito)

Fuente: TRX-CONSULTING: Procesamiento e Interpretación de Sensores Remotos - Fotos Aéreas.

Figura 4.19 Ejemplos de imágenes para análisis geotécnico

4.7. FORMATO DE REGISTRO DE SITIOS DE INTERÉS GEOTÉCNICO

Se propone el siguiente modelo básico para el registro de puntos de interés geotécnico en el DDV, e información complementaria.

| FORMATO DE REGISTRO DE SITIOS DE INTERÉS GEOTÉCNICO EN EL DDV | | | | | | | | | | CÓDIGO: |
|---|---------------|-------|---------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|--------|-------------|-----------|
| | | | | | | | | | | FECHA: |
| | | | | | | | | | | REVISIÓN: |
| FECHA DE REPORTE: | | | TRAMO: | | | | | | | |
| ABSCISADO | | | FECHA DE INSPECCIÓN | DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | TRATAMIENTO RECOMENDADO | RESULTADOS DEL MONITOREO | ESTUDIOS EJECUTADOS | ESTADO | COMENTARIOS | PRIORIDAD |
| INICIAL | SITIO CRÍTICO | FINAL | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | A |
| | | | | | | | | | | B |
| | | | | | | | | | | C |
| | | | | | | | | | | A |
| | | | | | | | | | | B |
| | | | | | | | | | | C |

| ESTADO | TOTAL |
|------------------------------|-------|
| CONDICIÓN ESTABLE | |
| REQUIERE ATENCIÓN GEOTÉCNICA | |
| SALE DE MONITOREO | |
| TOTAL | |



Anexo 4.1. Formato para inspecciones aéreas

Modelo de ejemplo de formato para inspecciones aéreas:

| REPORTE DE RESULTADOS DE INSPECCIÓN AÉREA | | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| FECHA: | | DUCTO/TRAMO: | | |
| PERSONAL QUE REALIZA LA INSPECCIÓN: | | | | |
| MEDIO UTILIZADO PARA INSPECCIÓN: | | | | |
| EQUIPO UTILIZADO EN LA INSPECCIÓN: | | | | |
| CONDICIONES DE LA INSPECCIÓN: | | | | |
| CROQUIS: | | | | |
| | | | | |
| ZONA PK | TIEMPO VIDEO/FOTOGRAFÍA No. | LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA | OBSERVACIONES | PRIORIZACIÓN INICIAL |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| RECOMENDACIONES TÉCNICAS: | | | | |
| | | | | |
| REALIZADO POR: | | APROBADO POR: | | |
| | | | | |



5. MONITOREO DEL TERRENO - MEDICIÓN DE VARIABLES

Teniendo en cuenta la ecuación de riesgo en la que se incluyen las variables: *amenaza* (geoamenazas); *vulnerabilidad* (en este caso el elemento expuesto es el ducto); y *consecuencia* (rutas/volumen de derrame o fugas y planes de contingencia, entre otros), con el monitoreo del terreno, se pretende gestionar la variable *amenaza*.

Como se anunció en el Capítulo 4, y dada la diferenciación que en esta guía se plantea entre la inspección visual (aérea o terrestre) y las técnicas de monitoreo convencional, en este capítulo la gestión de la amenaza se concentra en el monitoreo, que permite cuantificar la magnitud del esfuerzo y las deformaciones (según la aproximación al proceso) a los que puede estar sometido el ducto en el sitio de análisis, y su evolución en el tiempo.

De acuerdo con lo anterior, los procedimientos de monitoreo del terreno aquí descritos se deben diseñar de manera que la capacidad de medición sea compatible con las deformaciones admisibles por el ducto en el modelo de carga al que esté sometido.

Del mismo modo, deben permitir establecer de manera periódica la existencia y actividad de los procesos de amenaza natural que pueden afectar la integridad del ducto, el funcionamiento y durabilidad de las obras de protección o de refuerzo del terreno que se hayan puesto en práctica para mitigar el efecto de la amenaza, así como también, contribuir en la definición de las acciones de mantenimiento preventivo requeridas.

Los procedimientos de monitoreo del terreno permiten obtener información directa sobre el estado del DDV y sus zonas aledañas. Estos deben complementarse con la inspección del DDV (véase el Capítulo 4), con el monitoreo de agentes detonantes (véase el Capítulo 6), y con el monitoreo del ducto (véase el Capítulo 7), con el fin de obtener el nivel de riesgo para materialización de una geoamenaza.

Los incidentes asociados a las geoamenazas en líneas de transporte de hidrocarburos han permitido identificar tipos de monitoreo que permiten realizar gestión de las mismas, los cuales se presentan a continuación.

5.1. MONITOREO DE INDICADORES VISIBLES DE DESPLAZAMIENTO

Dentro de las actividades de monitoreo, de manera general se mencionan las que se basan en la observación del comportamiento del terreno y de elementos de fácil y continua identificación que han sufrido deformaciones o desplazamientos visibles y que a su vez pueden correlacionarse con la actividad de la masa de suelo donde se emplaza el ducto.

Los principales objetivos de un monitoreo de desplazamiento son los siguientes:

- Controlar el desplazamiento total del terreno y del ducto junto con las posibles deformaciones que se generan sobre éste último.
- Detectar las condiciones que indiquen una disminución en la estabilidad de una pendiente o un potencial para aceleración de la tasa de desplazamiento de un movimiento.
- Estimar la profundidad del movimiento y los factores que controlan la estabilidad para ayudar en el diseño de medidas de remediación.



- Documentar la frecuencia y severidad del daño a ductos y estructuras de superficie como una medida para calibrar los peligros de deslizamientos y las estimaciones de riesgo. La recurrencia de eventos geotécnicos y su potencial para ocasionar roturas, con los niveles de riesgo por la amenaza de clima y fuerzas externas. En el Anexo de este capítulo se presenta un ejemplo de formulario para el registro del monitoreo de deslizamientos.

Este tipo de monitoreo es realizado por los recorredores de línea quienes efectúan los reconocimientos directos y evalúan el estado de las obras de protección y la presencia de procesos de inestabilidad que pueden afectar el DDV o sus zonas aledañas. Con este fin también se pueden desarrollar reconocimientos aéreos (tripulados o no), con los que se busca identificar geoamenazas que puedan llegar a afectar el DDV.

Una práctica común es la realización de diagnósticos geotécnicos los cuales consisten en recorridos a cadena pisada (véase el Capítulo 4) realizados por especialistas en geotecnia, quienes evalúan eventos ocurridos y potenciales en el DDV y las zonas adyacentes, que al materializarse puede ocasionar la falla del ducto.

Normalmente los resultados de la evaluación de los desplazamientos ocurridos, se presentan en mapas georreferenciados y a escalas apropiadas que permitan identificar los procesos, los sitios de interés geotécnico, y donde, en caso de requerirse se debe incluir la investigación del sub-suelo, los diseños para construcción de las obras y acciones de mitigación y el diseño del programa de monitoreo correspondiente.



Fuente: OCENSA.

Figura 5.1 Marcas superficiales en el terreno formando una línea recta⁵⁹

⁵⁹ Cuando se presenten desplazamientos es posible identificarlos y medirlos con cinta métrica.



5.2. MONITOREO TOPOGRÁFICO

Los procedimientos de control topográfico buscan realizar el monitoreo del desplazamiento del terreno mediante el análisis de lecturas periódicas, por medio de las cuales se pueden determinar los desplazamientos horizontales y verticales de la superficie del sitio de interés geotécnico. Estos datos permiten calcular la dirección y velocidad del movimiento y validar la dimensión de la zona inestable. La frecuencia de las lecturas en los sitios monitoreados topográficamente, se establece de acuerdo con la prioridad y el riesgo del sitio, así como también, con base en la magnitud del desplazamiento detectado. Estos procedimientos deben ser redundantes, de modo tal que permitan mediante el análisis la determinación de la aproximación de las mediciones y la confiabilidad del procedimiento empleado.

En general los procedimientos topográficos o geodésicos permiten realizar monitoreo de desplazamientos del terreno, dentro de los de mayor precisión se tiene la triangulación geodésica, el cual es muy laborioso; los procedimientos de radiación son prácticos, y en ellos la precisión depende de la aproximación del equipo para medir los ángulos y las distancias; los procedimientos con alineamientos son sencillos y confiables; las poligonales simples tienen una confiabilidad baja, ya que la aproximación de cada medición afecta a las siguientes, al punto de perder el control. Los equipos GPS han revolucionado los procedimientos de medición topográfica. También con los equipos de radar se pueden realizar mediciones de alta velocidad que permiten determinar deformaciones pequeñas en corto plazo. A continuación se presentan algunos de los procedimientos más utilizados.

5.2.1. Alineamiento con puntos de control fijos

El procedimiento más sencillo y confiable es aquel que controla alineamientos rectos con puntos fijos a los extremos. Se replantea el alineamiento, pasando por el área que se quiere monitorear y se materializan por lo menos dos puntos durables (hitos, puntos geo-referenciados o BenchMark-BM's) en cada uno de los extremos, por fuera del área que se quiere monitorear. Es deseable que los puntos sean inter-visibles desde la superficie del terreno. Dentro del área de monitoreo, se materializan puntos (estacas) con separación de 5 a 20 m, dependiendo del ancho del área de monitoreo.



Fuente: OCENSA.

Figura 5.2 Construcción de BM o puntos fijos en el terreno⁶⁰

⁶⁰ A partir de los cuales se realizan los monitoreos topográficos de mojones en la masa en movimiento.

El procedimiento de medición consiste en apoyarse en uno de los puntos fijos (que deben tener una durabilidad superior al tiempo en que se requieran las mediciones), luego asegurarse que los puntos fijos lo sean o determinar los desplazamientos relativos entre dichos puntos fijos como se observa en la siguiente figura.



Fuente: Plan de Inspección y Monitoreo Geotécnico GCC, YPFB Transporte S.A.

Figura 5.3 Monitoreo topográfico mediante alineamiento con puntos de control fijos

Con este procedimiento también se puede medir rápidamente el avance de la socavación lateral de un río. La pérdida de alguno de los postes indica el avance de la socavación, y conociendo el espaciamiento entre elementos se puede conocer la magnitud de avance del proceso.

Una de las formas de realizar la medición se desarrolla replanteando el alineamiento y verificando con ayuda de plomada y cinta métrica el desplazamiento de cada punto, con respecto al alineamiento recto original. El alineamiento se puede controlar con hilo tenso, o con el teodolito. Con este procedimiento se logra una aproximación del orden de 1 mm y tiene un rango amplio de medición del orden de los decímetros.

Otra forma, consiste en que -una vez instalados los puntos de control- se procede a realizar las lecturas por medio de un equipo topográfico (Estación Total), que se arma en los puntos fijos o hitos topográficos. Se toman las lecturas iniciales de los hitos ubicados por fuera del área de monitoreo para referenciar sus distancias relativas. Estas medidas deben ser realizadas con varias lecturas al mismo punto con el fin de mejorar la precisión de la localización de cada uno de los hitos. Las siguientes lecturas son de calibración y permiten detectar la inclinación o verticalidad inicial que tiene cada uno de los segmentos de las estacas instaladas.

En la fase de monitoreo es necesario realizar dos lecturas consecutivas en cada dirección, y la diferencia entre las dos lecturas debe ser menor al 1% o de lo contrario se procede a realizar una tercera medición.

Este procedimiento tiene limitaciones en terrenos quebrados, donde no se pueda garantizar la intervisibilidad entre los puntos fijos o donde no haya posibilidad de encontrar puntos fijos. Si existe la posibilidad de movimiento de los puntos fijos se pueden realizar localizaciones de dichos puntos siguiendo procedimientos geodésicos de precisión de primer orden y realizar los ajustes relativos en los puntos móviles.



Una vez que se verifica la pérdida de alineamiento o la desaparición de alguno de los postes, éstas son la evidencia del desplazamiento o avance de la socavación (Figura 5.3).

5.2.2. GPS-RTK

El sistema de GPS determina las coordenadas de un punto con base en la detección de señales que envían los satélites del sistema de posicionamiento global. Este sistema tiene una aproximación de baja precisión, sin embargo, al utilizar dos receptores, uno de ellos fijo sobre un punto de coordenadas conocidas, es posible -mediante un proceso de análisis de los datos captados (post proceso)- determinar las diferencias de las señales en el receptor fijo, y con estas diferencias corregir las lecturas en el receptor móvil. Para que el análisis funcione, se debe garantizar que los dos receptores capten las señales de los mismos satélites; esto impone que la separación entre los receptores sea de alrededor de 10 km o menos.

En el sistema RTK (*Real Time Kinetic* por su sigla en inglés) los receptores tienen la capacidad de comunicarse entre sí y realizar los análisis de las diferencias en las señales y realizar los correctivos en el receptor móvil, con lo cual se obtiene el valor de las coordenadas con aproximación sub-centimétrica y en un rango muy amplio.

El procedimiento de monitoreo consiste en la materialización de una nube de puntos en el área de monitoreo, incluyendo algunos puntos por fuera de dicho área en sitios estables; se deben localizar las pilastras de la red geodésica oficial en la vecindad del área de monitoreo, desde donde apoyar el receptor fijo. Si no existen puntos en la vecindad, es necesario materializar por lo menos uno en la vecindad y darle las coordenadas con procedimientos geodésicos de precisión de primer orden. Posteriormente se determinan las coordenadas de cada punto materializado, con el receptor móvil y con la frecuencia que permita determinar los desplazamientos de cada uno de los puntos de control, mediante la comparación de las coordenadas obtenidas en las diferentes campañas de medición.

Este procedimiento tiene limitaciones, en terrenos encañonados o boscosos, que limitan la recepción de las señales de los satélites.

5.2.3. Con estación total y prismas

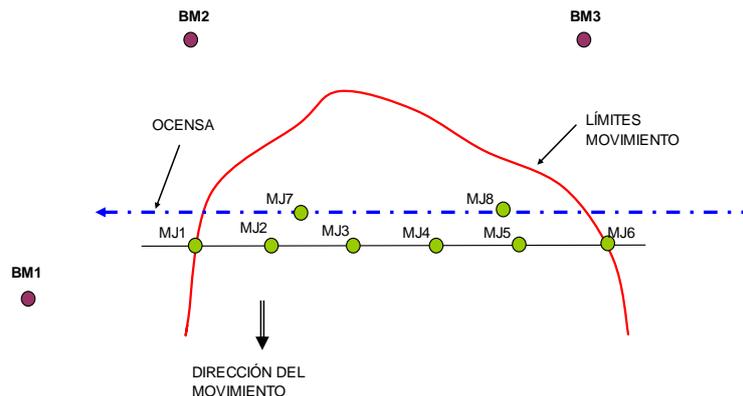
Este podría considerarse el método topográfico tradicional, sin embargo se ha considerado poco confiable por las limitaciones en la precisión. Si se adoptan procedimientos de medición tendientes a lograr precisión geodésica de primer orden, es un método bastante fiable.

Para labores de monitoreo se requiere una estación con aproximación de lectura angular de máximo un segundo. Para centrar el equipo en los puntos ocupados se debe utilizar una plomada tradicional (la plomada óptica puede inducir algunas imprecisiones). La lectura a los puntos se debe realizar directamente al punto o al hilo de la plomada. Todas las lecturas deben ser redundantes, leyendo en posición directa e inversa o transitada por lo menos tres (3) veces cada medición.

Los prismas deben ser fijos, incluso se utilizan atornillados al punto de control. Esta recomendación en algunos casos puede ser impráctica, entonces habría que apoyar el prisma en un trípode, centrado sobre el punto de control con plomada tradicional (el uso de bastones no se recomienda debido a que induce errores importantes en la medición).

Se deben materializar varios puntos desde donde realizar las mediciones (BM); estos puntos deben localizarse en sitios donde la variación de la posición sea mínima, por lo menos 3 de ellos deben ser intervisibles, en cada área de monitoreo. En el área de monitoreo se materializan los puntos de control (mojones), con materiales durables, en la cantidad y disposición que permita determinar los movimientos del terreno, de acuerdo con el diseño realizado.

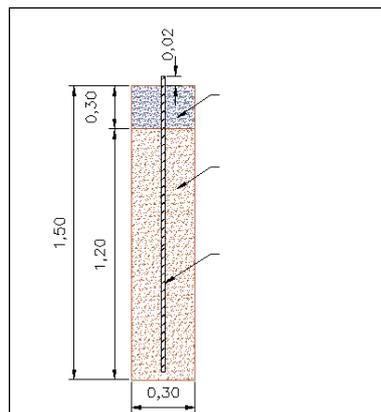
Una configuración típica de localización de los BM y los mojones cuando existe un movimiento que afecta el DDV se puede ver en la Figura 5.4.



Fuente: Procedimiento de monitoreo topográfico, OCENSA.

Figura 5.4 Ubicación de los mojones si el movimiento es perpendicular al ducto

Una propuesta es construir los mojones de concreto reforzados con una varilla en la mitad. De esa manera se tiene un punto de control duradero, dado que para los movimientos tipo reptación o para el control de estabilidad de obras existentes, las lecturas pueden prolongarse varios años (Figura 5.5).



Fuente: Procedimiento de monitoreo topográfico, OCENSA.

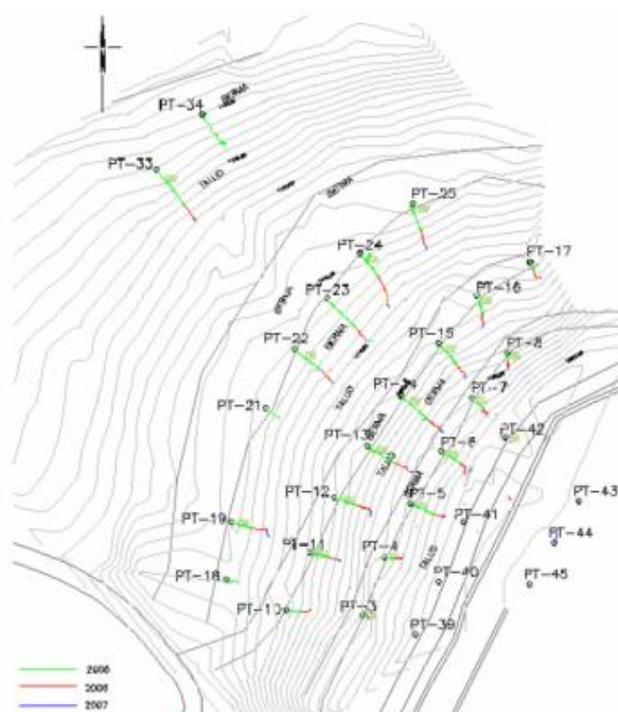
Figura 5.5 Puntos de control topográfico

Cada punto de control se debe leer por lo menos desde dos de los puntos de apoyo BM. Los puntos de apoyo se deben controlar entre sí y se deben verificar sus coordenadas en cada campaña de lectura con procedimiento geodésico de primer orden, con apoyo en puntos de la red geodésica oficial, y se debe adelantar un análisis de la información que permita determinar en cada campaña la aproximación del procedimiento de medición.



En relación con la presentación de los resultados, se debe entregar una cartera con la información de las mediciones realizadas durante el levantamiento topográfico, siguiendo la codificación y el orden de cada sitio (identificado mediante el KP), de cada BM y de cada mojón. En hoja electrónica se deben presentar las coordenadas y cota encontradas para los mojones leídos, así como las lecturas iniciales y anteriores. Derivados de las diferencias de coordenadas y cotas, se presentan los movimientos de cada mojón entre lecturas y con respecto a la lectura inicial, así como la velocidad del movimiento. Se debe entregar copia de la cartera topográfica física y digital, y memoria de la precisión obtenida en el cierre de la poligonal de los BM de cada punto de monitoreo. Esta poligonal no debe variar entre lecturas de diferentes épocas, dado que estos son los puntos fijos.

Se presenta archivo fotográfico de cada sitio con panorámicas y detalles específicos, así como mapa del sitio (levantamiento topográfico realizado en la primera lectura) con la ubicación inicial de los mojones y vectores de desplazamiento de manera que se puedan ver gráficamente la dirección y magnitud del desplazamiento. Los vectores de desplazamiento deben estar a una escala gráfica menor que la del plano para que se visualicen exagerados los movimientos. Se deben usar convenciones de colores para diferenciar los movimientos ocurridos en diferentes épocas de la observación, dividiéndolas por años (ver Figura 5.6).



Fuente: Procedimiento de monitoreo topográfico, OCENSA.

Figura 5.6 Vista en planta de los vectores de desplazamiento de los mojones

5.3. MONITOREO BATIMÉTRICO

Este monitoreo determina la profundidad de la cobertura del ducto y el desarrollo de procesos de socavación en cruces de corrientes. Éste debe ser tomado con intervalos de al menos cinco años en las corrientes navegables, como lo requiere la Norma CFR Parte 195.412(b), además debe existir un control en todos los cruces con una cobertura mínima de 1,2 m, según el criterio de tapado de la



Norma ASME B 31.461. En cruces de ríos y quebradas no navegables deben realizarse de acuerdo a los regímenes de socavación establecidos en los estudios hidrológicos y a la experiencia del grupo de mantenimiento civil.

En relación con los requerimientos de tapado, el espesor de la cobertura, definido como la distancia entre la parte superior del ducto (cota clave) y la superficie del terreno, debe corresponder a lo enunciado en la tabla siguiente:

| Zona | Cobertura cm (in) |
|--|-------------------|
| Áreas industriales, comerciales y residenciales | 121 (48) |
| Cruce de cuerpos de agua con un ancho mayor a 30,5 m | 121 (48) |
| Zanjas de drenaje en carreteras o carrileras | 121 (48) |
| Zonas seguras de puertos en aguas profundas | 121 (48) |
| Áreas de costa afuera en donde el nivel del agua es menor a 3,7 m medido en marea baja | 91 (36) |
| Cualquier otra área | 91 (36) |

Fuente: Tabla 434.6 (a) ASME B31.4

Tabla 5.1. Cobertura mínima para ducto enterrado

Por lo general, para realizar el levantamiento se ejecuta una serie de pasos mínimos que permiten asegurar la calidad y validez de la información levantada, a saber:

1. Verificar la localización del sitio del cruce de la línea de transporte, para lo cual normalmente se emplea un navegador GPS para ubicar las coordenadas de la línea en el sitio de cruce.
2. Demarcar el ducto y su profundidad, gracias a un detector electrónico (véase la Figura 5.7)



Fuente: Procedimiento de monitoreo batimétrico, OCENSA.

Figura 5.7 Actividades de detección y demarcación del ducto

⁶¹ Capítulo 5 "Construcción, Soldadura y Ensamblaje", sección 4.3.4, página 39



3. Materializar y geo-referenciar por lo menos dos puntos fijos (BM) de referencia en los márgenes del río con visual entre ellos, desde los cuales se pueda observar la mayor parte posible del área a levantar (véase las Figuras 5.8 y 5.9).



Fuente: Procedimiento de monitoreo batimétrico, OCENSA.

Figura 5.8 Construcción de mojones de referencia



Fuente: Procedimiento de monitoreo batimétrico, OCENSA.

Figura 5.9 GPS de doble frecuencia

Posteriormente, en función de los niveles de agua, se pueden emplear como métodos de levantamiento batimétrico el topográfico, para los casos en los que los niveles de agua son bajos, y con ecosonda cuando los niveles son muy altos y no se puede hacer vadeo.

En el primer caso, (topográfico) se emplea una comisión de topografía convencional, la cual debe efectuar las siguientes actividades:

1. Instalar una línea de vida en cada uno de los cortes del río a levantar (véase la Figura 5.10).



Fuente: Procedimiento de monitoreo batimétrico, OCENSA.

Figura 5.10 Instalación de línea de vida

2. Realizar levantamiento con la estación total y prisma, y a partir de los elementos de referencia o mojones geo referenciados, levantando puntos en toda la superficie del terreno y tomando cortes longitudinales y transversales al cauce del río (incluido por lo menos uno sobre el eje del ducto y dos cortes adicionales a cada lado de este – véase la Figura 5.11), cuya separación y cantidad son función de las necesidades identificadas por los especialistas en el tema.



Fuente: Procedimiento de monitoreo batimétrico, OCENSA.

Figura 5.11 Armado de la estación en margen del río para levantamiento de secciones y detalles

En el segundo caso (con ecosonda), se emplea otra metodología que, en función de las facilidades disponibles, debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Realizar un planeamiento de las líneas batimétricas a levantar, con el fin de dirigir la embarcación en la dirección correcta, asegurándose que los cortes se realicen en el sitio requerido.
2. Contar con un software especial para batimetrías. Este software se instala en un computador portátil ubicado en la embarcación, al cual se le conecta el GPS de doble frecuencia y la ecosonda.

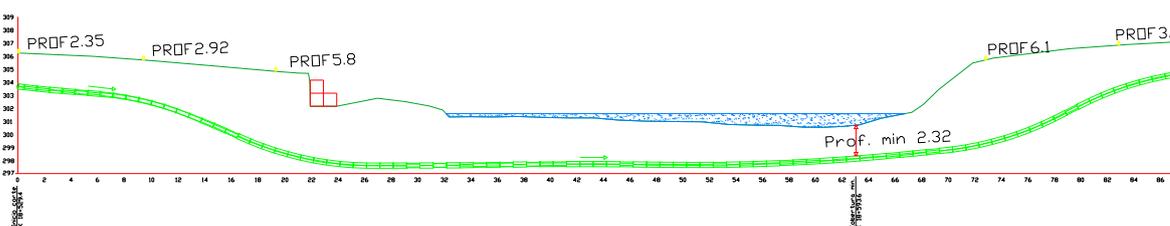


En caso de no contar con estos medios se deben materializar guías en las orillas y dirigir la embarcación con una estación desde un mojón georreferenciado en tierra.

3. Calibrar la ecosonda en un punto de poca corriente con profundidad conocida (la profundidad se puede medir con una cuerda graduada lastrada). La velocidad de onda de la ecosonda debe graduarse hasta que la profundidad calculada por la ecosonda sea igual a la profundidad medida manualmente en el punto.
4. Con un equipo GPS base de doble frecuencia en uno de los mojoneros georreferenciados de la orilla tomar datos durante todo el levantamiento batimétrico. Con base en estas mediciones se hace el post-proceso de los datos tomados durante el levantamiento. Otro receptor GPS debe estar en la embarcación propulsada a utilizar.
5. Se debe sincronizar la ecosonda con los equipos GPS en tiempo, teniendo en cuenta la velocidad de navegación, ya que esto influye en la calidad y cantidad de los puntos que describen el perfil del cauce.
6. Realizar una sección de prueba, para revisar la calibración y sincronización de los equipos. Esta sección se verifica con tres puntos con profundidad conocida.

En cualquiera de los dos casos (levantamiento batimétrico topográfico o con ecosonda), el objetivo es que con base en esos puntos del cauce y los puntos obtenidos en superficie se realice un plano en planta del río con curvas de nivel y otro plano que contenga las secciones batimétricas realizadas.

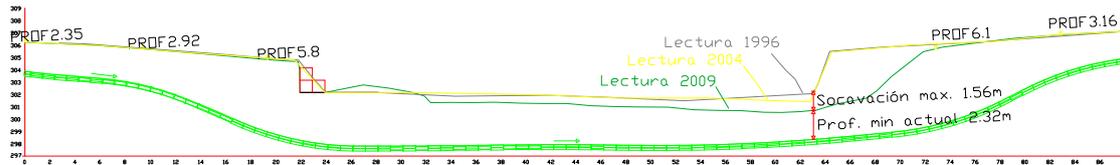
Del mismo modo, en el perfil trazado sobre el eje del ducto, se debe localizar y dibujar éste con su respectivo alineamiento a partir de las coordenadas obtenidas con la herramienta inercial (véase el ejemplo de la Figura 5.12). Esto, para determinar el estado de cobertura del ducto a lo largo del cruce e identificar su valor mínimo, verificando el cumplimiento de la norma ASME B31.4. Las cotas del ducto deben tomarse con base en la detección y profundidad del mismo, obtenidas en campo con detector electrónico, y verificadas con apique a cada lado del río.



Fuente: SOLSIN, 2009. Estudio batimétrico en 10 cruces subfluviales. Informe realizado para OCENSA.

Figura 5.12 Localización del ducto en la sección transversal

Una vez que se cuente con más de un levantamiento batimétrico, se debe realizar un comparativo gráfico entre ellas, de la sección transversal del río sobre el ducto (véase el ejemplo de la Figura 5.13). Con estos datos se analiza la evolución que ha tenido el cauce con respecto a las lecturas anteriores, y se establece una tasa de socavación máxima según el cambio detectado en las secciones transversales.



Fuente: SOLSIN, 2009. Estudio batimétrico en 10 cruces subfluviales. Informe realizado para OCENSA.

Figura 5.13 Comparación con batimetrías anteriores

Cuando sea posible, es necesario emplear información complementaria, para establecer el nivel de amenaza del ducto. Básicamente, se deben conocer las coordenadas XYZ del eje del ducto (obtenidas a partir de los planos *as-built* o de la información de mapeo inercial de las corridas de herramienta inteligente) y se comparan con la topografía del fondo del cauce (obtenida a partir del levantamiento directo o con ecosonda). Cuando se identifica que puede existir un tramo de ducto destapado, se puede complementar con metodologías que permitan diferenciar el ducto de la superficie del terreno, y estimar pérdidas de cobertura. Algunas de ellas se conocen como *side scan sonar* y *Geosismic sub bottom profiler*. De todas maneras, es importante verificar en forma directa, con ayuda de buzos certificados, la situación del ducto en el lecho de la corriente, siempre que sea posible.

5.4. MONITOREO DE NIVEL DE RÍOS

Este monitoreo se realiza con el propósito de conocer el comportamiento de los ríos, su estacionalidad, y básicamente para determinar los niveles del agua en los puntos de interés. Regularmente los niveles máximos están relacionados con los máximos de las lluvias ocurridas en el sector o región aledaña. Al monitorear el nivel de un río o quebrada se puede: identificar la ocurrencia de una inundación; identificar la formación de una avenida torrencial que pueda socavar y destapar un cruce subfluvial o alcanzar el ducto y su estructura de soporte en un cruce aéreo; o determinar tasas de desplazamiento de una mancha de hidrocarburo en el caso de una fuga.

Para mejor comprensión de los resultados, la medición de niveles se debe complementar con estudios batimétricos e hidrológicos del río y su cuenca, de manera que se conozcan los niveles mínimos y máximos para diferentes periodos de retorno, sus caudales y velocidades, y con ello calcular la socavación o dimensión de la inundación. Enlazados con monitoreo de lluvias se pueden encontrar la magnitud de las lluvias que genera cierto tipo de fenómenos.

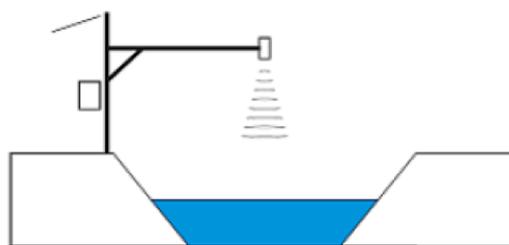
Los niveles, caudales y cursos de agua están estrechamente ligados al contexto geográfico: relieve, naturaleza, grado de alteración de las rocas, clima, cobertura vegetal; todos ellos se combinan para constituir los rasgos distintivos de la hidrología de cada sector.

Para la medición de los niveles de agua de los ríos de interés se pueden emplear “miras” o “limnímetros”, que han sido la metodología más conocida y normalmente empleada por las instituciones gubernamentales que rigen el tema, para control y monitoreo de caudales y su relación con las precipitaciones registradas en la cuenca del río en análisis. Sin embargo, no siempre coincide la instalación de estos elementos con el sitio de cruce de infraestructura de transporte de hidrocarburos, razón por la cual además de ellos, se pueden utilizar equipos tecnológicos como los medidores con sensores de ultrasonido, los cuales son utilizados para medir el nivel del líquido en ríos, canales y otros; su versión inalámbrica permite la instalación en lugares de difícil acceso y el envío de información en tiempo real. La medición de nivel es continua y los dispositivos se configuran de forma que envíen la



información a intervalos regulares, típicamente desde una medición cada 3 minutos hasta una medición diaria. Funcionan con 220 V o panel solar y necesitan de un mínimo mantenimiento.

Entre los sensores electrónicos más usados se encuentran los sensores ultrasónicos, los cuales mediante ondas de diversas longitudes y frecuencias permiten determinar el nivel del río sin tener contacto con la lámina de agua, característica que posibilita la ejecución de obras civiles menos robustas para su instalación (ver la Figura 5.14).



Fuente: Estación del IDEAM en Puerto Salgar en Río Magdalena.

Figura 5.14 Imagen de un sensor de nivel de ríos



Estos sensores se instalan en soportes con brazo como el de la Figura 5.14, o en estructuras existentes como puentes o cruces de ductos. Si tienen el complemento para envío de información de forma remota es posible conocer el nivel o la ocurrencia de una creciente/inundación de forma casi inmediata.

5.5. MONITOREO MEDIANTE INCLINÓMETROS.

En sitios donde se requiere información específica, se emplean instrumentos diseñados especialmente para medir la respuesta del suelo a ciertas variaciones en las condiciones geotécnicas. Entre los instrumentos más comúnmente utilizados en el monitoreo geotécnico convencional están los inclinómetros.

El inclinómetro mide el cambio de inclinación de un tubo que se coloca en una perforación dentro del talud y, de esta manera, se calcula la distribución de los movimientos laterales⁶². Éstos se utilizan para conocer las tasas de desplazamiento del perfil del suelo y su dirección, y para conocer la profundidad de la superficie de falla, lo cual es posible gracias a la medición de las deformaciones angulares que se realizan al interior de un ducto que se instala mediante una perforación. Durante la ejecución de esta perforación, es deseable obtener un registro continuo de los materiales encontrados con algunos ensayos de laboratorio y el criterio de un especialista.

Los inclinómetros consisten en una tubería de fibra de vidrio como se muestra en la Figura 5.15, comercializada en varios diámetros (véase la Figura 5.16), y cuyas lecturas se realizan a través de un “torpedo” al cual se sujeta un cable de control y una unidad para captura de información, como se muestra en las Figuras 5.15 y 5.16. Las ranuras longitudinales que se observan al interior de la tubería, sirven para controlar la orientación del torpedo y proveen una superficie desde la cual se pueden hacer lecturas repetibles.



Fuente: Roctest y Telemac.

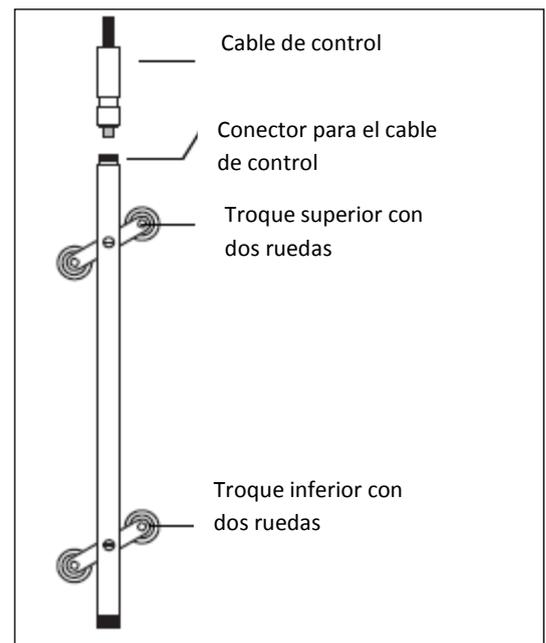
Figura 5.15 Tubería en fibra de vidrio ranurada diametralmente

⁶² Suárez J, *Deslizamientos, tomo I: Análisis geotécnico, 2009*



Fuente: Slope Indicator.

Figura 5.16 Diámetros de las tuberías de los inclinómetros



Fuente: Slope Indicator.

Figura 5.17 Torpedo de lecturas

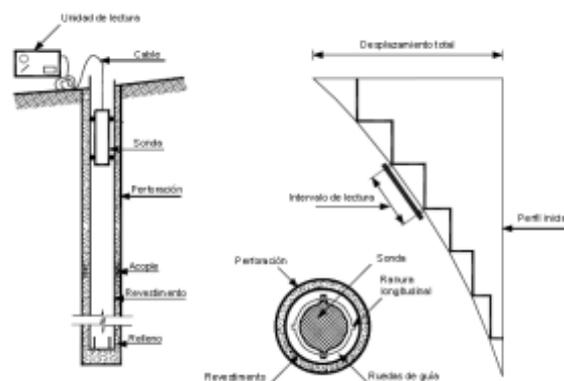
El torpedo que se introduce dentro de la tubería para hacer las lecturas es un tubo rígido, de 2,54 cm (1 pulgada) de diámetro, con dos troques articulados en sus extremos, cada uno con dos ruedas, todas en un mismo plano. Estos troques se pueden ecualizar y ajustar mediante resortes de tal manera que garantizan un buen contacto entre las ruedas del torpedo y las ranuras de la tubería, permitiendo hacer coincidir el eje del torpedo con el eje de la tubería.

El cable de control se usa para controlar la profundidad del torpedo dentro de la tubería del inclinómetro, y para conducir la energía al torpedo y retornar la señal a la unidad o consola de lectura. Los cables cuentan con marcas de color amarillo cada 0,50 m, y otras de color rojo cada 1,0 m.

Se debe utilizar una polea ensamblada a la tubería para lograr un adecuado control de la profundidad. Al emplear esta polea debe haber una distancia de unos 0,32 m entre la parte superior de la tubería y la parte inferior del chasis de la polea, información que debe tenerse en cuenta al ajustar la profundidad a la cual se hace la lectura en la consola. Se deben usar las marcas del cable de control y la parte superior del chasis de la polea como referencia. Siempre debe usarse la polea para impedir que haya variaciones importantes en la profundidad de lectura, que dañan las mediciones.

La tubería se instala dentro de una perforación localizada en un terreno en el que se sospecha que están o pueden ocurrir movimientos. La parte inferior de la tubería siempre va anclada en terreno natural estable, el cual debe ser verificado y validado por un especialista en geotecnia. Otros operadores en la región han empleado valores de anclaje entre los tres (3) y cinco (5) metros.

El torpedo se usa para medir la posición inicial de la tubería cuando acaba de ser instalada, y posteriormente para medir la posición de la tubería en el tiempo, como se observa en la Figura 5.18, para el caso de lecturas con torpedo. Los movimientos del terreno hacen que la tubería se mueva de su posición inicial. La velocidad, profundidad y magnitud de estos movimientos se calculan comparando los datos de posición inicial de la tubería con los tomados posteriormente, para cada fecha de lectura.



Fuente: Hanna (1985) citado en Suárez J. (2009).

Figura 5.18 Esquema del aspecto de un inclinómetro y de las lecturas con torpedo

Existen diferentes tipos de inclinómetros, algunos con sistemas de adquisición de datos, otros con sistemas de monitoreo de deformación en tiempo real por medio sistemas microelectromecánicos,



sobre los cuales el lector puede profundizar; sin embargo, se encuentran limitaciones en las deformaciones, de modo tal que sean compatibles con las que pueden tener efectos en el ducto.

Los instrumentos difieren de acuerdo con el tipo de sensor utilizado, el cual da un nivel determinado de precisión. Generalmente, los inclinómetros pueden medir deformaciones de 1,3 a 2,5 mm, en una longitud de 33 m, equivalente a una precisión 1:10.000.

5.5.1. Instalación de inclinómetros

Las perforaciones donde se instalan inclinómetros se realizan de diámetro superior al diámetro de la tubería de fibra de vidrio a instalar, de modo que permita su adecuada fijación y que no se presenten deformaciones durante la instalación. Se debe instalar a una profundidad que permita fijar el elemento en un sustrato competente, que no esté involucrado en el movimiento (preferiblemente roca), de por lo menos tres (3) metros.

Al instalar el inclinómetro se debe garantizar que una de las ranuras quede en el mismo sentido en que se espera que ocurra el movimiento, el cual se denomina Sentido A. Las ranuras ubicadas a 90° del Sentido A constituyen el denominado Sentido B, y permiten controlar una orientación en la que no se esperan mayores movimientos.

Se deben tener en cuenta las uniones. Se prefieren las uniones telescópicas a los otros tipos de unión, sin embargo, se aceptan acoples estándar o secciones telescópicas.

En perforaciones sin revestimiento, el espaciamiento mínimo entre la tubería del inclinómetro y las paredes de la perforación debe ser de 5 mm. En perforaciones revestidas puede ser de 1,25 mm. Este espacio debe llenarse con lechada.

La lechada que se debe usar para fijar el inclinómetro al terreno es una mezcla homogénea de cemento y agua, hecha de acuerdo con los procedimientos normales para fabricación de lechadas. Para un suelo con rigidez intermedia, puede usarse una mezcla de agua (100 l), cemento portland (25 kg) y bentonita (10 kg).

En cada junta de uniones o acoples, se deben instalar seis remaches. Para longitudes de instrumento de más de 20 m se deben colocar ocho remaches en cada junta. Se recomienda que, una vez ensambladas la tubería y los acoples, se envuelvan todas las juntas con cinta adhesiva de tela, cinta densa o equivalente. Se debe tener cuidado de que los remaches no coincidan con las ranuras, porque esto desvía al torpedo de lectura en su recorrido.

En el caso de uniones telescópicas, los tornillos se ajustan a los acoples. El emplazamiento de los tornillos en los agujeros asegura un buen alineamiento. Se deben colocar totalmente extendidas.

Es necesario instalar un tapón inferior, que se coloca en la parte inferior de la tubería del inclinómetro, para prevenir la entrada de lechada dentro de la misma. Se asegura a la parte inferior



de la tubería por medio de silicona y remaches. Se debe verificar que el tapón no quede chocando con las ruedas inferiores del torpedo de medición.

Finalmente, se coloca un tapón en la parte superior de la tubería y se construye la caja de protección, que debe tener tapa protectora de acceso asegurada con candado. Se debe tener en cuenta que la polea para las lecturas debe unirse a la parte superior de la tubería, por lo tanto debe asegurarse que la parte superior de la tubería sea accesible y que quede suficiente espacio alrededor de ella para colocar la polea y ensamblarla.

Para la aceptación a satisfacción del inclinómetro, es necesario verificar que el instrumento cuente con los siguientes aspectos, sin detrimento de lo mencionado en el resto de este documento:

- Localización: Latitud, Longitud y Cota.
- Nomenclatura de codificación empleada.
- Fecha de inicio y finalización de la perforación.
- Profundidad de la perforación y longitud de la tubería instalada.
- Perfil estratigráfico del subsuelo en donde está instalado el inclinómetro. La descripción de los materiales encontrados y su origen debe ser realizada por un profesional competente.
- Fecha de instalación de la tubería.
- Dirección del sentido A+ con respecto al norte, leída con brújula.
- Verificación de la lechada.

5.5.2. Lecturas de inclinómetros

Después de que el tubo del inclinómetro ha sido instalado y la lechada se ha cementado, se introduce el torpedo para verificar que no haya obstrucciones dentro del tubo. Para este propósito, se recomienda utilizar un torpedo falso, para evitar el riesgo de daño del torpedo. Debe usarse el mismo torpedo y cable para un inclinómetro todo el tiempo de monitoreo. En caso de que esto no sea posible, debe hacerse el correspondiente reporte en las memorias de cálculo y en el informe de lectura respectivo.

En el proceso de medición se deben tener las siguientes precauciones:

- Esperar 10 minutos para que el torpedo se ajuste a la temperatura de la perforación.
- Esperar que las lecturas se estabilicen tanto como sea posible. Si las lecturas no se estabilizan se debe grabar una lectura promedio.
- Siempre se deben hacer lecturas introduciendo el torpedo por el sentido A y luego por el sentido B.
- El torpedo no debe golpearse contra superficies duras para evitar daños en los sensores.
- No se debe permitir la presencia de humedad en las conexiones eléctricas.
- El cable debe transportarse de forma que no se doble.
- El torpedo debe tener el mantenimiento recomendado por el fabricante.

Para la lectura inicial se deben hacer dos mediciones introduciendo el torpedo con las ruedas superiores de los dos troques en la dirección del sentido A_0 (A^+), y dos con las ruedas inferiores



orientadas en este mismo sentido. Asimismo, se deben hacer dos lecturas introduciendo el torpedo por las ruedas superiores de los dos troques orientadas hacia el sentido B₀ (B⁺) y dos con las ruedas inferiores orientadas por este mismo sentido. De esta manera, se puede calcular un desplazamiento entre lecturas que debe ser cero (0); de no ser así, esto indica que hubo problemas en la ejecución de las lecturas y se deben repetir.

5.5.3. Presentación de resultados

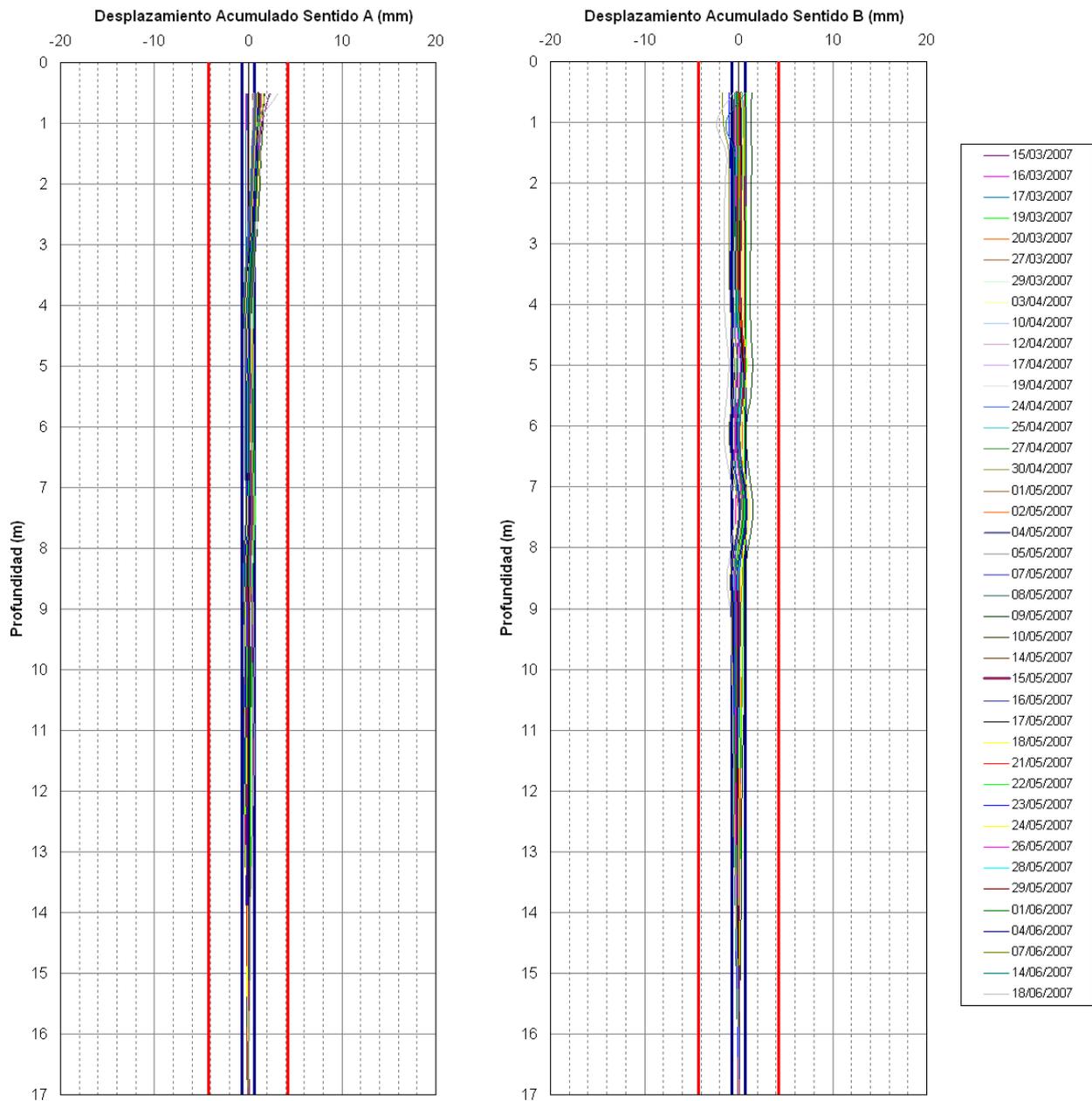
Para caracterizar correctamente el movimiento se deben entregar los siguientes gráficos:

- Desplazamiento acumulado vs. profundidad del inclinómetro, tanto para el sentido A como para el sentido B.
- Desplazamiento acumulado en sentido A vs. desplazamiento acumulado en sentido B. En esta última siempre se debe incluir el norte geográfico.
- Desplazamiento acumulado vs. fecha, para varias profundidades de interés de acuerdo con el comportamiento registrado por el equipo, tanto para el sentido A como para el sentido B.

Se recomienda que la escala horizontal para presentación de las gráficas de variación de los desplazamientos y movimientos con la profundidad, sea como máximo de ± 25 mm.

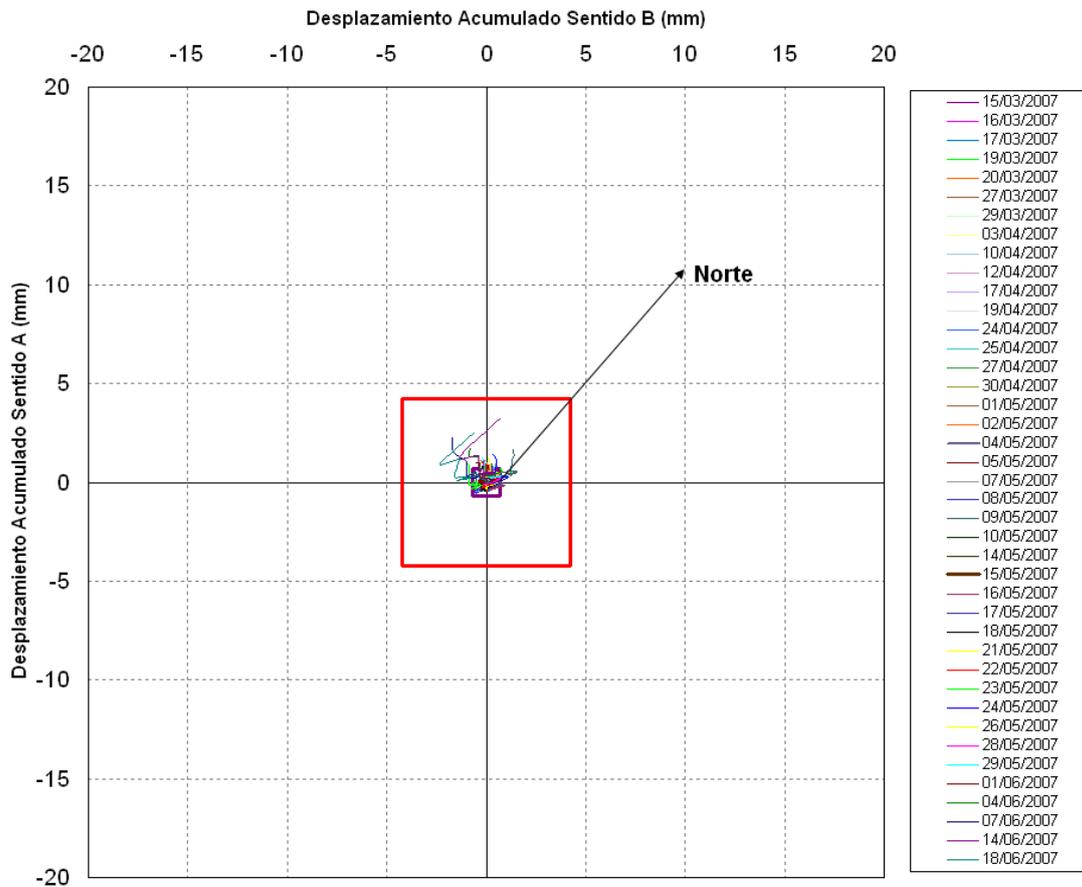
Los fabricantes tienen establecidos rangos de precisión de los equipos, de manera que se habla de una precisión aleatoria y se refiere a la que tiene el equipo por defectos de fábrica, la cual se ha establecido aproximadamente en 1,27 mm (0,05 pulgadas) por cada 30,48 m (100 pies) de longitud de inclinómetro. Además, se habla de una precisión total que se refiere a la obtenida en respuesta a la metodología de lectura, la cual se ha establecido en 7,62 mm (0,3 pulgadas) por cada 30,48 m (100 pies) de inclinómetros. Las gráficas de variación de los desplazamientos acumulados con la profundidad deben incluir estos rangos para determinar la importancia de los desplazamientos ocurridos.

En las Figuras 5.19 a 5.21, las líneas rectas de color azul representan la banda de precisión aleatoria, y las de color rojo las de precisión total, de manera que puede verificarse que, en el caso mostrado, los movimientos no son muy importantes y pueden asociarse simplemente a la precisión de los equipos. En estas curvas puede verificarse además que el torpedo de lectura tiene una precisión adecuada, lo cual será una exigencia permanente en el proceso de toma de lecturas.



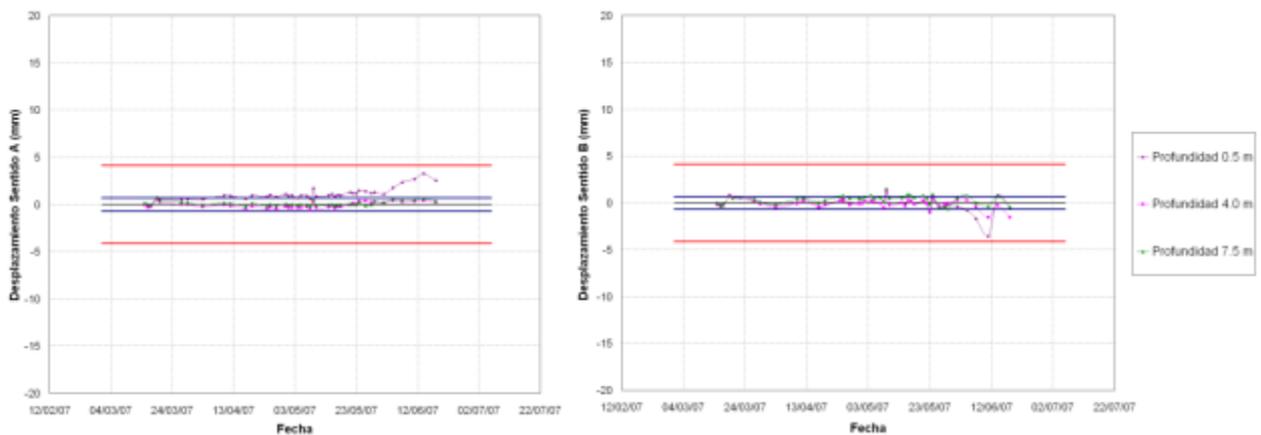
Fuente: Procedimiento "Instalación y lectura de instrumentación geotécnica". Elaborado por INTEINSA para OCENSA.

Figura 5.19 Variación de los desplazamientos acumulados con la profundidad



Fuente: Procedimiento "Instalación y lectura de instrumentación geotécnica". Elaborado por INTEINSA para OCENSA.

Figura 5.20 Variación de los desplazamientos en Sentido A con respecto al Sentido B



Fuente: Procedimiento "Instalación y lectura de instrumentación geotécnica". Elaborado por INTEINSA para OCENSA.

Figura 5.21 Desplazamientos acumulados vs. fecha

Además, para evaluar la posibilidad de errores en las lecturas y determinar si se deben hacer correcciones o descartar las lecturas, es necesario presentar las siguientes gráficas:

- Desplazamiento incremental vs. profundidad del inclinómetro.



- Movimiento acumulado vs. profundidad del inclinómetro.
- Movimiento incremental vs. profundidad del inclinómetro.
- Suma de chequeo vs. profundidad del inclinómetro.

5.6. MONITOREO MEDIANTE PIEZÓMETROS

Estos instrumentos (transductores de presión de poros) reportan los niveles de agua y las variaciones de la presión de poros que pueden afectar la estabilidad de la pendiente y los resultados obtenidos pueden ser correlacionados con la información de las lluvias.

El propósito fundamental de un piezómetro es el de medir la presión del agua contenida en una determinada estructura geológica, de tal manera que se puedan correlacionar los movimientos de determinadas estructuras debidos a la presencia del agua, con base en un adecuado modelo geológico-geotécnico. Dependiendo de los requerimientos propios, los piezómetros más utilizados son los de cuerda vibrante (eléctricos), que permiten medir la presión e indirectamente, el nivel freático de un punto determinado de la estructura geológica; y otros que permiten medir directamente el nivel freático e indirectamente la presión.

5.6.1. Piezómetros de hilo vibrátil

Son actualmente muy utilizados los piezómetros de alambre o cuerda vibrátil, por su precisión y porque registran variaciones de presión inmediatamente. Varias apariencias de los piezómetros de alambre vibrátil se muestran en la Figura 5.22. En la parte derecha se muestra un piezómetro multinivel, los cuales se deben emplear cuando se quiere conocer la presión a diferentes profundidades en una misma perforación.

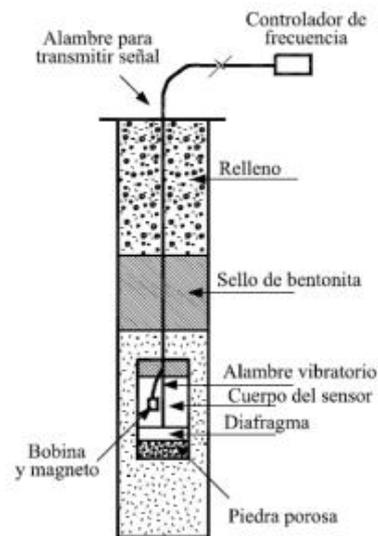


Fuente: Slope Indicator.

Figura 5.22 Piezómetros de alambre vibrátil



El monitoreo se puede realizar de dos formas; una a través de la lectura manual directa con un lector de cuerda vibrante o mediante una estación remota automática con transmisión de datos a distancia, que es la principal ventaja de estos instrumentos.



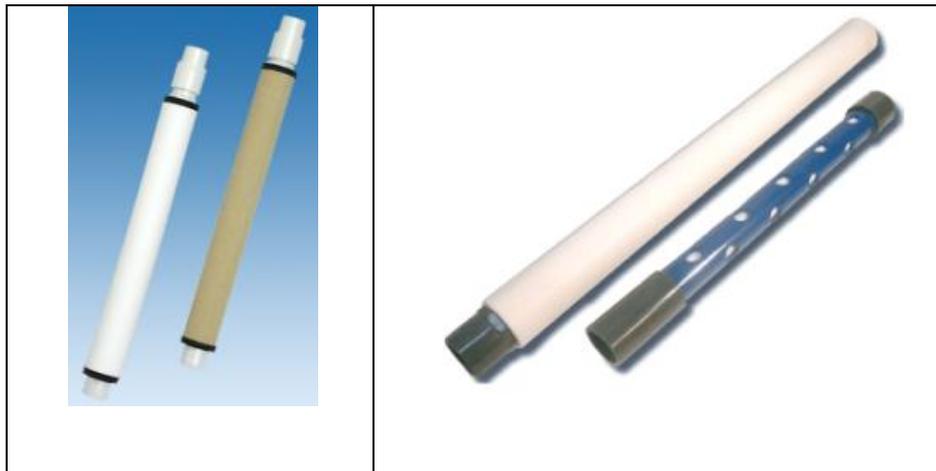
Fuente: Suárez J. (2009).

Figura 5.23 Esquema de piezómetro de cuerda vibrante

5.6.2. Piezómetros de tubo abierto o de Casagrande

Consisten en perforaciones abiertas en las cuales se coloca un tubo perforado. En su base el sensor es inmerso en arena, y en la parte superior se colocan sellos de bentonita para aislar la profundidad de medición. La profundidad del nivel de agua se puede medir por medio de un cable y un elemento sensor. Una cubierta de protección impide la entrada de agua lluvia.

Este tipo de piezómetro se instala dentro de una perforación de por lo menos 75 mm de diámetro que permita alojar un filtro extremo (denominado tipo Casagrande – véase la Figura 5.24) que se une a una tubería vertical plástica, normalmente de PVC. Rodeando la punta se coloca un filtro de arena y encima de éste un sello de bentonita. Posteriormente, todo el espacio entre la tubería y las paredes de la perforación se llenan hasta la superficie con una lechada consistente en una mezcla de bentonita y cemento o con material común.



Fuente: Slope Indicator y Rocctest and Telemac.

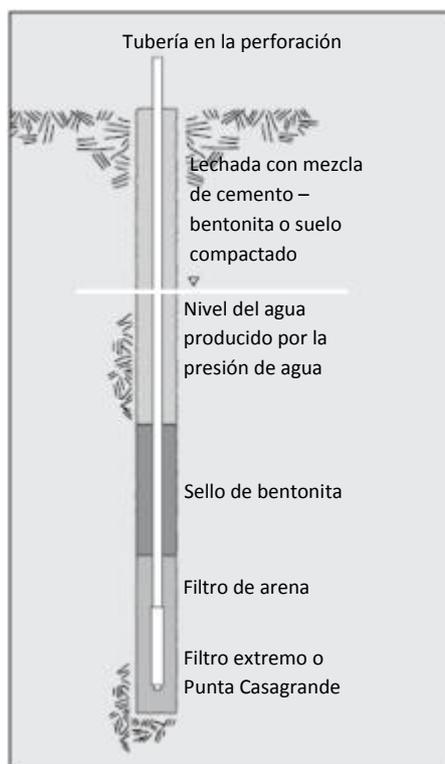
Figura 5.24 Puntas tipo Casagrande

En la Figura 5.26 se muestra el indicador de niveles de agua que se usa para determinar la posición del nivel de agua dentro de la perforación en la que se instalan los piezómetros y en la Figura 5.25 el aspecto de todos los elementos descritos.



Fuente: Slope Indicator.

Figura 5.25 Indicador de niveles de agua



Fuente: Slope Indicator.

Figura 5.26 Piezómetro de tubo abierto

Las ventajas de este tipo de piezómetros con respecto a los otros incluyen las siguientes:

- Sus componentes son muy económicos.
- Es bastante simple de leer.
- Presenta una gran confiabilidad a largo plazo.

Tiene la desventaja de que el tiempo de reacción es mucho mayor que el de los piezómetros eléctricos, especialmente en el caso de suelos fino-granulares de baja permeabilidad.

5.6.3. Instalación de piezómetros de tubo abierto o de Casagrande

La perforación se debe ejecutar hasta la profundidad proyectada manteniendo el diámetro que garantice el adecuado posicionamiento de la punta Casagrande a emplear. Sólo se acepta encamisado y tubería de revestimiento para mantener las paredes durante la ejecución de la perforación y no se permite el uso de mezclas bentoníticas con este fin.

Se deben limpiar todos los elementos del piezómetro con un limpiador adecuado. En las 24 horas previas a la instalación, la piedra porosa debe ser sumergida en un recipiente con agua limpia.

La punta de tipo Casagrande se debe pegar a la tubería de PVC, y esta última se debe ensamblar por medio de uniones roscadas de tubería o con tornillos en las juntas y usando capas de cinta de teflón o teflón líquido en cada junta, según corresponda. Normalmente las roscas de las tuberías dan un sellado



suficientemente bueno de la junta, aunque en caso de ser necesario se puede hacer un sellado con algún pegante que garantice que las medidas se hacen a la profundidad de la punta Casagrande y no más arriba.

Se debe formar una primera capa de relleno común sobre el fondo de la perforación de 200 mm de altura, bentonita en pastillas sobre este hasta alcanzar igual espesor (200 mm) y luego tirar levemente del revestimiento de la misma para mantenerlo un poco arriba de estos niveles. Cuando ésta alcanza el espesor requerido se baja el piezómetro a la perforación. Luego se echa una capa de arena y grava fina para rodear todo el piezómetro y cubrirlo por encima unos 150 mm, e igualmente se vuelve a tirar del revestimiento de la perforación para mantenerlo un poco arriba del nivel de la arena.

Posteriormente se coloca sello de bentonita de 50 cm sobre la capa de arena y grava fina. Una vez más, se arrastra el revestimiento hacia arriba hasta el nivel de la bentonita. El sello de bentonita requiere de 3 horas para su instalación. Se debe mantener la perforación llena de agua para hidratar la bentonita y aislarla del agua freática circundante.

Luego se rellena con una lechada de cemento bentonítico o con suelo compactado. Para el caso del cemento bentonítico se debe tener en cuenta el tipo de suelo, de modo que para suelos duros y medios se suelen usar relaciones al peso de cemento, bentonita, agua de 1,0:0,3:2,5 y para suelos blandos 1,0:0,4:6,6.

Una vez que el nivel del agua se estabilice, lo cual depende de la permeabilidad del suelo adyacente, se coloca un tapón a la tubería; éste siempre debe estar colocado para evitar el ingreso de aguas superficiales. Se debe construir una caja de protección con tapa en la parte superior para impedir el libre acceso a la tubería.

Para la aceptación a satisfacción del piezómetro, es necesario verificar que el instrumento cuente con los siguientes aspectos, sin detrimento de lo mencionado en el resto de este documento:

- Localización: latitud, longitud y altitud.
- Nomenclatura de codificación empleada.
- Fecha de inicio y finalización de la perforación.
- Profundidad de la perforación y longitud de la tubería instalada.
- Perfil estratigráfico del subsuelo en donde está instalado el inclinómetro. La descripción de los materiales encontrados y su origen debe ser realizada por un profesional competente.
- Fecha de instalación de la tubería.
- Cota de instalación del piezómetro y cota de la superficie.
- Lectura inicial de altura de nivel de agua y presión.

5.6.4. Lecturas de piezómetros de tubo abierto o de Casagrande

Previo a la realización de la lectura se debe verificar que el cable graduado del medidor de nivel de agua no tenga añadiduras, empates o desperfectos que hagan que la medida de distancia sea distorsionada.

En superficie, se introduce el sensor en un recipiente con agua y se verifica su correcto funcionamiento. Se gradúa también la sensibilidad del sensor para evitar que se active antes de alcanzar el nivel de agua.



Se deben realizar los siguientes pasos:

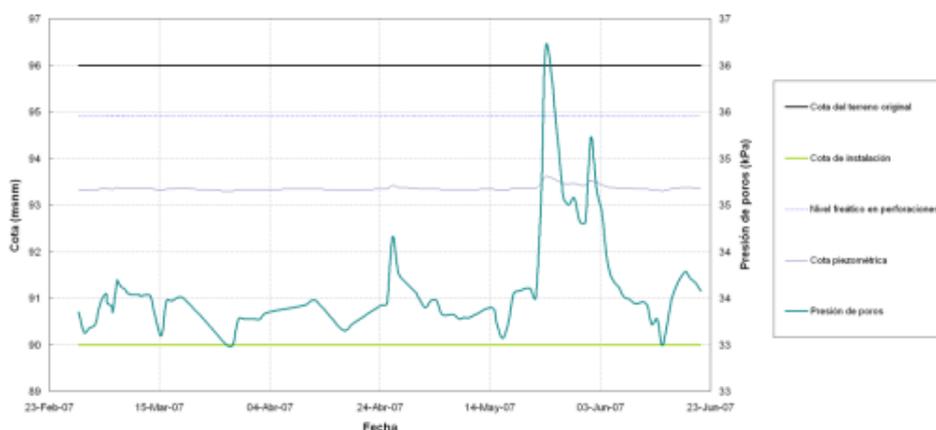
- Se introduce lentamente el indicador de profundidad de nivel dentro de la tubería de PVC. Se debe procurar que la punta del sensor no se pegue a las paredes del tubo, para evitar que gotas de agua adheridas a las paredes del tubo activen el circuito.
- Al momento de encontrar el nivel de agua se cierra el circuito del sensor, se enciende una luz y se activa una alarma sonora.
- Se debe subir nuevamente el sensor unos 50 cm y volver a bajarlo lentamente hasta que se active el circuito. Es posible que el circuito se cierre debido a la humedad antes de alcanzar el nivel de agua, para ello los sensores poseen una perilla que regula la sensibilidad.
- Se toma la lectura, ésta es el número de metros que hay desde la superficie hasta el nivel de agua.
- Se realizan tres lecturas, si alguna difiere más del 1% se debe realizar una cuarta y descartar la más alejada.

Después de cada lectura se deben calcular los siguientes datos:

- Profundidad del nivel del agua con respecto a la superficie.
- Presión, obtenida como la diferencia entre la profundidad de instalación del piezómetro y la profundidad a la que se encontró el nivel de agua.
- Cota piezométrica, obtenida como la suma de la cota de instalación del equipo y la presión, o también como la diferencia entre la cota de la superficie del terreno y la profundidad del nivel del agua. En este punto es importante hacer las correcciones que sean necesarias de acuerdo con el nivel de referencia seleccionado para las medidas.

5.6.5. Presentación de resultados

Los datos de cota piezométrica o presión obtenidos se deben integrar a la serie histórica de lecturas, y elaborar gráficas de variación con el tiempo, tal como se indica en el ejemplo de la Figura 5.27. Cuando se tenga información pluviométrica de una estación cercana se debe adicionar una gráfica de variación de las lluvias diarias con el tiempo, de manera que puedan asociarse las mediciones de presión hechas con el régimen de lluvias.



Fuente: OCENSA.

Figura 5.27 Gráficas para un piezómetro de alambre vibrátil



5.7. MONITOREO MEDIANTE HUMEDÍMETROS

Una forma indirecta de medir los perfiles de saturación del suelo, variaciones de succión matricial y niveles freáticos es mediante mediciones de la humedad. Para ello sería necesario realizar una perforación de exploración con toma de muestras y colocación de medidores de humedad (humedímetros a diferentes profundidades). En laboratorio, para las muestras del perfil encontrado, se puede evaluar la relación humedad-saturación o humedad-succión matricial. De esa manera, cuando se reciban los datos de los instrumentos en campo, se puede relacionar las variaciones de la humedad con la succión matricial del suelo y conocer el momento de saturación. El estado de saturación debido a periodos lluviosos, está generalmente asociado a reducción de la estabilidad de taludes y aceleración de las tasas de desplazamiento del terreno.

5.8. MONITOREO MEDIANTE MARCADORES DE NIVEL DE ARENA

En los tramos de DDV que están definidos en zonas desérticas, se recomienda implementar monitoreos relacionados con el control y seguimiento de las condiciones de viento, asociados a la migración de dunas. Como se menciona en el numeral 3.3.4 relacionado con erosión eólica, de la presente guía, el análisis de este tipo de geoamenaza debe considerar el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas (arenas y limos) que hacen parte de dicho escenario desértico.

En la Figura 5.28, se presenta un ejemplo de monitoreo mediante marcador de nivel de arena, que permite registrar, a lo largo del tiempo, las variaciones de las dunas adyacentes a los DDV.



Fuente: COGA (2014).

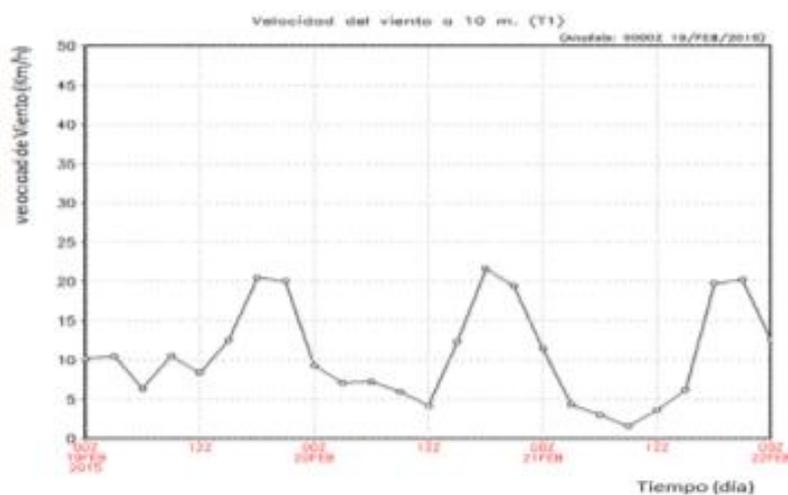
Figura 5.28 Aplicación de marcadores de nivel de arena

Como complemento a la actividad de registro de marcadores de nivel de arena, se destaca que mediante la implementación de las variables meteorológicas (normalmente definidas en una



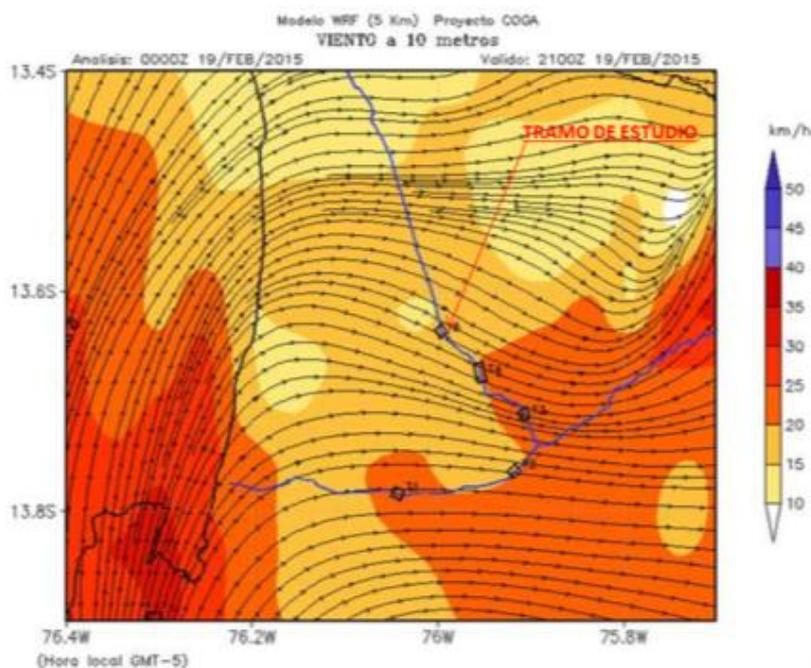
plataforma virtual y remota), se pueden definir y predecir los eventos de vientos que son los que generan las migraciones de las dunas. Para lo anterior, es necesario definir los parámetros de velocidad y dirección del viento a la altura que produce e inicia el transporte de las partículas de arena. De la misma manera, es necesario definir los tramos de estudio en el plan de Mantenimiento e Integridad de la operación del sistema de transporte.

En la Figura 5.29 se presenta un ejemplo de un modelo predictivo de velocidad de viento y en la Figura 5.30 un escenario de dirección de vientos para una fecha establecida.



Fuente: COGA (2015).

Figura 5.29 Pronóstico de velocidades de viento a 10 m



Fuente: COGA (2015).

Figura 5.30 Pronóstico de dirección de viento a 10 m



5.9. MONITOREO EN TÚNELES

En este aparte del capítulo, se quiere reseñar la importancia de controlar la seguridad, la integridad y el funcionamiento de la estructura de un túnel cuando se emplea para el paso de una línea de transporte de hidrocarburos. Normalmente, los túneles en este tipo de sistemas lineales se emplean para unir dos puntos que deben atravesar una zona ambientalmente sensible o geotécnicamente compleja, que no es posible salvar por ningún otro método constructivo y que requieren actividades de monitoreo y mantenimiento del ducto.

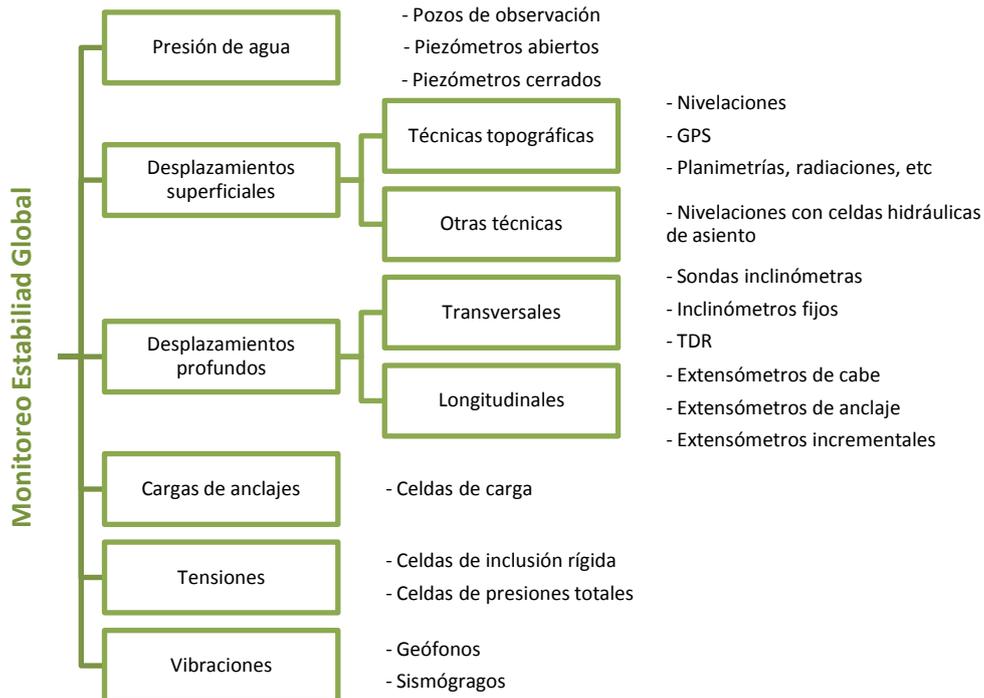
Debido a lo anterior, es importante realizar un seguimiento al comportamiento de esta estructura, razón por la cual el monitoreo en túneles, se conoce también como monitoreo estructural. El sistema consiste en la colocación de sensores a lo largo de la estructura e instalación de alarmas, para detectar la presencia y ubicación de algún daño generado como consecuencia de un sismo u otro tipo de evento.

El monitoreo estructural permite identificar efectos adversos en la estructura de soporte a largo plazo, disminuyendo costos y evitando situaciones críticas que puedan generar daños significativos. Este tipo de monitoreo busca la colocación de varios tipos de sensores a lo largo de la estructura, los cuales reportan información a un registrador de datos, el cual almacena y administra la información para su procesamiento. La transmisión remota de información puede darse, ya sea por medio de un módem, un enlace satelital, o por medio de radiofrecuencia.

Los tipos y métodos de instrumentación de túneles se encuentran generalmente agrupados por el parámetro a ser monitoreado; por ejemplo, movimientos de superficie, deformaciones en el interior del terreno, y presiones y tensiones in situ.

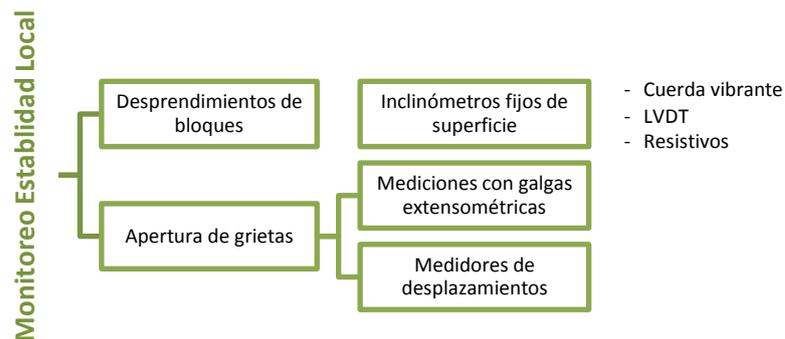
La falla de un túnel se puede producir a escala global o local, según las dimensiones de la zona afectada. Para la vigilancia de cada tipo de inestabilidad, resulta adecuado el monitoreo de distintos parámetros geotécnicos. Por ejemplo, las fallas de estabilidad global involucran una gran masa de terreno del túnel y, por ello, son los más graves debido a sus consecuencias y a los altos costos para su posterior reparación. Por otro lado, a nivel local se refieren a la caída de bloques o presencia de grietas en una pequeña zona del túnel.

En las Figuras 5.31 y 5.32 se presentan las principales variables que se monitorean en un túnel, tanto a nivel global como local, así como las opciones de monitoreo más representativas.



Fuente: COGA (2012).

Figura 5.31 Variables y sistemas de monitoreo a nivel global para un túnel



Fuente: COGA (2012).

Figura 5.32 Variables y sistemas de monitoreo a nivel local para un túnel

Normalmente, las principales actividades de monitoreo que se realizan en un túnel son:

- Determinación de tensiones "in situ" en las paredes de las galerías.
- Empujes en el revestimiento mediante células de presión total.
- Reacciones en elementos estructurales mediante células de carga o extensómetros.
- Esfuerzos en bulones y anclajes mediante células de carga.
- Presiones intersticiales mediante piezómetros.
- Determinación de módulos de deformación mediante ensayos de carga.
- Convergencia de las paredes del terreno y del revestimiento mediante equipos de medida de convergencias.
- Movimientos de elementos estructurales mediante clinómetros.
- Movimientos verticales del terreno cerca de la excavación mediante extensómetros.

- Control de asientos y de movimientos horizontales superficiales, cuando la galería esté a escasa profundidad, mediante topografía y sistemas de acoplamiento magnéticos en tubos inclinométricos.
- Movimientos horizontales del terreno mediante inclinómetros convencionales o fijos.

A continuación se presentan las principales actividades que normalmente se implementan para el monitoreo en túneles.

5.9.1. Instalación de fisurómetros 2D y 3D

Consiste en la instalación de dispositivos que permiten medir la dimensión de separación de fisuras o grietas ya definidas. En la Figura 5.33 se pueden observar las características de instalación de los dispositivos de fisurómetros de dos y tres dimensiones.



Fuente: Internet (2012).

Figura 5.33 Fisurómetro de placa

5.9.2. Instalación de celdas de deformación

Con la instalación de una estructura alrededor de la sección interna del túnel, se precisa la medición del comportamiento de las variaciones y tendencias de deformación de las paredes de revestimiento interno. Para este tipo de instrumentación, es conveniente que se cuente con una conexión para el registro continuo y remoto de las lecturas de desplazamientos. Como buena práctica en la operación de un STD, se debe hacer un análisis detallado de los registros de las inspecciones internas de los ductos, con las herramientas inteligentes, para identificar posibles correlaciones con las deformaciones registradas en las celdas.

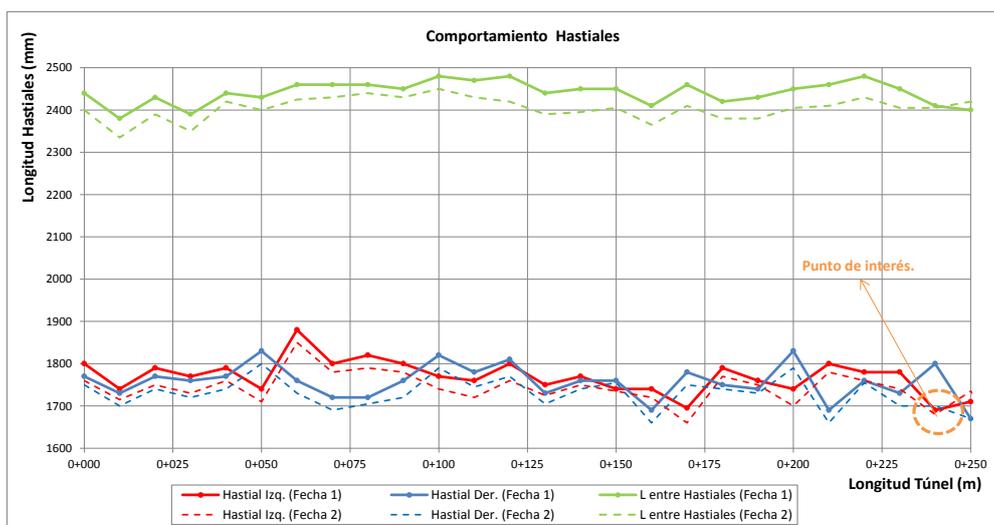


Fuente: Internet (2012).

Figura 5.34 Celdas de deformación

5.9.3.Registro de separación entre puntos fijos mediante extensómetros

Como parte importante del monitoreo topográfico, correspondiente a la parte interna del túnel, se destaca el registro y seguimiento oportuno tanto de las medidas de las alturas de los hastiales del túnel como de la separación entre los mismos. En la Figura 5.35 se aprecia la pérdida, en el tiempo, de altura de un hastial. Lo anterior, podría significar un asentamiento sobre la estructura interna del túnel. Se destaca que para lograr este tipo de observaciones, se requiere un registro continuo y detallado de medición de las variables mencionadas. No se puede determinar este tipo de efecto con pocas lecturas.



Fuente: COGA (2015).

Figura 5.35 Comportamiento de hastiales



5.9.4. Aforos de caudal en el sistema de control de filtraciones

Cuando se generan filtraciones sobre los hastiales y la parte superior del túnel, es aconsejable instalar líneas de recolección de aguas (Figura 5.36); sobre estas líneas, se recomienda realizar aforos de caudal con el fin de identificar cambios relevantes que (normalmente aumento de los caudales) que permitan establecer condiciones de amenaza para la estabilidad del túnel, al correlacionar esta información con los modelos geológico-geotécnicos.



Fuente: COGA (2012).

Figura 5.36 Sistema de control de filtraciones

5.9.5. Revisión y mantenimiento del estado de revestimiento del ducto

Normalmente en los cambios de temporada de lluvias, característico de la zona de los Andes Suramericanos, se pueden presentar algunas filtraciones que, de no tener control, pueden afectar la condición del revestimiento de juntas. Por lo anterior, es importante cumplir de manera adecuada con los patrullajes e inspecciones del túnel.

5.9.6. Revisión y mantenimiento de soportes del ducto

Con relación al punto anterior, hace parte de la buena práctica de mantenimiento de ductos, la revisión y el mantenimiento periódico de los soportes donde está dispuesto el ducto, dentro del túnel.



5.10. MONITOREO MEDIANTE CABLES

A través del monitoreo mediante cables, se busca un seguimiento continuo de la red, alertando a los operadores y administradores de los problemas en cuanto ocurren. Los eventos son registrados y los detalles de las fallas (como la localización de la falla, por ejemplo) se envían al centro de administración de la red, donde los equipos de mantenimiento apropiados se alertan automáticamente.

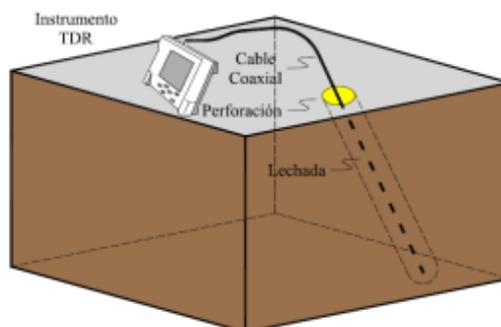
Como resultado, se pueden reducir de manera notable las interrupciones en la red y los costos de mantenimiento, permitiendo a los operadores mejorar la calidad de sus servicios y garantizando las prestaciones contratadas. Aunque estos métodos no están diseñados para cuantificar las magnitudes de un desplazamiento, presentan excelentes resultados para la detección inicial del movimiento y localización del punto de corte. A continuación dos de los métodos de monitoreo por cables empleados (TDR y OTDR).

5.10.1. Reflectómetros en el dominio del tiempo (TDR)

Los TDR (por su sigla en inglés: *Time Domain Reflectometry*), están compuestos de cables coaxiales insertados y fijos dentro de una perforación, mediante una lechada; luego, genera la transmisión de un pulso de energía en forma de onda dentro de un medio y mide las reflexiones de su transmisión, y por ende los cambios producidos en la impedancia del cable.

Las propiedades de la lechada y el cable son determinadas por las condiciones geotécnicas, modos de falla esperados y resultados requeridos. Como se conoce la velocidad de propagación en el interior de la tubería, se puede calcular la distancia a cualquier alteración. La forma más frecuente de TDR es radar. Las ondas de radio se transmiten en una dirección predeterminada en una frecuencia específica.

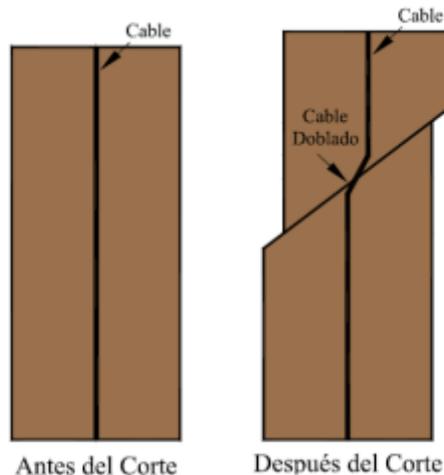
Cualquier objeto que interfiera con esta señal causará reflexiones, con todo, o parte de la energía inicialmente reflejada a la fuente. El tiempo de llegada y las características de estas reflexiones son medidos por detectores sensibles, permitiendo la determinación de la distancia al objeto (Figura 5.37).



Fuente: Cabeza et al. (2015). Análisis del Comportamiento Geotécnico de Oleoductos.

Figura 5.37 Instalación de cables TDR

Como se desplaza el terreno, el cable instalado es cortado o desplazado. Este cambio es detectable en casos como el que se muestra en la Figura 5.38 y permite localizar el área de dislocación. Cada punto de deflexión causa una discontinuidad y degradación de la señal impartida, sin embargo, el sistema tiene como finalidad indicar que el desplazamiento del terreno está ocurriendo.



Fuente: Cabeza et al. (2015). Análisis del Comportamiento Geotécnico de Oleoductos.

Figura 5.38 Dislocación del cable TDR

5.10.2. Reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo (OTDR)

Los OTDR (por su sigla en inglés: *Optical Time Domain Reflectometry*), son la versión óptica de los expuestos en el anterior numeral, toda vez que las ondas emitidas son pulsos ópticos y en ellos se puede medir la cantidad de luz dispersada y reflejada. En ese sentido, se consideran una versión más avanzada, que es muy útil en el monitoreo de movimiento de terreno a lo largo de las rutas de los ductos. Con ellos se puede identificar la actividad en el ambiente geotécnico de los ductos, y por consiguiente puede ayudar a evitar fallas en éstos, con base en las correlaciones que se hayan establecido de la interacción suelo - ducto, que son función -entre otros aspectos- del diámetro, espesor y grado API del ducto. La red de cables también actúa como una medida de anti-intrusión.

Los sistemas OTDR son efectivos sobre distancias superiores a 25 kilómetros. El sistema monitorea las capas física y óptica de la red a través de las unidades de prueba autónomas.

5.11. GEOFÍSICA APLICADA A LA GEOTECNIA

Las técnicas geofísicas constituyen una forma indirecta de obtener los perfiles de suelo, útiles para la elaboración de modelos geotécnicos y análisis de estabilidad que permitan el entendimiento de los fenómenos de inestabilidad. En sí, no constituyen un método de monitoreo de terreno sino más bien, de exploración geotécnica del sub suelo.

Dentro de ésta técnica se destacan diferentes métodos geofísicos como el Geoelectrico, Polarización Inducida, Inducción Electromagnética, Georadar, Sísmica de Reflexión, etc., útiles tanto para la



exploración de recursos naturales como para estudios relacionados con temáticas ambientales y de patrimonios culturales. Estos métodos presentan un enorme potencial en cuanto a su capacidad para caracterizar la sub-superficie en forma precisa y no invasiva, y por lo tanto, tienen un amplio campo de aplicación en hidrogeología, minería, arqueología, geomorfología y áreas relacionadas con estudios de impacto ambiental. Los mismos permiten caracterizar distintos parámetros físicos de los materiales que componen el subsuelo (resistividad eléctrica, polarizabilidad, constante dieléctrica, permeabilidad magnética, velocidad sísmica); no obstante, dado que se trata en todos los casos de una medida indirecta, es recomendable correlacionarlos con métodos de investigación del subsuelo directos. Dado que los materiales tienen distintas respuestas frente a los distintos tipos de excitación, algunos métodos pueden dar muy buenos resultados mientras que otros pueden fracasar totalmente, ya sea local o regionalmente, para una aplicación particular. Para mejorar la resolución y disminuir la ambigüedad de las soluciones, es usual entonces, aplicar conjuntamente varios métodos de prospección o emplear variantes metodológicas dentro de un mismo método, de manera que los resultados se complementen entre sí. En los últimos años, se han alcanzado muchos avances innovadores que han permitido mejorar notablemente los resultados obtenidos con estos métodos en numerosas aplicaciones.

Estas innovaciones incluyen tanto el desarrollo de nuevos equipos, como la introducción de mejoras en las técnicas, procesamiento e interpretación de datos.

5.12. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES Y RADAR

A través del análisis multi-temporal de imágenes se pueden identificar cambios representativos en el derecho de vía y sus zonas aledañas. Estos *cambios representativos* son de utilidad para analizar cambios en la susceptibilidad y la amenaza por mecanismos de falla del terreno cuando los ductos atraviesan terreno montañoso, o para analizar cambios en los cursos de corrientes de agua y procesos de socavación local que puedan afectar la integridad mecánica del ducto. Por otro lado, el radar permite evaluar desplazamientos relativos de una superficie a alta velocidad y con excelente precisión, lo cual es útil para determinar la inminencia de deslizamientos, especialmente en taludes de excavación activos o en sitios de procesos de inestabilidad inminentes para determinar alarmas de seguridad durante las labores de mantenimiento.

Los Sistemas de Información Geográfica, (SIG) proveen herramientas especializadas para determinar diferentes cambios en el terreno y posibles desplazamientos que afecten ductos o estructuras de soporte, mediante análisis específicos. En el Capítulo 8 se analizan estos sistemas y otras herramientas para el monitoreo remoto.



5.13. Anexo: Formulario de incidentes e inspección de deslizamientos utilizado por YPFB Transporte.

| FORMULARIO DE INCIDENTES E INSPECCIÓN DE DESLIZAMIENTOS | | | | | |  | |
|--|---------|---------------------------|--|-----------------------------------|----------|--|--|
| General | | Desde PK | | Empleado | | | |
| Ducto | | Hasta PK | | Nombre del Arroyo/Río | | | |
| Fecha de informe | | Incident/Inspection | | Fecha del incidente | | Última Inspección | |
| Clima hoy | | | Clima en las ultimas 48 hrs. | | | Comentarios | |
| Lluvia | Ventoso | < -5 °C | Lluvia | Ventoso | < -5 °C | | |
| Nieve | Calmo | -5 a +5 | Nieve | Calmo | -5 a +5 | | |
| Seco | | > +5 °C | Seco | | > +5 °C | | |
| Volumen del deslizamiento (m³) >100.000 10.000 a 100.000 1.000 a 10.000 100 a 1.000 10 a 100 <10 Ninguno | | | Condiciones Cambiadas Se ven cambios desde la última inspección? Describir: | | | Croquis del Sitio (usar el revés de este form. si fuese el caso) Dimensiones y Angulos Aproximados Ubicación del Deslizamiento Ubicación del Ducto Particularidades del Sitio | |
| Actividad del Deslizamiento Activ - En Movimiento Activo - Suspendido En Dormancia En Dormancia - Estabilizado Relíquia Ninguno | | | Procesos Desestabilizantes Excavación Erosión de Río Erosión en Superficie Agua Surgente Congelam./Descong. Actividad Forestal Agricultura Pastoreo | | | | |
| Otros Procesos Desestabilizantes | | | | | | | |
| Maxima Velocidad de Movimiento | | Tipo de movimiento | | Tipo de Material Describir | | | |
| >5m/s | | Caída | | Roca Dura | | | |
| 5m/s a 1.8m/hr | | Volteo | | Roca Alterada | | | |
| 1.8m/hr a 13 m/mes | | Desliz-Rotación | | Escombros | | | |
| 1.6m/año a 13m/mes | | Desliz-Planar | | Tierra | | | |
| 16mm/año a 1.6m/año | | Desliz-Cuña | | | | | |
| <16mm/año | | de flujo | | | | | |
| | | Desparramado | | | | | |
| Medidas de Estabilización o Protección | | | | | | Monitoreo | |
| Tipo | | Zanja | Drenaje | Muro | Berma | Tipo | |
| | | Otro | | | | Leyó esta inspección? | |
| Condición | | Bueno | Promedio | Pobre | Cambio? | Archivo de Datos | |
| | | | | | | Número de Fotos | |
| Consecuencias | | | | | | Describir Severidad, Extensión Afectada, Tiempo y Costo de Reparación | |
| Daño al Ducto | | Ninguna | Expuesto | Abolladura | Fuga | Ruptura | |
| Daño a Infraestructura de Superficie | | Ninguna | Torre | Valvula | Estación | | |



6. MONITOREO DE AGENTES DETONANTES - MEDICIÓN DE VARIABLES

Llamamos agentes detonantes, a todos aquellos eventos naturales que puedan desencadenar una geoamenaza, ya sea de movimiento de suelos o desplazamiento de masas de agua y lodo, que en su desarrollo puedan afectar la integridad de los ductos operativos.

Por lo expuesto, podemos decir que los agentes detonantes son:

- Lluvias.
- Actividad eólica.
- Actividad sísmica.
- Actividad volcánica.
- Actividad antrópica.

Estos agentes detonantes por sí solos, no necesariamente se presenten como una amenaza geotécnica, si no que para que esta se produzca, se deben dar una serie de combinaciones, como por ejemplo, para la licuefacción de un suelo, no basta con que se produzca un sismo, sino que debe el suelo tener una granulometría y un contenido de agua determinados; otro ejemplo es el caso de los incendios donde el parámetro a monitorear es la temperatura pero es indudable que la ausencia o presencia de lluvias es fundamental para la ocurrencia del evento. Se tiene entonces, que en el estudio del monitoreo de los agentes detonantes que se presentan en este capítulo, éstos no deben tomarse como sucesos aislados, sino que deben tenerse en cuenta también otros factores que predisponen a que la presencia del detonante produzca el evento geotécnico.

Algunos de los factores a tener en cuenta son:

- Tipo de suelo.
- Humedad del suelo.
- Topografía.
- Tipo de vegetación presente en superficie.
- La recurrencia de los aquí tomados como agentes detonantes.

En relación con la gestión integral de las geoamenazas, cobra relevancia el monitoreo de los agentes detonantes antes mencionados, como lo son la lluvia, el viento, los sismos y la actividad volcánica, actividad antrópica, entre otros, para definir mecanismos de intervención adecuados y oportunos ante la posible materialización de geoamenazas. Como se mencionó antes, es la interrelación de las condiciones topográficas, geológicas, y de uso del suelo (que definen la susceptibilidad) con dichos agentes, la que establece el potencial desarrollo de eventos amenazantes que pueden afectar los DDV de los sistemas de transporte de hidrocarburos, y eventualmente incidir en la integridad de los ductos.

El criterio que se debe afianzar, es que los detonantes deben ir acompañados de una circunstancia particular para ser nocivos. Por esta razón, se debe tener en cuenta, además de ellos, la susceptibilidad del terreno en el momento del evento de manera de estimar alertas reales y no generar falsas alarmas.

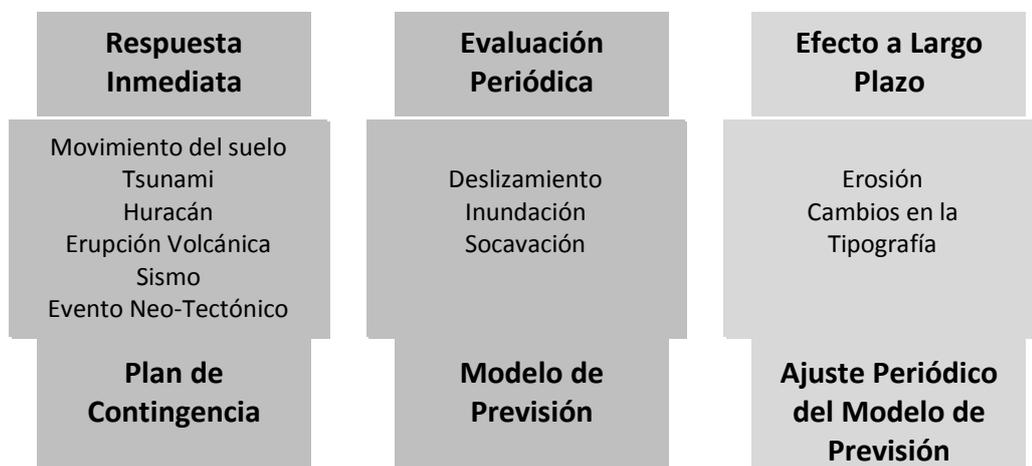


Inicialmente es necesario comprender las características propias de los agentes detonantes, ya que cada uno induce una respuesta diferente del terreno en que se emplazan los ductos (en tiempo y en espacio); seguido, se hace imprescindible establecer su monitoreo mediante la definición de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y gestión de geoamenazas, que corresponden a la activación de un conjunto de procedimientos preestablecidos para responder ante una probable emergencia por la ocurrencia de un evento potencial amenazante, o de una geoamenaza inminente.

Este conjunto de procedimientos de respuesta se puede basar en criterios de expertos, modelos estadísticos, análisis de registros históricos, etc., fundamentados en el conocimiento geotécnico e hidrotécnico para generar avisos informativos, que en función de la magnitud del agente detonante, recomienden una serie de actividades básicas y en algunos casos inmediatas, como parte del plan para la atención efectiva de las geoamenazas. Contempla el monitoreo de los agentes detonantes, el establecimiento de umbrales para la definición de alertas, y la estructuración de medios para la comunicación de éstas.

De esta manera, los SAT permiten direccionar recursos y tomar las medidas necesarias en aquellas zonas en las cuales el modelo predice que se presentará un determinado evento. Los sistemas de alerta temprana tienen como objetivo alertar a la población en caso de un fenómeno natural de proporciones tales que pueda causar daños⁶³.

En la Figura 6.1 se presentan los posibles planes de respuesta frente a los factores detonantes y a las geoamenazas.



Fuente: Aristizábal, et al. (2015). Overview of the Risk Management Strategy of Climate and External Forces Threat In VIT-ECOPETROL (p. 4).

Figura 6.1 Definición de planes de atención en función del tipo, actividad y magnitud de la geoamenaza

Al igual que en el Capítulo 3, donde aparece ésta misma figura (Figura 3.1), cabe aclarar que los eventos neo-tectónicos se clasifican con temporalidad “Respuesta Inmediata”, análisis recientes han permitido

⁶³ Villagran J. (2005).



confirmar que estos eventos pueden considerarse en las otras dos temporalidades también. Por ejemplo, desde el punto de vista de los efectos por deformaciones acumuladas en ductos con varias décadas de construidos, los eventos neo-tectónicos se pueden tener en cuenta en “Evaluación Periódica”; o el caso de tramos con proyección de deformaciones por neo-tectonismo, que a futuro deban ser tenidos en cuenta pero que no representen amenaza actual al ducto, se puede tener en cuenta en “Efecto a Largo Plazo”.

Por lo anterior, resulta conveniente hacer del monitoreo de los agentes detonantes una actividad intrínseca del ejercicio de la operación para la gestión de la amenaza de clima y fuerzas externas.

6.1. Monitoreo de lluvias

Los eventos hidrometeorológicos se forman en la atmósfera, esa masa gaseosa que cubre la superficie terrestre, la cual -producto de la rotación de la tierra y la energía del sol- cambia sus condiciones propiciando respuestas como precipitación, fuertes vientos, temperaturas extremas, etc. De esta manera la vigilancia de estos eventos causales de desastres o eventos no deseados se vuelve una prioridad para las empresas encargadas de mantener y administrar obras de infraestructura como vías o sistemas de transporte por ductos.

En este orden de ideas, una de las mayores prioridades de los profesionales que cumplen labores de protección de la integridad de obras de infraestructura es entonces la disminución de los efectos causados por eventos hidrometeorológicos lo cual es posible lograrlo conociendo el estado de la atmósfera en tiempos presente, pasado y futuro.

Dependiendo de la escala de tiempo con la que se mida el estado de la atmósfera hablamos entonces de tiempo y clima. Se define tiempo como el estado de la atmósfera en un lugar y tiempo determinado y clima se define como las condiciones promedio de la atmósfera en un lugar durante un periodo de tiempo de estudio.

Las condiciones de la atmósfera en ciudades como Lima, Bogotá o Buenos Aires en un tiempo determinado pueden ser las mismas, por ejemplo tiempo seco, sin embargo el clima en estas tres ciudades no sería igual, siendo Bogotá fría y lluviosa, Lima desértica y fresca y en Buenos Aires podemos encontrar las 4 estaciones.

Pero la atmósfera es un ente cambiante, evoluciona y se adapta, cualquier cambio en algunos de los aspectos que regulan su comportamiento como la radiación solar, la cobertura vegetal, en la composición de los gases. etc. origina desequilibrios en la atmósfera que al reaccionar para volver a lograr el equilibrio pueden llegar a cambiar el clima global o regional.

El clima en la tierra no es constante, cambia permanentemente. Estos cambios pueden ser en periodos de tiempo corto, sin cambios en el comportamiento promedio, los cuales se conocen como variabilidad climática, ocurriendo por ejemplo lo que conocemos como años lluviosos o años secos. La más conocida y estudiada manifestación de la variabilidad climática es la conocida en los círculos científicos como Oscilación del Sur El Niño, o simplemente El Niño.



Cambios en periodos de tiempo más largos, más permanentes, en periodos de tiempo geológico en los cuales los promedios de las condiciones atmosféricas varían se conocen como cambio climático, siendo los más conocidos las denominadas glaciaciones.

6.1.1. ENSO: Oscilación del Sur El Niño

La Oscilación del Sur El Niño (ENSO), es un evento de variabilidad climática que afecta el clima global. Es comúnmente conocido como fenómeno de El Niño debido a que fueron los indígenas peruanos quienes primero notaron los cambios ocasionados por el mismo, los cuales se manifiestan generalmente a partir del mes de diciembre, coincidiendo con el nacimiento del niño Jesús.

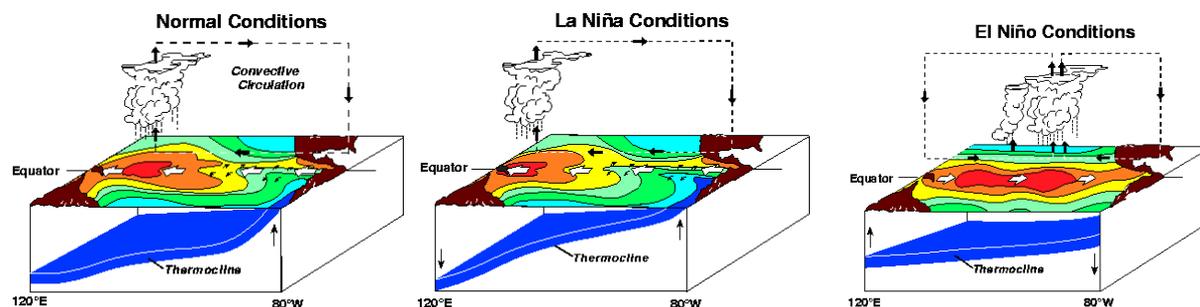
Su manifestación global más conocida es un cambio en la temperatura promedio del Océano Pacífico, la cual oscila (de ahí su nombre científico) entre 1 y 3 grados en comparación con los promedios. El calentamiento de las aguas o fase caliente se conoce como El Niño y el enfriamiento de las aguas se conoce como La Niña.

Los vientos alisios, al chocar cerca al ecuador de la tierra, originan una franja de baja presión que se conoce como la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la cual es responsable de las lluvias en la región ecuatorial, de esta manera, un cambio en el comportamiento de los vientos alisios desencadena cambios en la ZCIT y, en consecuencia, cambios en el patrón de precipitación y nubosidad.

La Fase Caliente, o El Niño, se manifiesta igualmente en que los vientos alisios que en condiciones normales se desplazan en dirección Este cambian de dirección, produciendo que la ZCIT se localice hacia el Sur y manifestándose en una disminución de lluvias en países al norte del Ecuador como Colombia y Venezuela y lluvias intensas en países al sur del Ecuador como Perú y ocasiona igualmente una disminución de la actividad ciclónica (menos huracanes).

La Fase Fría, o La Niña, se manifiesta en un aumento de velocidad de los vientos alisios, produciendo que la ZCIT se localice hacia el norte, manifestándose en aumento de precipitación en países localizados hacia el norte del Ecuador y disminución de la precipitación en países localizados al sur del Ecuador, la actividad ciclónica se incrementa.

En la Figura 6.2, se muestran las diferencias en las condiciones atmosféricas y oceánicas durante la fase caliente y Fría del ENSO comparadas con las condiciones normales o promedio de la atmósfera.

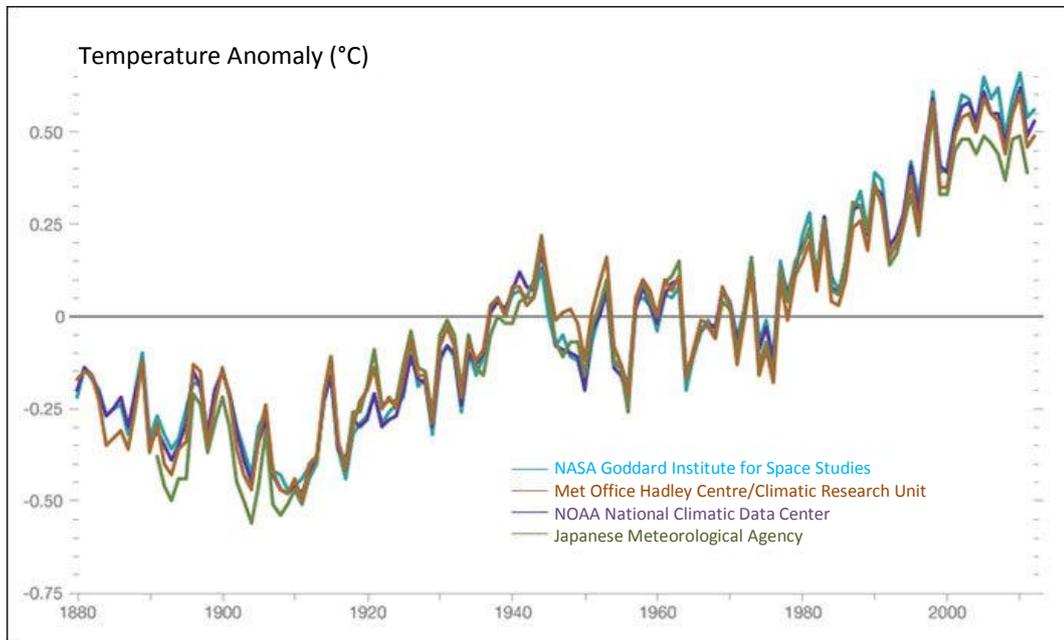


Fuente: National Oceanic Atmospheric Agency (NOAA); oar.pmel.taogroup@noaa.gov

Figura 6.2 Ciclos hidrológicos comparativos

6.1.2. Cambio climático

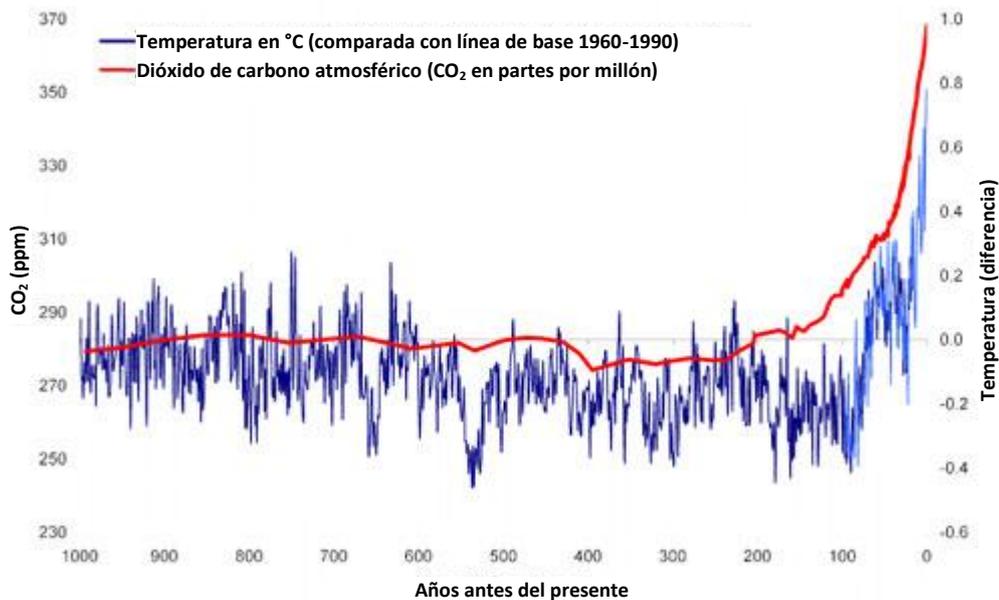
Si bien los cambios en el clima se han producido periódicamente desde la formación de la tierra, en la actualidad debido a la influencia del hombre moderno sobre la tierra desde el siglo anterior se han manifestado cambios importantes en la temperatura atmosférica (Figura 6.3). Los modelos muestran una relación entre los niveles de CO₂ en la atmósfera y el aumento de temperatura (Figura 6.4), consistente con la revolución industrial de los últimos años, el uso de los combustibles fósiles y la deforestación. Este cambio acelerado de las condiciones atmosféricas es lo que se conoce con el nombre de Cambio Climático.



Fuente: NASA's Goddard Institute for Space Studies, NOAA National Climatic Data Center, Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit y Japanese Meteorological Agency.

Figura 6.3 Fluctuación de la temperatura atmosférica⁶⁴

⁶⁴ Datos de temperatura provenientes de institutos científicos internacionales. Todos muestran un rápido calentamiento en las últimas décadas y que la última década fue la más caliente.



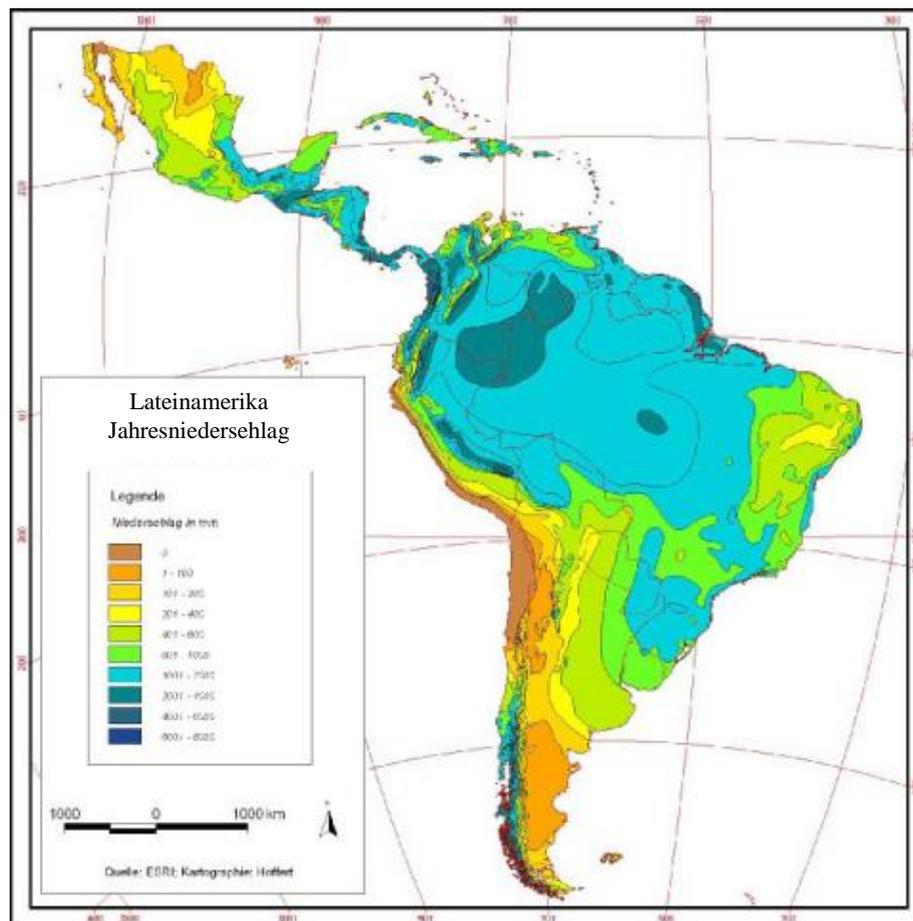
Fuente: <http://www.brighton73.freeseve.co.uk/gw/paleo/paleoclimate.htm>

Figura 6.4 Relación entre la temperatura promedio de la tierra y la concentración de CO₂

En América Latina, debido a su ubicación tropical y subtropical, la lluvia es uno de los agentes detonantes principales de geoamenazas. Por ejemplo, en Colombia, los eventos de los años 2010 y 2011 fueron un hito histórico en cuanto a la cantidad de lluvia precipitada en la región andina, que desencadenó movimientos en masa, avenidas torrenciales, inundaciones, por nombrar algunas geoamenazas, con los consecuentes efectos negativos en la operación.

Lo anterior hace alusión a la variabilidad climática interanual (ver la Figura 6.5), la cual evidencia que el fenómeno de “El Niño - La Niña” es recurrente en los países de la región, y eventualmente se esperaría la materialización de eventos naturales asociados a dicho fenómeno.

Más allá de los fenómenos de La Niña y El Niño, las lluvias en sí son factores desencadenantes de diversos eventos. El mapa de precipitaciones anuales nos da una idea global de la situación del continente. Colombia, Venezuela, Ecuador y en menor medida, Perú, son los países más castigados por este fenómeno. Además de la cantidad anual de milímetros caídos, también debe hacerse hincapié en la recurrencia de eventos extremos y la intensidad de las precipitaciones.



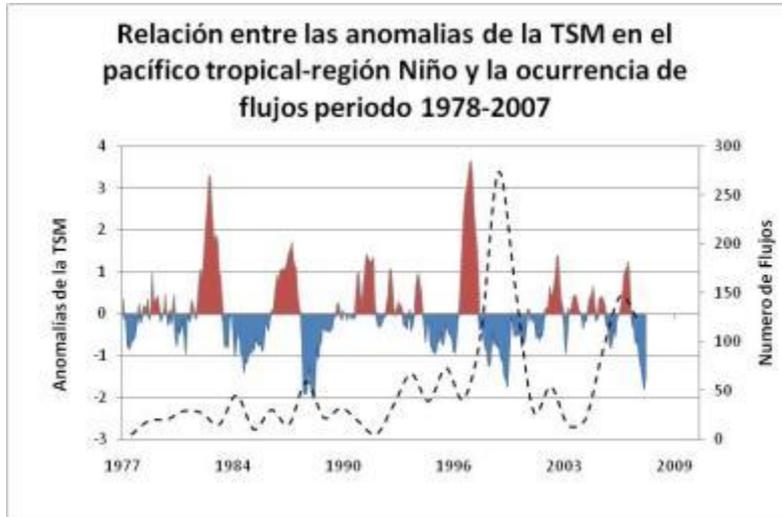
Fuente: www.lateinamerika-studien.at

Figura 6.5 Mapa de precipitaciones anuales en América Latina

Por ejemplo, en Argentina, donde en la zona cordillerana se tiene una de las zonas más secas del país, se presentan anualmente eventos extremos, que no son otra cosa que concentrar en un pequeño periodo de tiempo, prácticamente la totalidad de las precipitaciones anuales. Esto provoca grandes inconvenientes en lo que se refiere a la geotecnia del lugar.

Por lo expuesto, el monitoreo de lluvias debe estar complementado con los datos de cuán fuertes son las mismas, y de las zonas afectadas teniendo en cuenta su vulnerabilidad, asociando de esta manera su poder de deterioro sobre los diferentes tipos de suelos. Es importante destacar, que el exceso respecto a las precipitaciones medias mostradas en la Figura 6.6, son las que se deben considerar como nocivas.

Si bien no sería aconsejable tomar como parámetro solamente la cantidad de agua caída en una región, éste puede ser un buen indicador de dónde concentrar esfuerzos en la prevención de amenazas geotécnicas.

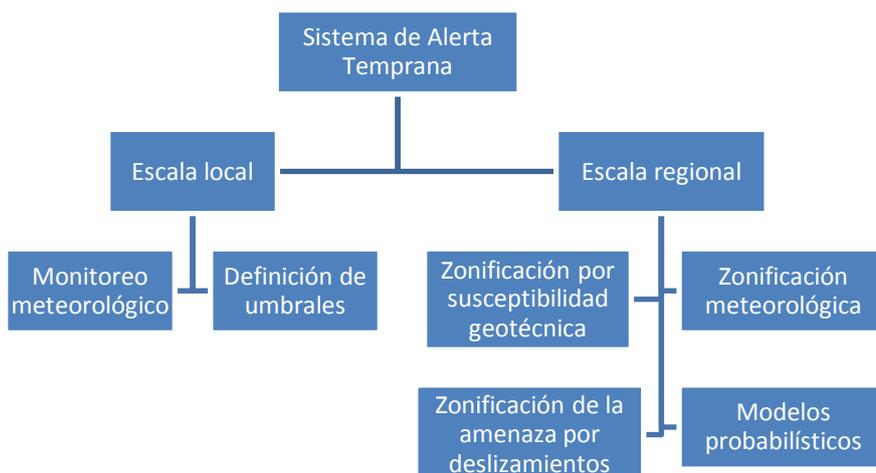


Fuente: Julián Corrales (OCENSA).

Figura 6.6 Relación entre anomalías de la TSM⁶⁵ y flujos en el pacífico tropical

Pareciera que la materialización de geoamenazas por las lluvias de 2010 y 2011 en Colombia, se asocia a eventos meteorológicos más extremos a los usualmente documentados; sin embargo, como bien se ha podido constatar por las operadoras de transporte de hidrocarburos, el cambio apreciable del uso del suelo en el entorno a los DDV también es un agente contribuyente al desarrollo de eventos amenazantes.

Esta breve introducción de la influencia de la lluvia, como agente precursor de procesos de inestabilidad, demuestra la conveniencia de efectuar un monitoreo de la misma, que considere los aspectos mencionados en la Figura 6.7.



Fuente: modificado de Yang et al. 2014.

Figura 6.7 Componentes de un sistema de alerta temprana por lluvias

⁶⁵ Temperatura Superficial del Mar



A escala regional se establecen las zonas propensas al desarrollo de movimientos en masa, avenidas torrenciales o cualquier otro proceso desencadenado por las lluvias a partir de información meteorológica antecedente (últimos 30 años) y su interacción con las condiciones geotécnicas del terreno. Puede considerarse la interacción de los siguientes elementos para la caracterización del DDV en cuanto al potencial desarrollo de procesos de inestabilidad:

- Análisis de la información histórica de precipitación en los DDV (últimos 30 años) para la elaboración de la zonificación meteorológica a lo largo de los DDV de los sistemas de transporte.
- Mapas de zonificación por susceptibilidad geotécnica⁶⁶ y por movimientos en masa, mediante los cuales se establece un marco regional para la comprensión de la interacción de las características topográficas, geológicas y de uso del suelo existentes con las condiciones de lluvia en un sector establecido.
- Modelos mecánicos de respuesta a la estabilidad de las laderas que tiene en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales, que al analizarse en conjunto con la zonificación por susceptibilidad geotécnica, permiten establecer otras zonas potencialmente inestables por lluvias.

Los mapas de susceptibilidad y amenaza son un componente que debe interactuar con el componente local que se obtiene a través del monitoreo de variables climáticas y de la definición de umbrales⁶⁷.

En el caso de las lluvias, es necesario contar con una zonificación climática y el conocimiento de los promedios multianuales de lluvias (máximas en 24 horas, diarias, mensuales totales, anuales, etc.), de modo tal que con base en la medición diaria de lluvias de la estación meteorológica más cercana, se pueda establecer con base en la época del año la relación de la cantidad de lluvia caída en la zona y la precipitación promedio, así como la cantidad de lluvia acumulada en periodos de tres, cinco, siete días, etc., lo cual queda a discreción de cada empresa según la información disponible. Algunas empresas instalan estaciones adicionales a las de entidades meteorológicas, con el fin de implementar series de datos que posteriormente se combinen con los datos de aquellas para afinar el umbral de alerta.

- Monitoreo de variables climáticas

Entre otras se pueden citar:

- La instalación estratégica de estaciones hidrometeorológicas o la utilización de información proveniente de organismos gubernamentales que poseen estaciones meteorológicas a lo largo de los sistemas de transporte y que cuenten con recursos tecnológicos que permitan enviar la información en tiempo real a un centro de control. La selección de los sitios se realiza con base en la zonificación geotécnica (áreas con mayor probabilidad de que se materialice un movimiento en masa), zonificación meteorológica (áreas que representan los mayores niveles de precipitación y número de días con lluvia), históricos de eventos geotécnicos y el conocimiento de los profesionales de mantenimiento de los sistemas de conducción.

⁶⁶ Define la facilidad de ocurrencia de un proceso de inestabilidad sobre la base de las condiciones locales del terreno y del entorno.

⁶⁷ Yang et al. (2014)

- Análisis de la información de modelos meteorológicos para tener mediciones en sitios donde no hay toma de datos con estaciones (del ahora e histórica - *NOWCASTING*) y pronóstico de lluvia a lo largo del sistema (*FORECASTING*). En el *NOWCASTING* se utiliza información proveniente de satélites (como el TRMM) y radares meteorológicos. En el *FORECASTING* se pronostica las condiciones de lluvia mediante la corrida de modelos meteorológicos (como el WRF y GFS), de acuerdo con la Figura 6.8:



Fuente: presentación Carlos D. Hoyos, PhD. Director SIATA.

Figura 6.8 Escala de eventos hidrometeorológicos

- Proceso de estimación de umbrales:

Corresponde a la definición de las condiciones de lluvia que inducen a movimientos del terreno en un sitio específico bajo un contexto de condiciones topográficas, geológico-geotécnicas y de uso del suelo particular. Comúnmente se definen umbrales de ocurrencia (aquellos que definen un valor mínimo o máximo de un evento de lluvia específico), umbrales de acumulación (por ejemplo cuando se sobrepasa el promedio de precipitación mensual histórico) y umbrales de frecuencia (basados en el conteo de ocurrencias del valor de una variable).

Otros métodos para la determinación del umbral de riesgo que relaciona lluvias con deslizamientos son definidas por Guzetti F. et al, 2007 como se observa en la Tabla 6.1 a continuación:



| VARIABLE | DESCRIPCIÓN | UNIDADES | PRIMERA VEZ USADA |
|-----------------|---|----------|-------------------------------|
| D | Duración de la lluvia. Duración de la lluvia evento o periodo de lluvia. | h o días | Caine (1980) |
| D_C | Duración de la lluvia evento crítica | h | Aleotti (2004) |
| $E_{(h),(d)}$ | Lluvia evento acumulada. La lluvia total medida desde el comienzo de la lluvia evento hasta el tiempo de la falla. También es conocido como lluvia tormenta. "h" indica el periodo considerado en horas y "d" indica el periodo considerado en días. | mm | Innes (1993) |
| E_{MAP} | Lluvia evento acumulada normalizada. La lluvia evento acumulada dividida entre MAP ($E_{MAP}=E/MAP$), también es conocida como la lluvia tormenta normalizada | - | Guidicini & Iwasa (1977) |
| C | Lluvia crítica. El total de la lluvia desde el tiempo de un incremento distintivo en la intensidad de lluvia (t_0) hasta el tiempo en que se causa el primer deslizamiento (t_f) | mm | Govi & Sorzana (1980) |
| C_{MAP} | Lluvia crítica normalizada. La lluvia crítica dividida entre MAP ($C_{MAP}=C/MAP$) | - | Govi & Sorzana (1980) |
| R | Lluvia diaria. La lluvia total del día del deslizamiento. | mm | Crozier & Eyles (1980) |
| R_{MAP} | Lluvia diaria normalizada. La lluvia diaria dividida entre MAP ($R_{MAP}=R/MAP$) | - | Terlien (1998) |
| I | Intensidad de lluvia. La cantidad de lluvia en un periodo, por ejemplo, la tasa de precipitación sobre el periodo considerado. Dependiendo de la duración del periodo medido, la intensidad de la lluvia mide las tasas de precipitación pico o promedio. | mm/h | Caine (1980) |
| I_{MAP} | Intensidad de lluvia normalizada. La intensidad de lluvia dividida entre MAP ($I_{MAP}=I/MAP$) | 1/h | Cannon (1988) |
| I_{MAX} | Intensidad de lluvia horaria máxima. La máxima intensidad de lluvia horaria. | mm/h | Onodera <i>et al</i> (1974) |
| I_p | Intensidad de lluvia pico. La mayor intensidad de lluvia (tasa de lluvia) durante la lluvia evento. Disponible de registros de lluvia detallados. | mm/h | Wilson <i>et al</i> (1992) |
| $\hat{I}_{(h)}$ | Intensidad de lluvia media para un periodo final de tormenta. "h" indica el periodo considerado en horas, comúnmente entre 3 y 4 horas. | mm/h | Govi & Sorzana (1980) |
| I_C | Intensidad de lluvia horaria crítica. | mm/h | Heyerdahl <i>et al</i> (2003) |
| I_f | Intensidad de la lluvia al tiempo de la falla del talud. Disponible de registros de lluvia detallados. | mm/h | Aleotti (2004) |
| I_{fMAP} | Intensidad de la lluvia al tiempo de la falla del talud normalizada. La Intensidad de la lluvia al tiempo de la falla del talud dividida entre MAP ($I_{fMAP}=I_f/MAP$) | 1/h | Aleotti (2004) |
| $A_{(d)}$ | Lluvia antecedente. La precipitación total acumulada medida desde el evento de lluvia detonante. "d" indica el periodo de días considerado | mm | Govi & Sorzana (1980) |
| A_{MAP} | Lluvia antecedente normalizada. La antecedente dividida entre MAP ($A_{MAP}=A/MAP$) | - | Aleotti (2004) |
| $A_{(y)}$ | Precipitación anual antecedente hasta la fecha del evento. La precipitación anual acumulada mediada antes del evento de lluvia causal del deslizamiento. | mm | Guidicini & Iwasa (1977) |
| $A_{(y)MAP}$ | Precipitación anual antecedente hasta la fecha del evento normalizada. Precipitación anual antecedente hasta la fecha del evento dividida entre MAP ($A_{(y)MAP}=A_{(y)}/MAP$) | - | Guidicini & Iwasa (1977) |
| F_C | Suma de la precipitación anual antecedente normalizada y la lluvia evento normalizada | - | Guidicini & Iwasa (1977) |
| | ($F_C=A_{(y)MAP}+E_{MAP}$). También es conocida como "coeficiente final" | | |
| MAP | Precipitación anual media. Para una estación de lluvia, la precipitación anual acumulada, obtenida a través de los registros históricos de precipitación. Caracteriza las condiciones climáticas locales | mm | Guidicini & Iwasa (1977) |

| VARIABLE | DESCRIPCIÓN | UNIDADES | PRIMERA VEZ USADA |
|------------|---|----------|-----------------------------|
| <i>RDs</i> | Número promedio de días con lluvia en un año. Para una estación de lluvia, el promedio anual de días con lluvia, obtenida a través de los registros históricos de Precipitación. Caracteriza las condiciones climáticas locales | # | Wilson & Jayko (1997) |
| <i>RDN</i> | Día de lluvia normal. Para una estación de lluvia, la relación entre el MAP y el promedio de días de lluvia en un año ($RDN=MAP/RDs$) | mm/# | Wilson & Jayko (1997) |
| <i>N</i> | Relación entre el MAP de dos áreas diferentes (lejanas) | - | Barbero <i>et al</i> (2004) |

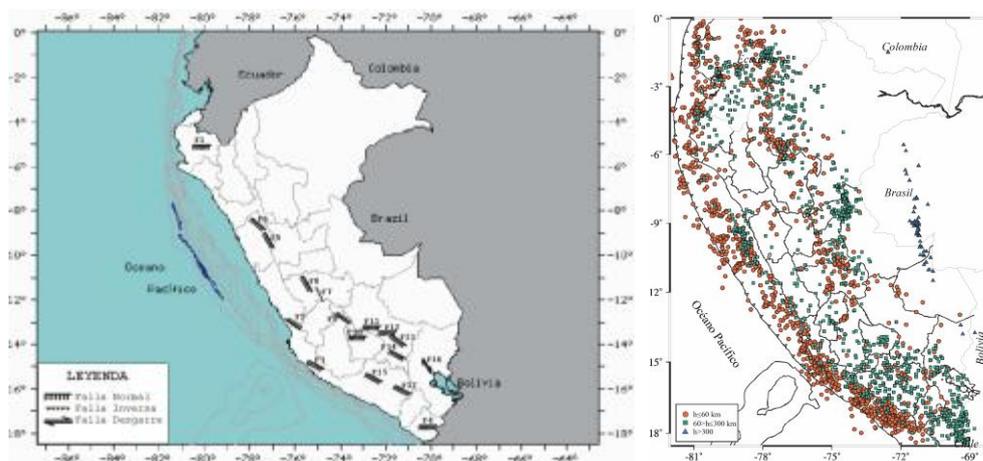
Fuente: GUZETTI F. et al. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorological and Atmospheric Physics Netherlands.

Tabla 6.1 Relación Lluvias – Deslizamientos en función de distintas variables

La conjunción de las zonas propensas a inestabilidad por lluvias con la información proveniente del monitoreo de variables climáticas deriva en la definición de niveles de alerta a la operación en tiempo real y en recomendaciones a la operación para gestionar la amenaza. Adicionalmente a los movimientos en masa se presentan crecientes súbitas, inundaciones y otras geoamenazas que pueden afectar la integridad de los ductos.

6.2. Monitoreo de sismos

Como se mencionó en el Capítulo 3, la región también se caracteriza por su actividad sismo-tectónica. En cada país se cuenta con estudios de amenaza sísmica que permiten inferir el grado de amenaza sísmica a nivel de roca (por ejemplo, ver la Figura 6.9).



Fuente: Instituto Geofísico del Perú, 2003.

Figura 6.9 Principales sistemas de fallas y sismicidad (1960 a 1995, mb ≥ 5) en Perú

Entre los efectos que pueden ser producidos por la actividad sísmica en la superficie del terreno, y que son de interés en cualquier estudio geotécnico, están los siguientes: licuefacción, deformación permanente del terreno y amplificación de las ondas sísmicas.

Como bien es conocido por la comunidad técnica y científica, los sismos han sido impredecibles, eventuales y repentinos; cada uno con características específicas en cuanto a: magnitud, amplitud,

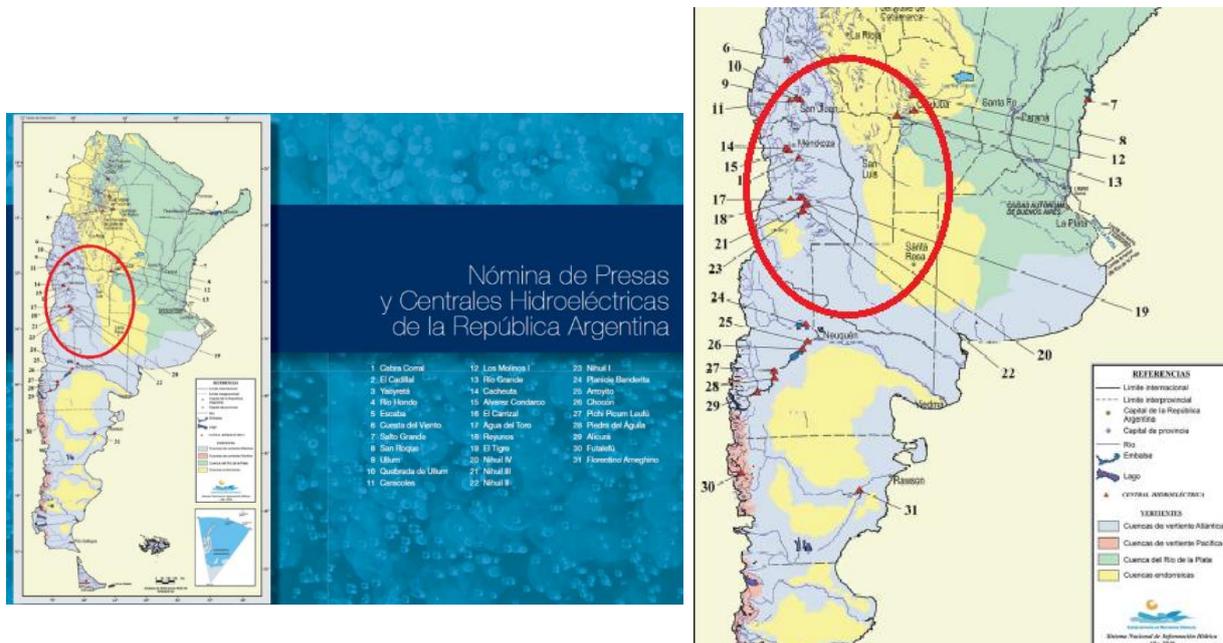


contenido frecuencial y duración. Por ende, el sistema de gestión para el caso de sismos se puede basar principalmente en:

- El monitoreo sísmico que usualmente proviene de las entidades públicas de cada país encargadas del estudio de riesgos geológicos.
- La información proveniente de estudios de amenaza sísmica, zonificación por susceptibilidad geotécnica y el inventario de hallazgos geotécnicos, los cuales permiten priorizar la atención.
- La relación del evento sísmico en función de su magnitud y profundidad respecto a la distancia con la infraestructura de transporte por ductos.

En el caso de los sismos, es necesario tener en cuenta que la información registrada por las entidades con red sismológica, permita definir con base en efectos reportados históricamente y el seguimiento de metodologías conocidas basadas en distancia al epicentro, profundidad e intensidad del evento, la posibilidad de afectación al derecho de vía y sus zonas aledañas.

Se ha comprobado que los embalses de grandes dimensiones pueden generar o inferir sismos (SIE – Sismos Inducidos por Embalses) por lo que se debería tener un mapeo de la ubicación de estas obras hidráulicas. El siguiente ejemplo para Argentina, podría llevarse para toda la región, superponiendo sobre éste, la ubicación de los ductos.



Fuente: <http://www.hidricosargentina.gov.ar>

Figura 6.10 Ubicación de presas en zonas sísmicas de Argentina

El óvalo rojo indica las zonas de Argentina atravesadas por ductos y que a la vez poseen presas o diques⁶⁸. Junto al monitoreo sísmico surge la necesidad del monitoreo tectónico. La identificación, análisis e interpretación de las fallas geológicas activas se basa, en principio, en el estudio de las deformaciones del terreno inducidas por su actividad que, poco a poco, transforman la superficie de

⁶⁸ Ver más en: [http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo20%20\(6\)/Art31.pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo20%20(6)/Art31.pdf)



manera acumulativa dando lugar a topografías o morfologías que sirvan de base para el diagnóstico de la actividad de fallas. En los ductos, esta actividad genera movimientos relativos entre el material circundante y el ducto mismo, induciendo puntos de concentración de esfuerzos.

Dichas formas del terreno (manifestaciones de neotectonismo) se conocen con diferentes nombres de acuerdo a su geometría, las cuales son, en general, indicativas del tipo de movimiento que ha tenido la falla. Tales designaciones incluyen nombres como los siguientes⁶⁹:

- Escarpes de falla.
- Existencia de lagunas de falla por distensión o “*sagponds*”.
- Cuencas de tracción (“*pull apart ridges*”).
- Cambios abruptos de dirección de tramos rectos de cauces.
- Topografías desplazadas.
- Lomos de obturación (“*shutter ridges*”).
- Corrientes de agua desplazadas.
- Facetas triangulares.
- Aluviones cortados.
- Escarpes en abanicos.
- Lomos de falla (o “de ballena”).
- Silletas de falla.
- Basculamiento de depósitos aluviales (terrazas, abanicos) y coluviales.

Un ejemplo de cambio abrupto del cauce de un río se muestra en la Figura 6.11, donde se aprecia tal cambio en la zona de Piedemonte Llanero, al oriente de Colombia, en la transición del Río Charte hacia la llanura.



Fuente: Recorridos aéreos en los sistemas de transporte de hidrocarburos de VIT-ECOPETROL.

Figura 6.11 Manifestaciones de neotectonismo que indujeron el cambio del curso del cauce del Río Charte

⁶⁹ París, 1997



El grado relativo de desarrollo de estas formas constituye la mejor guía de investigación de las fallas geológicas en campo, ya que se ha comprobado científicamente, en diferentes partes del mundo, que estas formas topográficas se originan por la repetición de numerosos eventos sísmicos a intervalos de decenas, cientos o miles de años.

La investigación se hace a partir de evidencias como las anteriores, o determinación de rasgos morfotectónicos, y mediante trincheras (zanjas exploratorias) en sitios claves para hacer observación minuciosa de la microtectónica; los taludes de cortes en carreteras pueden servir para observaciones de este tipo. Las estrías de fricción en los “espejos de falla” o “*slickensides*” en afloramientos rocosos llevan a determinar direcciones de movimientos de compresión y distensión.

Los sistemas de transporte por ductos construidos en montañas, se localizan en terrenos afectados por fallamiento geológico. Al atravesar sistemas de fallas geológicas, se encuentran zonas de brecha y de debilidad estructural así como zonas de infiltración del agua que hacen que los DDV y zonas alledañas sean propensos a geoamenazas y que los ductos se vean sometidos a sollicitaciones derivadas de la susceptibilidad del terreno y de las deformaciones acumuladas debido a neotectonismo.

Existen otras técnicas de sistemas de alertas usando las ondas *P* en donde se puede predecir con unos segundos valiosos la llegada de las ondas *S* más destructivas, los cuales no son objeto de la presente guía.

Los sistemas de identificación de riesgo permiten definir las zonas donde hay mayor probabilidad de daños en el ducto con los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento derivados de la magnitud y la distancia del sismo.

Un tsunami⁷⁰ o maremoto⁷¹ es un evento que involucra un grupo de olas de gran energía y de tamaño variable que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Este tipo de olas remueven una cantidad de agua muy superior a las olas superficiales producidas por el viento.

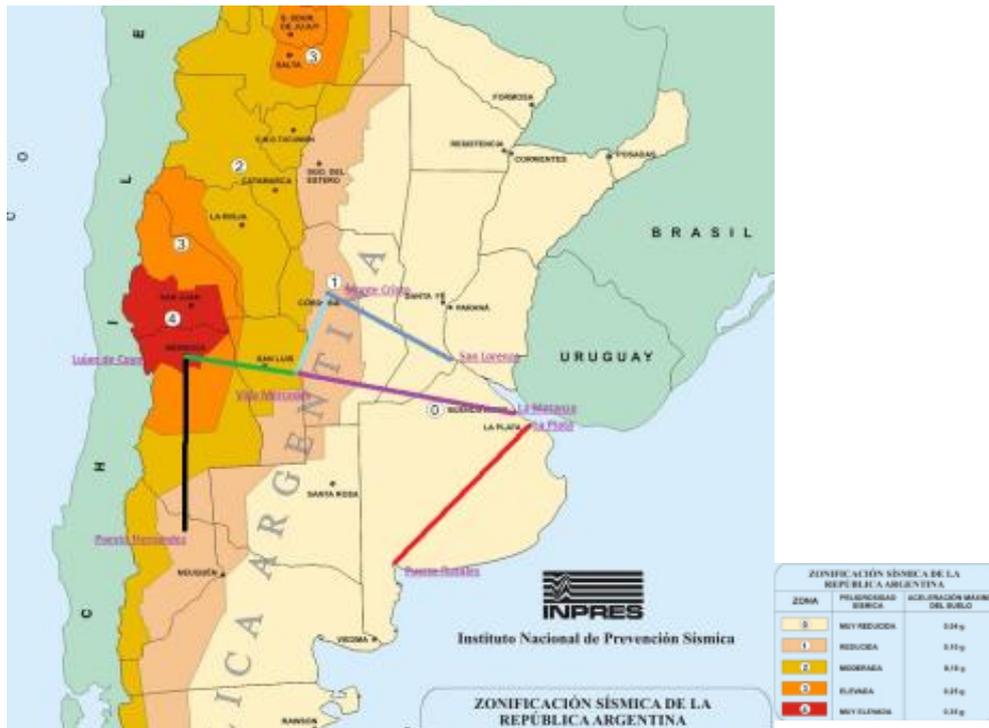
La energía de un maremoto (o tsunami) depende de su altura, su longitud de onda y de la longitud de su frente. La energía total descargada sobre una zona costera también dependerá de la cantidad de picos que lleve el tren de ondas. Es frecuente que un tsunami que viaja grandes distancias, disminuya la altura de sus olas, pero siempre mantendrá una velocidad determinada por la profundidad sobre la cual el tsunami se desplaza. Al disminuir la velocidad de la parte delantera del tsunami, necesariamente crece la altura por transformación de energía cinética en energía potencial. De esta forma una masa de agua de algunos metros de altura puede arrasarse a su paso hacia el interior, haciendo que sean particularmente destructivos y afectando, obviamente, cualquier instalación que encuentre a su paso, aun estando esta soterrada, debido a su gran poder de remoción y destrucción.

Las zonas de influencia en las cuales se presentan las dificultades asociadas a tsunamis, se encuentran donde los ductos tienen una ubicación cercana a las costas y por lo general, paralelas a ellas.

⁷⁰ Del japonés «津» *tsu*=puerto o bahía, y «波» *nami*=ola

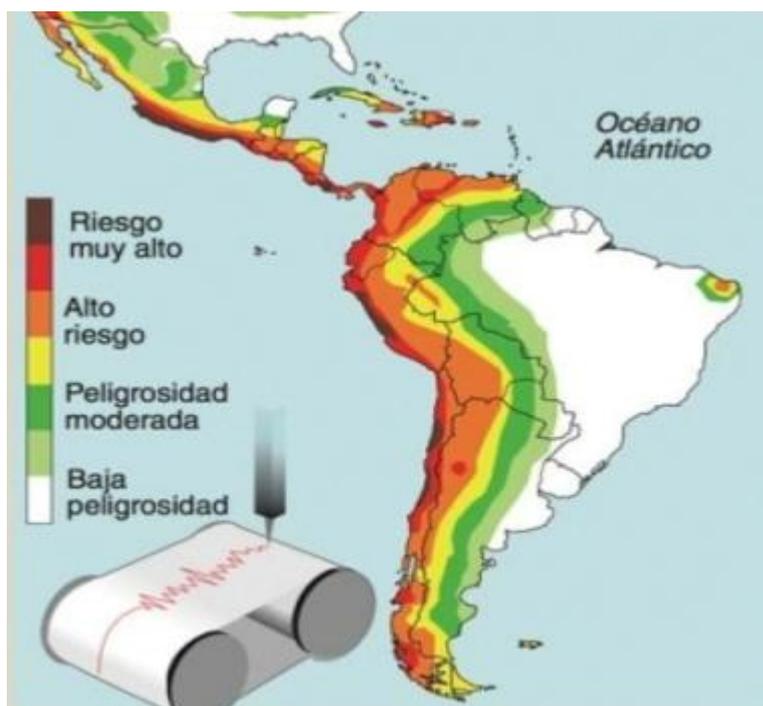
⁷¹ Del latín *mare*=mar y *motus*=movimiento

Las alertas de tsunamis suelen ser tempranas, pero como la violencia de estos eventos es muy importante, las medidas mitigatorias se deben dar directamente en la etapa de construcción de la línea, ya que es poco lo que se puede hacer ante este evento, aún sabiendo que va a ocurrir en un par de horas, si no se tomaron las medidas preventivas de antemano. Haciendo una comparación con un edificio torre construido en una zona sísmica, la prevención se debe dar en la construcción del mismo. Si no se tomaron recaudos en esa etapa, ante un movimiento telúrico, si la construcción no es sismo-resistente, es poco lo que se puede hacer.



Fuente: Instituto Nacional de Previsión Sísmica de Argentina.

Figura 6.12 Zonas sísmicas de Argentina y ubicación de los ductos operados por YPF (3.000 km aprox.)



Fuente: www.movimet.com

Figura 6.13 Zonas sísmicas de Latinoamérica

6.3. Monitoreo de actividad eólica

En el numeral 3.3.4 de la presente guía se mencionó la erosión eólica, como un tipo de geoamenaza, y en el numeral 5.8, la forma de monitorear sus efectos sobre los DDV (normalmente zonas desérticas) a través de los denominados marcadores de nivel de arena. En este numeral se hace alusión a la necesidad de implementar el monitoreo de la actividad del viento, lo que puede incluir las condiciones meteorológicas asociadas al viento (su velocidad, dirección y temperatura del aire) con el fin de realizar el control y seguimiento adecuado, que permita establecer las zonas susceptibles a este proceso erosivo.

Se deja nota que además de las variables asociadas al viento se deben dar factores adicionales para que los procesos de desprendimiento, transporte y depositación de las partículas ocurran; por ejemplo en el suelo (material fino, suelto y seco), en las áreas con propensión a la acción del viento (grandes áreas con superficies de baja rugosidad) y en la ausencia de coberturas vegetales (Figura 6.14).



Fuente: Relevamiento aéreo YPF.

Figura 6.14 Situación acontecida en poliducto Villa Mercedes – La Matanza (pk 80.200 Córdoba, Argentina)

El régimen de la actividad eólica, por lo general, es estudiado por los entes gubernamentales dedicados a la meteorología, por ejemplo en Argentina, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y en Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). También los aeropuertos son fuentes de obtención de datos en materia eólica. Sin embargo, con base en las variables anunciadas (dirección, velocidad y temperatura del aire), en caso de requerirse un operador podría adquirir los instrumentos meteorológicos que le permitan realizar estas mediciones y desarrollar un análisis.

El tipo de afectación que la actividad eólica ocasiona en los derechos de vía se debe a la migración de los suelos que genera inconvenientes de soporte y tapada en la conducción y en las facilidades de la misma. En este sentido, el monitoreo de la actividad eólica es fundamental en las zonas donde los ductos son de fácil acceso, debido a que el vandalismo aprovecha estas circunstancias.

6.4. Monitoreo de actividad volcánica

La actividad volcánica se monitorea con base en los sistemas operados y mantenidos por las redes gubernamentales y sus Servicios Geológicos especializados en el análisis geofísico, quienes se dedican a realizar la observación e interpretación continua de la actividad sísmica y volcánica en cada país.

En principio, es relevante contar con la información de los mapas de amenaza volcánica para cada zona de interés, con el fin de establecer y alinear a las directrices de las unidades de gestión del riesgo de cada país, las medidas necesarias para la protección de las personas y la infraestructura.

Con esta información, se pueden desarrollar protocolos de comunicación con las autoridades y ajustar los planes de contingencia ante la ocurrencia de esta amenaza. Asimismo, se pueden definir los procedimientos de inspección después del evento volcánico y estudiar la conveniencia de contar



con almacenamiento de los productos en sitios seguros, para mantener el servicio mientras se realizan las reparaciones.

Las actividades relevantes de las instituciones geofísicas, para el caso del monitoreo de geoamenazas, deben enfocarse principalmente en los siguientes puntos:

- i. Operar las redes de observación geofísica de la corteza terrestre.
- ii. Obtención, procesamiento, interpretación de datos y la difusión de la información.
- iii. Almacenamiento de datos científicos generados en las diferentes redes.

La información y datos técnicos, provienen de redes de sensores y equipo técnico-científico, colocadas estratégicamente en las regiones de influencia de la geoamenaza, a nivel nacional de cada país, entre otras:

- Red Nacional de Sismógrafos (Red Nacional de Monitoreo Sismológico).
- Red Nacional de Acelerógrafos.
- Red de Geodesia (GPS geodésicos).
- Red Nacional de Observatorios Volcánicos.
- Red Nacional de Transmisión de Datos Geofísicos.

Complementariamente, para el trabajo de campo, se debería contar con un mínimo de equipos como son:

- Sensores: sismómetros y geófonos en la detección de señales sísmicas.
- Módulos de conversión análogo-digital.
- Módulos de radio-módem.
- Equipos de transmisión telemétrica.
- Equipos portables de almacenamiento de datos.
- Ordenadores de almacenamiento de datos.
- Módulos GPS: sincronización de estaciones de vigilancia.
- Red de procesamiento de información de carácter sísmico.
- Cámaras de vigilancia en tiempo real, etc.

Una vez definido el programa de inspección se debe considerar la **fase de seguimiento** que permite conocer la actividad del volcán en todo momento, en aspectos como:

- Ubicación del magma.
- Su temperatura y contenido en gases.
- Estado de la actividad sísmica.
- Evolución de la actividad eruptiva, si es que existe.

La información obtenida se compara con la de días anteriores y se establece cual es la evolución del volcán. Se deben emitir boletines destinados a empresas operadoras o dueñas de ductos, cuya periodicidad variará en función del estado del volcán monitoreado.

Sin dicha información, se aplica la **fase de pronóstico** que se realiza con base en las observaciones realizadas en la fase de seguimiento. Dicho pronóstico permite establecer las pautas de evolución de la actividad volcánica en un futuro, a corto, mediano o largo plazo.



Asimismo, es importante la **fase de predicción**, que permite establecer el comportamiento del volcán a corto o muy corto plazo, y los efectos que va a producir, implica dar a conocer que escenarios volcánicos se van a desarrollar, que tipo de evento, que día y a que lugares va a afectar.

La alarma en estos casos de erupción volcánica, es una indicación de la actividad sísmica en la región de interés, de tal magnitud, que podría ser una amenaza para la integridad del sistema de ductos.

Las principales acciones de prevención para el caso de interés son:

- En los impactos posibles de los flujos de lodo a los ductos en ríos que confluyen con los lahares. En este caso, es recomendable que los ductos se encuentren a profundidades mayores a las alcanzadas por la socavación de dichos flujos.
- Instalación de válvulas de bloqueo o compuerta a ambos lados del río, si no existieran, adicionalmente con control a distancia, para poder confinar el producto transportado y evitar el peligro de derrame por rotura del ducto.

Como acciones complementarias de prevención del riesgo, se recomienda:

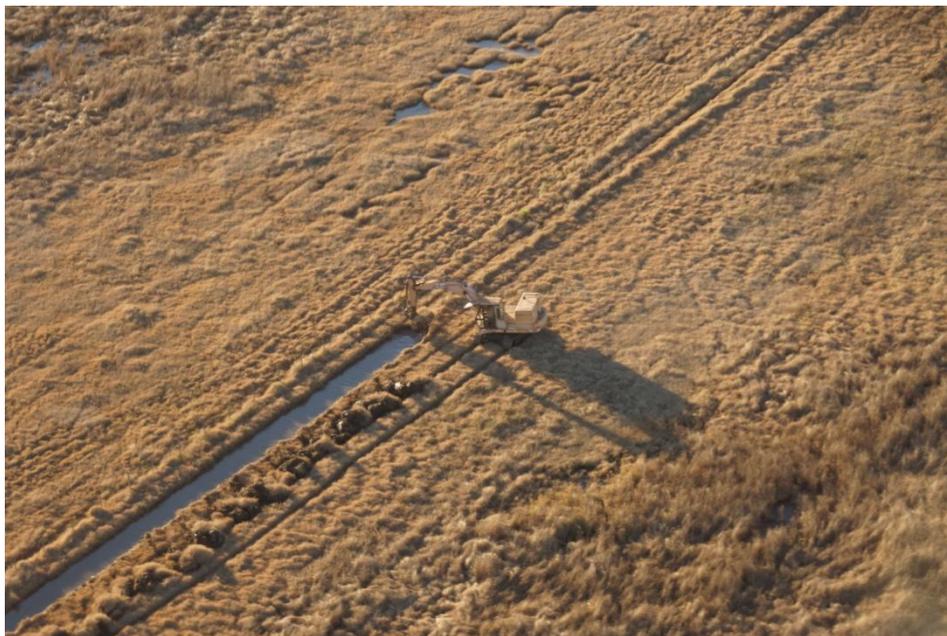
- Ampliar la cobertura de las redes de monitoreo con estaciones de última generación, para realizar una mejor caracterización de los parámetros sísmicos y volcánicos, lo cual contribuye a una mejor toma de decisiones para prevenir desastres posibles originados por dichos fenómenos (actualizar instrumentos de monitoreo).
- Fortalecimiento de las redes nacionales de monitoreo sísmico.
- Manejo de riesgos geotécnicos.
- Mapa sismo-tectónico, en el cual se identifiquen las zonas potencialmente sísmicas, capaces de generar o afectar la infraestructura de los ductos. Se identifican zonas geotécnicamente inestables.

6.5. Influencia de la actividad antrópica en la estabilidad de los derechos de vía de sistemas de transporte de hidrocarburos

Cada vez son más frecuentes las geoamenazas desencadenadas en los derechos de vía y alrededores, producto de cambios apreciables del uso del suelo y la alteración del medio ambiente por la actividad antrópica. Las operadoras de transporte de hidrocarburos han evidenciado en los análisis de causa-raíz de emergencias, producto del desencadenamiento de geoamenazas, el desarrollo de procesos de inestabilidad bajo condiciones normales de ocurrencia de factores detonantes como lluvias y sismos.



A continuación se presenta un marco conceptual relacionado con la importancia de gestionar políticas encaminadas al uso adecuado del suelo en los DDV y sus alrededores, con los entes territoriales, las comunidades y demás actores, con el fin de reducir las consecuencias adversas producto de la materialización de geoamenazas, tanto en el desarrollo de las actividades productivas de la comunidad como en el transporte de hidrocarburos.



Fuente: YPF.

Figura 6.15 Actividad antrópica sobre un DDV

6.5.1. El hombre y el medio ambiente geomorfológico

Dada la importancia del estudio de la influencia de las actividades del hombre sobre los riesgos por erosión, deslizamientos, flujos y avalanchas⁷², y la adaptación de las mismas en ambientes tropicales⁷³, resulta de gran utilidad comprender los conceptos que se presentan a continuación:

- Recursos geomorfológicos: estos incluyen los materiales en bruto en relación con los procesos geomorfológicos y las formas del terreno, ambos útiles para el hombre o que pueden ser útiles dependiendo de las condiciones o circunstancias sociales, económicas, y tecnológicas.
- Amenaza geomorfológica (geoamenaza): puede definirse como la probabilidad de que un cierto proceso de inestabilidad geomorfológica de una magnitud dada, pueda ocurrir en un cierto territorio en un período de tiempo dado.
- Actividad antrópica (proceso humano): es una acción específica que puede manifestarse mediante términos como: ganadería, agricultura, deforestación, expansión urbana, utilización (aprovechamiento o explotación) de recursos naturales, y obras de ingeniería.
- Vulnerabilidad: reúne los aspectos más complejos de todo lo que existe en relación con los procesos humanos para un área dada, como lo son: población, infraestructura civil, actividad

⁷² Panizza, 1999

⁷³ García, 2008

económica, organización social, planeación, programas de desarrollo, planes de ordenamiento territorial. Cada uno de estos aspectos o sus combinaciones se analiza en relación con su grado de exposición y las consecuencias que puedan sufrir ante la concreción u ocurrencia de la geoamenaza.

- Riesgo: es la probabilidad de daño a las personas, la infraestructura civil y el medio ambiente por la ocurrencia de una geoamenaza.
- Mitigación del riesgo: es algo que puede lograrse ya sea reduciendo la amenaza, la vulnerabilidad, o ambas.

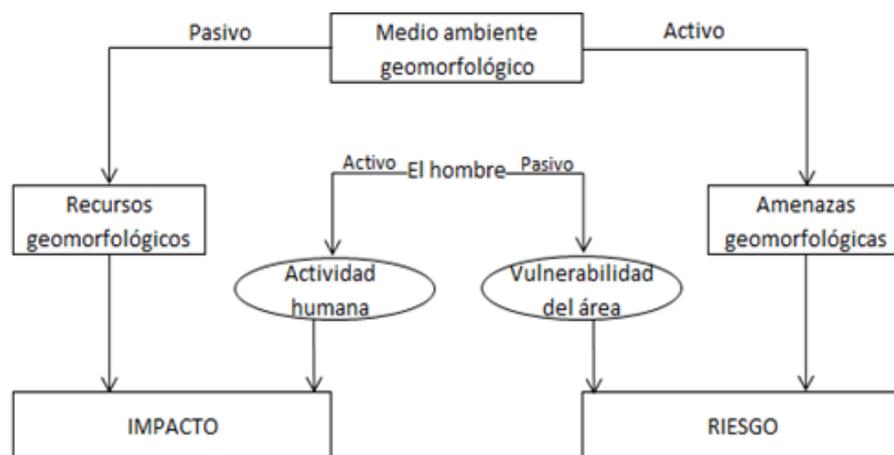
Con el fin de examinar las relaciones entre el hombre y el medio ambiente, entendido el segundo desde el punto de vista geomorfológico, deben considerarse las dos posibilidades principales siguientes (ver la Figura 6.16).

6.5.1.1. Recursos geomorfológicos en relación con la actividad antrópica

Aquí se toma el ambiente geomorfológico como elemento pasivo y la actividad antrópica como elemento activo; se llega a que un recurso puede ser alterado o destruido por la actividad humana y las consecuencias constituyen el impacto.

6.5.1.2. La amenaza geomorfológica en relación con la vulnerabilidad del área

En esta relación se considera el medio ambiente geomorfológico como elemento activo y la actividad antrópica como elemento pasivo, e implica la posibilidad de que una amenaza pueda alterar o destruir algo que existe relacionado con el hombre; la probabilidad de que se presenten las consecuencias puede definirse como el riesgo.



Fuente: Panizza (1999).

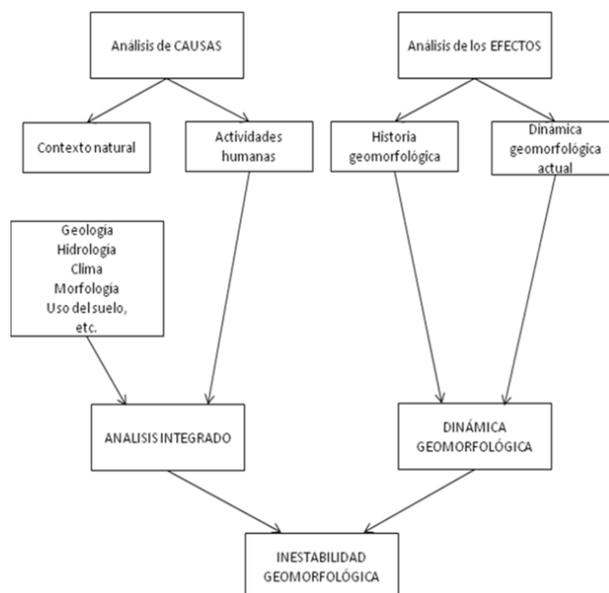
Figura 6.16 Relaciones entre el ambiente geomorfológico y la actividad antrópica

La evaluación de la amenaza geomorfológica (geoamenazas) es un aspecto de importancia singular para comprender la influencia de los procesos humanos en el desencadenamiento de geoamenazas. En primer lugar, se requiere definir por separado las causas de la inestabilidad (el contexto natural y



los proceso humanos) y los efectos de la inestabilidad (historia y dinámica geomorfológica). En segundo lugar se deben comparar causas y efectos.

En la Figura 6.17 se presenta un procedimiento lógico para determinar la inestabilidad geomorfológica considerando los procesos humanos.



Fuente: Panizza (1999).

Figura 6.17 Esquema de determinación de la inestabilidad geomorfológica

Panizza (op cit.) menciona que entre las causas que favorecen o previenen las geoamenazas, pueden citarse las condiciones o factores topográficos, geológicos, hidrogeológicos, climáticos y antrópicos. El análisis de estos factores indicará los límites dentro de los cuales puede desarrollarse la inestabilidad geomorfológica; en otras palabras, mediante dicho análisis será posible definir el rango de variabilidad por ejemplo para la predicción de procesos de inestabilidad en una cierta área, en un período de tiempo específico, en términos de área o volumen. A su vez, permite establecer el nivel de incidencia de la actividad antrópica tanto en el análisis de causalidad como en la dinámica de la geoamenaza.

6.5.2. Clasificación de los factores causantes de geoamenazas en función de su origen

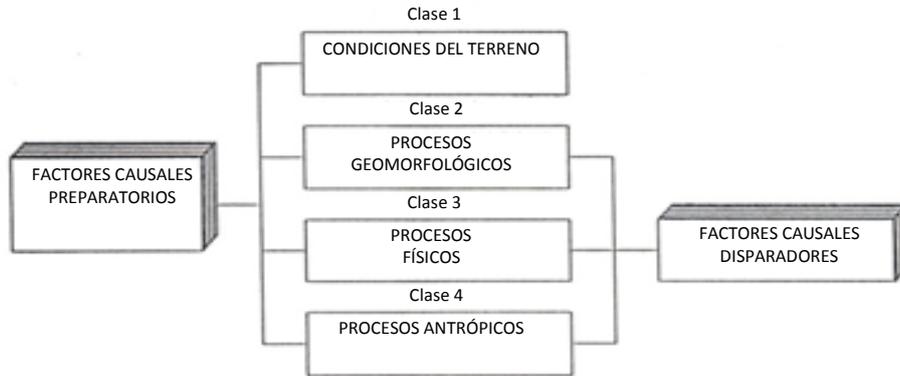
En los numerales anteriores se han tratado los factores contribuyentes y detonantes principales de geoamenazas relacionados tanto con la dinámica de la corteza terrestre (ej. factores intrínsecos como sismos y tectonismo) como los concernientes a la influencia climática (ej. factores extrínsecos como la temperatura y precipitación).

No obstante, complementando los conceptos de Panizza (op. cit.) estos factores se pueden definir tal y como se indica en la Figura 6.18, en función de su origen en:

- 1) Condiciones del terreno
- 2) Procesos geomorfológicos

- 3) Procesos físicos
- 4) Actividad antrópica.

Los explicados inicialmente en este capítulo (lluvias y sismos), son de origen natural y se relacionan en buena medida con procesos físicos, y de su interacción con el medio con procesos geomorfológicos.



Fuente: Popescu (1994).

Figura 6.18 Factores contribuyentes y detonantes de geoamenazas

De acuerdo con García - López (2003, 2011), las condiciones del terreno se relacionan específicamente con el grado o nivel de susceptibilidad del terreno en que se puede desarrollar una geoamenaza específica. En la práctica esta condición inherente del terreno se evalúa mediante el desarrollo de zonificaciones correspondientes a la división de la superficie del terreno dentro de áreas o sectores con grados de susceptibilidad claramente definidos⁷⁴. El grado de susceptibilidad se determina al relacionar las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas y de cobertura vegetal⁷⁵.

Las condiciones generales pueden ser determinadas mediante el análisis de información secundaria como mapas geológicos, topográficos, edafológicos, de uso del suelo, fotografías aéreas y satelitales; las condiciones particulares se derivarán del análisis de los resultados producto de la investigación del subsuelo por medio de inspección geotécnica detallada, ejecución de perforaciones, trincheras y apiques; las características mecánicas pueden ser determinadas por medio de ensayos de campo y laboratorio.

Los procesos geomorfológicos se relacionan con los cambios en las formas del terreno que pueden ser documentadas mediante la inspección minuciosa en los recorridos de los derechos de vía, por comparación de fotografías, el levantamiento de zonas inestables, el monitoreo del terreno a lo largo del tiempo, entre otros.

Los procesos físicos relativos al medio ambiente, pueden documentarse en el sitio por medio de instrumentación (pluviómetros, piezómetros, sismógrafos), que pueden sustituirse en algunas ocasiones con la observación cuidadosa de los niveles del agua en cuerpos de agua o registrando el daño causado por sismos. Las variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales en la profundidad pueden indicar los cambios en el tiempo.

⁷⁴ Varnes, 1984

⁷⁵ Adaptado de Krynine & Judd, 1957



Las actividades antrópicas, especialmente las relacionadas con los cambios geométricos de la ladera (excavación y sobrecarga de taludes), de uso del suelo (deforestación, expansión urbana, actividad minera y piscícola), y de modificación de las condiciones hidráulicas (ej. estrangulamiento y encauces de corrientes de agua) pueden documentarse en los recorridos de línea por medio de observaciones de campo y mediante análisis multitemporal de fotografías aéreas. Como es evidente, la relación de estos procesos se hace en función de la integridad del derecho de vía y de la infraestructura de transporte de hidrocarburos.

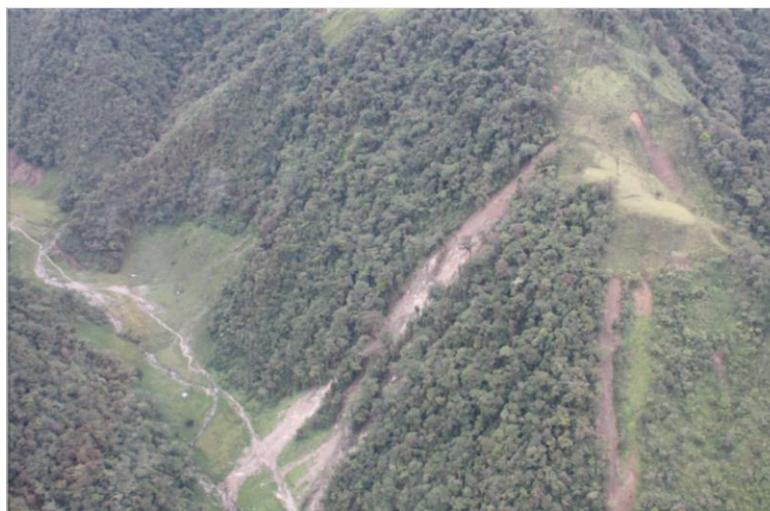
En particular, cobra relevancia el efecto de pérdida de retención del agua en las cuencas hidrográficas, proceso directamente asociado a la disminución de la capacidad de evapotranspiración de la vegetación y de recarga hídrica. Las manifestaciones de inestabilidad generalizada en las laderas, la ocurrencia de avenidas torrenciales y avalanchas con mayor capacidad destructiva, la divagación lateral de las corrientes de agua y la inundación de terrenos que históricamente no han sido afectados por este tipo de procesos, son producto de estos cambios en el sistema climático⁷⁶.

Como lo mencionan García-López et al. (1998) la investigación separada de las geoamenazas naturales y las desencadenadas por la acción de procesos humanos es útil por razones administrativas y de tratamiento teórico. La alteración antrópica induce o puede incrementar el desencadenamiento de geoamenazas que interfieren en los planes de mantenimiento del derecho de vía y eventualmente de la integridad de la infraestructura de transporte de hidrocarburos.

La atención del evento amenazante puede llegar a ser compleja cuando la problemática no se circunscribe al área de influencia directa de los sistemas de transporte de hidrocarburos, ya que para lograr una gestión efectiva, el plan de mantenimiento busca, en la mayoría de casos, mitigar aquellos factores que desencadenaron la geoamenaza. Bajo estas circunstancias, se requerirá una solución integral enfocada al manejo del territorio (ordenamiento territorial), donde el operador de las líneas de conducción de hidrocarburos es uno de los actores a estar presto a la gestión corresponsable del riesgo.

Como ejemplo de lo anterior, en la Figura 6.19 se presenta la afectación al Oleoducto TransAndino de ECOPETROL por los flujos de tierra y de detritos provenientes de la parte alta de la ladera (400 m ladera arriba respecto a la ubicación del derecho de vía) bajo condiciones de lluvias normales en julio de 2014.

⁷⁶ De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC-1997, el sistema climático lo conforma la biósfera (seres vivos que habitan el planeta), la atmósfera (capa gaseosa que rodea la Tierra), la hidrósfera (cuerpos de agua en estado líquido o sólido), la litósfera (materiales que conforman la corteza terrestre), y ahora la antropósfera (capa construida por el ser humano asociada con su capacidad de transformar el entorno).



Fuente: ECOPETROL.

Figura 6.19 Flujos de tierra y de detritos que afectaron la integridad del Oleoducto TransAndino⁷⁷

6.5.3. Gestión del territorio y su relación con geoamenazas

Con el avance de las dinámicas del territorio y su relación con el desencadenamiento de geoamenazas en el entorno de los derechos de vía de líneas de transporte de hidrocarburos, se vislumbra la necesidad de acompañar al estado y entes territoriales en la definición de estrategias que permitan armonizar la infraestructura de transporte de hidrocarburos con el territorio⁷⁸. Para ello, se hace uso de las políticas nacionales de planeación territorial y de gestión del riesgo con el fin de generar escenarios de corresponsabilidad en lo asociado a riesgos tecnológicos.

Los documentos de ordenamiento territorial son instrumentos de planeación, orientados a la administración del desarrollo físico del territorio a través de la regulación del uso y la ocupación del suelo, con el fin de garantizar, entre otros aspectos, el acceso a bienes y servicios públicos por parte de los ciudadanos, el mejoramiento de la calidad de vida de los mismos y la mitigación de condiciones de riesgo frente a las amenazas naturales y tecnológicas. En los planes se incorporan análisis de amenaza y riesgo sustentados en estudios técnicos, con el fin de lograr la mejor planificación física.

Al identificar geográficamente tanto aquellos eventos amenazantes existentes y potenciales, como los elementos vulnerables que bajo ciertas circunstancias pueden alterar la armonía del territorio (en nuestro caso la infraestructura de transporte de hidrocarburos), se definen entre otros aspectos, las zonas aptas y no aptas para ciertos usos del suelo (ej. desarrollo urbano junto con las condiciones técnicas y urbanísticas para su ocupación). Los planes de ordenamiento territorial son un mecanismo proactivo y efectivo de gestión del riesgo, al integrar los análisis citados y definir criterios para la intervención correctiva y prospectiva del riesgo.

⁷⁷ Julio de 2014

⁷⁸ PNUD-ECOPETROL, 2014



Por su parte, las políticas nacionales de gestión del riesgo se asocian con la planificación del territorio en función del riesgo. Los esfuerzos se enfocan en la incorporación efectiva del riesgo de desastre como un determinante ambiental en los planes de ordenamiento territorial, ya que condiciona el uso y ocupación del territorio, así como el desarrollo seguro y sostenible. En ciertos casos, como la participación de países en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), este aspecto es regulado en lo concerniente a directrices respecto a accidentes químicos.

Con el propósito de propiciar la inclusión de aspectos asociados a riesgos tecnológicos dentro de los planes de ordenamiento territorial, se consideran las siguientes políticas, como aspectos fundamentales de una estrategia de gestión corresponsable del riesgo a partir de planificación territorial:

- Diagnóstico del territorio en función de lo establecido en los documentos de ordenamiento territorial, para determinar áreas tanto ocupadas no planificadas como áreas con incompatibilidad de uso del suelo.
- Identificación de actores presentes en el territorio con los que la empresa debe interactuar para cumplir sus propósitos de gestionar de manera corresponsable el riesgo generado por la interacción entre la infraestructura de transporte de hidrocarburos y el territorio.
- Identificación y mitigación de procesos de inestabilidad producto de la deforestación intensa, la expansión urbana descontrolada, y otros cambios de uso del suelo apreciables.
- Fortalecimiento en la preparación y atención ante eventuales emergencias con la participación comunitaria.
- Generar un aporte a la regulación del ordenamiento territorial, logrando la incidencia normativa requerida que propenda por una convivencia segura y armónica con el entorno en el que opera la infraestructura de transporte de hidrocarburos.

6.6. Aspectos complementarios a tener en cuenta en el plan de monitoreo de lluvias y sismos

Sumado a los conceptos generales sobre los Sistemas de Alerta Temprana (SAT), descritos al comienzo de este capítulo, una vez que se dispara una alerta o una alarma por estos detonantes específicos, la verificación en sitio de interés geotécnico se realizará mediante por lo menos uno de los recorridos descritos en el Capítulo 4 (aéreos o terrestres, general o puntual), cuya selección será función, entre otras, de la magnitud del evento, de su accesibilidad, y de la proximidad al sitio de interés de una estación meteorológica en el caso de lluvias, o la distancia al epicentro en el caso de sismo.

Asimismo, si en la zona en la que se disparó una alerta se cuenta con alguno de los tipos de instrumentación puntual descrita en el Capítulo 5, el monitoreo o control se realizan específicamente con base en lo establecido en dicho capítulo, según aplique a cada uno de los sub-numerales allí tratados, y de acuerdo con las actividades e instrumentos de monitoreo instalados.

En este punto se resalta la importancia de una adecuada selección del plan de monitoreo e inspección de un sitio, toda vez que al analizar de manera integrada la información recopilada se puede tomar una decisión oportuna en cuanto a la atención de emergencia, y se pueden establecer las mejores obras para mitigación de la amenaza, algunas de ellas reseñadas en el Capítulo 3.



7. MONITOREO DE DUCTOS

7.1. Introducción

En este capítulo se centra la discusión sobre el monitoreo del ducto por su relación con las geoamenazas y no por su relación con la condición de integridad mecánica asociada a otras amenazas como lo es la corrosión externa o interna. En ese sentido, el lector podrá alimentar su lectura con base en lo descrito en capítulos precedentes, donde se pueden identificar los criterios para determinar las geoamenazas y sus agentes detonantes (Capítulo 3), la evaluación de los efectos que generan en la superficie del terreno cuando actúan (Capítulo 4), el monitoreo de los efectos que ocasionan en el terreno (Capítulo 5) y así también, el monitoreo de agentes detonantes (Capítulo 6). El presente capítulo está dedicado a la medición y monitoreo del efecto de las geoamenazas sobre el ducto.

Dado que -en la ecuación de riesgo- el ducto es el elemento vulnerable, y sobre el cual se evalúa la probabilidad de falla, se debe tener en cuenta su grado de exposición (probabilidad de que la geoamenaza le afecte) y su capacidad de resistencia (capacidad de soportar las geoamenazas). No obstante, el monitoreo (de deformaciones) que se puede ejecutar sobre el ducto con el fin de identificar su relación con las geoamenazas, es una medida indirecta, tanto del nivel de exposición como del de resistencia, razón por la cual la información obtenida por estos métodos por sí sola no es concluyente y debe correlacionarse con el análisis mecánico del ducto y de las condiciones de entorno, como se ha mencionado en los demás capítulos de esta guía.

Se resalta que el monitoreo del ducto, mencionado en este capítulo, es el de las deformaciones resultado de las geoamenazas, que se constituyen como una medición secundaria de deformación; es decir, los movimientos del suelo generan desplazamientos del ducto y deformaciones medibles en sus paredes, y estos desplazamientos y deformaciones son diferentes de los ocasionados por esfuerzos internos o termodinámicos, que constituyen una medición primaria de deformación. En otras palabras, si el ducto experimenta sobrepresión, calor o frío extremo, el monitoreo medirá directamente la deformación impartida por estos efectos.

A continuación se describen algunas técnicas para el monitoreo de la deformación del ducto, con el fin de identificar su aplicabilidad de acuerdo con los efectos que sobre el mismo ocasionan las geoamenazas.

7.2. Clasificación de efectos por geoamenazas en ductos

Sobre el ducto pueden actuar fuerzas (posteriores a la construcción) que en el proceso de interacción entre el suelo y el ducto, pueden causarle efectos que no se pueden anticipar. Estas fuerzas pueden deberse a cargas externas por masas inestables que actúan sobre él y que en función del vector de la carga respecto del alineamiento del ducto, pueden causar esfuerzos de flexión, torsión o corte en el mismo.

Existen varias técnicas de monitoreo e inspección de ductos que mejoran el conocimiento de la condición de integridad mecánica del sistema. Esto finalmente se ve reflejado también en el cuidado de las comunidades y del medioambiente en el que se encuentra, al identificar, ubicar y trazar



posibles indicaciones de anomalías antes que se transformen en pérdidas de contención o que afecten la operatividad del sistema.

Las tecnologías actuales y el monitoreo permanente permiten la detección de casi cualquier cambio en el ducto. Entre las técnicas para determinar la deformación del ducto por efecto de las geoamenazas, se encuentra la inspección de líneas con herramientas instrumentadas especializadas, el escáner 3D (aplicable solamente a ductos expuestos), y la instalación de medidores de deformación puntuales (galgas de deformación) o de serie continua a lo largo del ducto. Estos dos últimos pueden ser de medición manual o totalmente automatizados.

7.2.1. Herramientas de inspección de ductos

Las herramientas de inspección de ductos (*In Line Inspection* - ILI), se emplean en la industria del transporte de hidrocarburos para la obtención de información geo-referenciada (información inercial), de la geometría del ducto y para la detección de diversos tipos de anomalías, cuyos resultados (datos de entrada) son fundamentales para la planeación de programas de integridad. Estas herramientas son dispositivos que se insertan y se mueven al interior del ducto, generalmente impulsadas por el fluido bombeado.

Su exclusividad, en comparación con las herramientas estándar de inspección con calibrador, es que éstas proveen la representación geográfica en 3D y geométrica del ducto con alta precisión, y permiten obtener los detalles de la sección transversal interna y los datos del eje axial. Esto proporciona a los operadores información para identificar, caracterizar y localizar abolladuras, arrugas, curvaturas, ovalidades y deformaciones a flexión con alto grado de precisión.

La dinámica asociada a los efectos de geoamenazas, como por ejemplo, inestabilidad de taludes, subsidencia, levantamiento por pandeo, cruces de ríos, libre expansión, sobrecarga, entre otras, puede también ser evaluada y analizada mediante la incorporación de datos de la herramienta en un modelo de elementos finitos del ducto, lo que permite mejorar el entendimiento de las respuestas a los cambios en las condiciones de carga (esfuerzo/deformación) asociadas con el sistema.

Estas herramientas también son útiles una vez identificadas las anomalías inerciales y geométricas a partir de las corridas de herramientas instrumentadas, ya que además de permitir establecer los tramos objeto de actividades de remediación para las deformaciones identificadas, permiten seleccionar los puntos donde se pueden localizar los medidores puntuales de deformación de tipo galgas de deformación o de serie continuada, instaladas en la superficie externa del ducto, a fin de realizar el seguimiento y control correspondiente.

A continuación, se describen los dos módulos más utilizados en este tipo de inspecciones, para identificar esa interacción entre geoamenazas y el ducto.

7.2.1.1. Herramienta inercial

Las herramientas de inspección inercial tienen como función principal medir la coordenadas (x, y, z) de localización del ducto para determinar su alineamiento en planta y perfil y -a partir de esta información- calcular las deformaciones por flexión a lo largo del ducto.



Los resultados de la inspección con esta herramienta brindan información sobre la ubicación espacial del ducto, pudiendo evaluarse digitalmente en cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG).

Si se tiene una línea de base de referencia de la ubicación espacial del ducto, se pueden determinar los sitios con desplazamientos relativos entre campañas de inspección que, por lo general, se realizan con una frecuencia de 5 años. Sin embargo, dependiendo de la evaluación de los resultados, esta puede reducirse según los siguientes criterios:

- Cuando se presentan desplazamientos relativos entre corridas, estos pueden relacionarse con problemas de estabilidad o actividad geotécnica en la zona, difíciles de identificar mediante las actividades convencionales de inspección de ductos, por lo que es importante estimar una tasa de desplazamiento que pueda ser monitoreada con inspecciones inerciales cada 2 años, como mínimo. Si sumado a estos eventos, los eventos climáticos como precipitación, actividad sísmica u otros son de consideración, la frecuencia de las inspecciones debe ser anual.
- En ductos con condiciones normales, las corridas ILI se realizan con periodicidad de varios años debido a su alto costo; como se mencionó anteriormente, cada 5 años o dependiendo del programa de integridad que se tenga. En el periodo entre corridas, otras actividades de monitoreo, como topografía o lecturas de inclinómetros y modelaciones numéricas, permiten calcular la tasa de movimiento del suelo e inferir la del ducto.

En los casos en los que se valida la interacción con cargas externas, las herramientas inerciales permiten estimar la magnitud, dirección y extensión de los movimientos, y las deformaciones asociadas que afectan al ducto.

Mediante el análisis de la información obtenida con una corrida de la herramienta, se pueden identificar las áreas donde hay flexión en el ducto a través de la correlación de datos de su posición, suministrados por la unidad de medida inercial (IMU), datos del odómetro y coordenadas geográficas actuales (*Universal Transverse Mercator*, UTM).

Cuando se lleva a cabo la corrida de la herramienta inercial inmediatamente después de la construcción, la flexión inicial por construcción (fuerzas inactivas) puede separarse de la flexión debido a geoamenazas (fuerzas activas) a futuro.

De acuerdo con lo anterior, la herramienta inercial permite calcular la deformación total a flexión de un ducto en el momento de la inspección, lo cual incluye la deformación inducida durante la construcción y la deformación causada por las condiciones de operación y fuerzas geotécnicas que afectan al ducto durante la operación (por ejemplo: inestabilidad del terreno, asentamiento del suelo, cruces de ríos, etc.).

Al analizar la deformación a flexión inducida por la interacción del ducto con el suelo, se debe despreciar la alta deformación plástica residual presente en las curvas. La deformación a flexión en las curvas está usualmente en el rango de 0,5 a 2%, es limitada en las juntas circunferenciales y se caracteriza por un cambio abrupto de la deformación en el inicio y el fin de una curva. La deformación a flexión inducida por el movimiento del suelo es usualmente de amplitud pequeña, a intervalos mayores a una unión, y experimenta un cambio gradual sobre las secciones de transición más largas.



La deformación horizontal puede ser un índice de inestabilidad del terreno, aunque también puede inducirse durante la construcción, como resultado de la pérdida de linealidad en la zanja. La deformación vertical es usualmente el resultado de la adaptación del ducto al desnivel de la zanja construida o al perfil del terreno, levantamiento por pandeo u otros procesos de inestabilidad geotécnica.

Con la primera corrida es posible determinar cambios en la dirección o la inclinación en la vecindad de las juntas soldadas, donde -por especificación de construcción- los tramos deben ser rectos. Además, si se detectan curvaturas, estas deben relacionarse con movimientos del terreno; para éste análisis es importante contar con los datos crudos, donde se reporta el azimut y la inclinación del ducto en intervalos cortos.

7.2.1.2. Herramienta geométrica

Las herramientas geométricas tienen las siguientes funciones:

- Determinar el diámetro interno.
- Determinar deformaciones geométricas.
- Determinar la localización y orientación de la deformación.
- Determinar el radio de la curva del ducto y la longitud.
- Medir la velocidad del medio en el ducto.

Como se mencionó, la determinación de la geometría interna de un ducto proporciona detalles meticulosos de importancia para la determinación de cada deformación que el ducto presente a lo largo del recorrido. Para este propósito, la herramienta contiene varias unidades y sensores que se describen en el Anexo 1 de este capítulo.

7.2.2. Sensores de deformación

Entre los medidores de deformación puntuales utilizados (también conocidos como sensores o galgas de deformación) están los extensómetros de hilo vibrante y más recientemente, de fibra óptica. Estos elementos se disponen de forma equidistante (mínimo 3), de esta manera se verifica que mientras en uno o dos de los instrumentos se mide tensión, en el (los) restantes se debe identificar compresión. Dado que es una medida discreta, es necesario tener en cuenta que la no identificación de deformaciones, por sí sola, no quiere decir que alguna sección vecina del ducto, no instrumentada, no esté sufriendo por el desplazamiento, debido a que es función del estado de esfuerzos al que esté sometida.

Si bien la medida que proveen estos elementos es discreta, suele ser de mucha utilidad cuando se requiere una evaluación precisa de los cambios de deformación en el ducto, cuando es mantenido en un deslizamiento activo. La determinación de la etapa de cambios de deformación longitudinal requiere, como mínimo, la instalación de 3 galgas de deformación alrededor de la circunferencia del ducto; esto permite el cálculo de las deformaciones máxima y mínima alrededor del mismo. Una instalación típica de las tres galgas de deformación permite conformar un anillo de lectura, con uno en la parte superior del ducto y otros dos localizados a un intervalo de 120°, como se muestra en la siguiente figura (Figura 7.1).



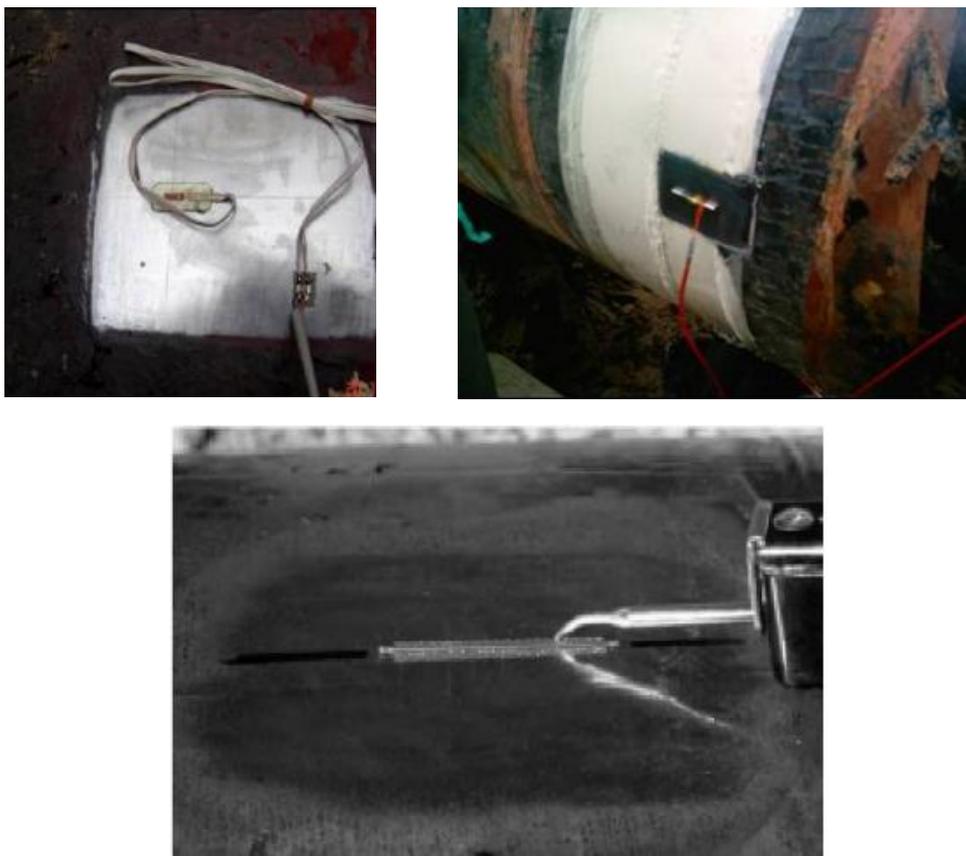
Fuente: Cabeza et al. (2015). Análisis del Comportamiento Geotécnico de Oleoductos.

Figura 7.1 Instalación típica de galgas de deformación en el ducto

La localización de la instalación de cada una de las galgas de deformación a lo largo del ducto en un deslizamiento, debe ser determinada por un geólogo o un ingeniero geotecnista, basada en una interpretación confiable de los límites del deslizamiento y de la información de la última corrida de herramienta inteligente disponible. Normalmente, dos o tres posiciones de galgas de deformación son satisfactorias en pequeños deslizamientos; sin embargo, pueden requerirse instalaciones adicionales en grandes deslizamientos. Las galgas de deformación se deben ubicar a una distancia que permita obtener la mayor medida de deformación del ducto. En el Anexo 3 de este Capítulo se presenta la metodología para el cálculo de deformaciones junto con un ejemplo.

Las galgas de deformación más usadas son de alambre vibratorio y soldadas por punto. Estos medidores comprenden un alambre tensionado dentro de un tubo delgado. La frecuencia de oscilación del alambre cambia, así como la longitud de las galgas de deformación y la tensión en el alambre. El cambio equivalente de la deformación es leído por un lector digital directamente en “microstrains”. Las galgas de deformación son de aproximadamente 5 cm de longitud, y se fabrican con una brida delgada de acero inoxidable que puede ser soldada al ducto por puntos.

Al instalar las galgas de deformación se retira el revestimiento del ducto para dejar al descubierto el metal y lograr un perfil de anclaje (Figura 7.2). Posteriormente se aplica un recubrimiento sobre la instalación de las galgas como protección de corrosión.



Fuente: OCENSA.

Figura 7.2 Galgas de deformación soldadas al ducto.

El proceso de soldadura por punto de baja energía (50 J) no afecta al ducto y ha sido aceptado como seguro e inofensivo por numerosas compañías de ductos, razón por la cual, en la mayoría de los casos, las galgas de deformación son soldadas mientras el ducto está en servicio. Un sensor colector colocado sobre la galga de deformación inicia la oscilación del alambre y mide su frecuencia de vibración. Un cable adjunto al sensor transfiere la señal a una ubicación conveniente para lecturas manuales o remotas.

A cada sensor-colector se le pueden monitorear los cambios de temperatura con base en un nivel inicial configurado al momento de la instalación. Sin embargo, dado que el coeficiente de expansión térmico de los medidores, típicamente cercano a $11\mu\epsilon/^\circ\text{C}$, corresponde aproximadamente al valor de la mayoría de los ductos; usualmente es necesaria una pequeña corrección por temperatura.

El cambio en el diseño de las galgas de deformación ha sido escaso en los últimos 20 años, sin embargo, la tecnología de los sensores colectores y los sistemas de lectura han cambiado: desde la oscilación constante usada originalmente, a la tecnología valor y lectura. Esta tecnología reciente ofrece ventajas en la fiabilidad de la señal y los requisitos de acondicionamiento de la señal para la recolección automática de datos y su transmisión.

El mantenimiento de las galgas de deformación usualmente se ha limitado a las reparaciones ordinarias de cables, conexiones y terminales sobre el terreno, aunque algunos sensores han fallado después de muchos años de buen funcionamiento.



7.2.3. Escáner 3D

Los escáneres 3D son equipos portátiles íntegros para mediciones tridimensionales de alta resolución y precisión de objetos físicos. Sus principales funciones son:

- Medida de profundidad máxima utilizando la técnica de arista recta en ambas direcciones.
- Detección automática de la profundidad máxima.
- Creación automática de secciones cruzadas en 2D en ambas direcciones en la zona de máxima profundidad.
- Relación profundidad/diámetro.
- Diámetro máximo a 90° de la abolladura.
- Medida de la longitud y el ancho para cada abolladura.

En lugares donde se tiene conocimiento de una abolladura, o a partir de la inspección del diámetro interno con la herramienta geométrica, se pueden identificar y dimensionar deformaciones externas (abolladuras, ovalaciones y rebordes) y otras obstrucciones internas, utilizando los escáneres 3D.



Fuente: Brochure Pipecheck. Solución de escaneado en 3D para la evaluación de la integridad de ductos.

Figura 7.3 Vista de escáner 3D

El vínculo dinámico que se genera entre el ducto y el escáner (Figura 7.3) garantiza la precisión y la resolución en cualquier condición, incluyendo entornos sometidos a vibraciones, obteniendo resultados con una precisión de ± 50 micras.



7.2.4. Otros métodos de monitoreo y medición de deformación

Dentro de los métodos de medición y monitoreo lineal, además de los descritos anteriormente se pueden considerar los siguientes:

7.2.4.1. Monitoreo topográfico en juntas (para ductos expuestos) y mediante chimeneas (varillas instaladas sobre el lomo del ducto)

En condiciones en las que el ducto se encuentra expuesto, toma relevancia técnica el registro de lecturas topográficas sobre las juntas. Dicha acción permite la comparación directa del posicionamiento inicial del ducto vs. la lectura de estudio. Asimismo, se pueden instalar varillas fijadas al lomo del ducto, en posición vertical y mediante una abrazadera, que permiten registrar las tendencias de desplazamiento del eje longitudinal del ducto, una vez que se realiza su tapado y ante el efecto de movimientos potenciales de suelos.

7.2.4.2. Fibra óptica geotécnica

La fibra óptica geotécnica permite identificar tendencias del comportamiento del movimiento del suelo y por ende, se identifican y correlacionan con potenciales afectaciones al eje longitudinal del ducto. Existen algunas técnicas de estudio en las que se basa la fibra óptica geotécnica, con la finalidad de identificar con anticipación posibles deformaciones, condiciones y comportamientos de desplazamientos del ducto. Se aclara que para el presente documento no se tuvo evidencia clara de dicha técnica.

7.2.4.3. Monitoreo e inspección en juntas mediante calicatas de verificación

Cuando el informe de la corrida ILI reporte pérdida de metal, deformación de la geometría u otras anomalías, y en la correlación con su localización en la línea, resulte que el ducto se encuentra enterrado; se pueden realizar calicatas de verificación en las cuales se realicen básicamente las siguientes inspecciones:

- Si la comparación de los resultados de la corrida ILI con la línea base del ducto indica desplazamiento excesivo del mismo, fruto del movimiento geotécnico, se deben tomar acciones de apertura de la zanja o calicatas de verificación de acuerdo con los procedimientos de cada compañía operadora para permitir su alivio.
- Inspección del recubrimiento del ducto.
- Validación y medición de la deformación del diámetro, pérdida de metal u otra anomalía.
- Ensayos no destructivos, si fuera el caso, a las juntas de la estructura de soporte (por ejemplo, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, o ultrasonido de defectología) según criterio del especialista en integridad, con el fin de identificar discontinuidades abiertas a la superficie que no cumplan con los criterios de aceptación y rechazo del código AWS D1.1, numeral 6.9, Tabla 6.1.



- Verificar el contacto entre el ducto y el suelo: podrían observarse vacíos, zonas compactas y zonas sueltas. También es posible determinar desplazamientos en los manguitos de las juntas (cuando se tienen) o estrías en el suelo o en el recubrimiento.

7.2.4.4. Monitoreo de ductos en cruces aéreos

En el monitoreo de ductos en cruces aéreos se aplican técnicas de monitoreo topográfico combinadas con herramientas inerciales que permiten identificar y relacionar los posibles desplazamientos del ducto con los de las zonas aledañas. Sin embargo, es necesario tener en cuenta también la estructura de soporte (que puede incluir las torres y cables), toda vez que la respuesta del conjunto permita identificar si existen efectos asociados a cargas externas.

Por lo anterior, se recomienda adicionalmente incluir un plan de inspección que tenga en cuenta los siguiente:

- Inspección del recubrimiento del ducto.
- Inspección y valoración del ducto en búsqueda de pérdidas de metal, deformaciones de diámetro u otras anomalías, lo cual se puede correlacionar con información de corridas ILL.
- Inspección y evaluación de todas las juntas circunferenciales mediante ultrasonido de defectología.
- Inspección visual a la estructura de cimentación de los soportes, con el fin de evidenciar inconvenientes en el concreto (fisuras o desprendimientos), socavación por corrientes hídricas, asentamientos, o afloramientos de agua, entre otros.
- Inspección visual de los componentes estructurales del cruce (torres, cables, grapas, acoples, etc.) con el fin de evidenciar el estado del recubrimiento, la presencia de oxidación, corrosión, desgaste, fisuras, deformaciones, o ausencia de elementos o partes.
- Ensayos no destructivos a las juntas de la estructura de soporte (por ejemplo, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, o ultrasonido de defectología) según criterio del especialista de integridad, con el fin de identificar discontinuidades abiertas a la superficie que no cumplan con los criterios de aceptación y rechazo del código AWS D1.1, numeral 6.9, Tabla 6.1.
- Inspección de los cables que permita identificar pérdidas de sección transversal y fallas localizadas.
- Cálculo y verificación de tensión en los cables principales del cruce aéreo, comparada con su esfuerzo nominal admisible.

El porcentaje de inspección debe realizarse de acuerdo con lo establecido en los procedimientos internos de cada compañía.

7.3. Algunos criterios para interpretar la deformación en el ducto y su relación con los efectos producidos por geoamenazas

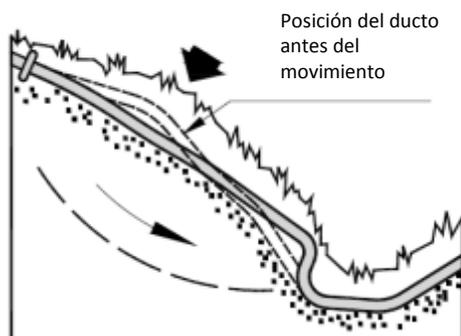
Los cambios de deformación longitudinal causados por variaciones de temperatura dependen en gran manera de las condiciones climáticas locales. Los cambios causados por deformaciones de



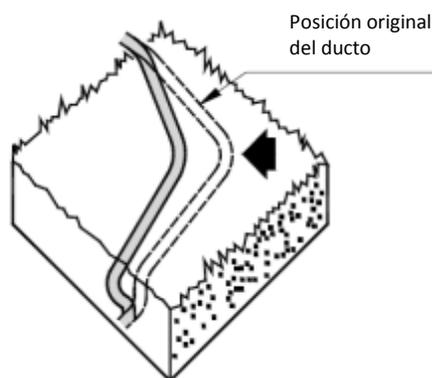
deslizamientos dependen de la magnitud de las deformaciones y la orientación del ducto en el deslizamiento.

Un ducto paralelo a la dirección del movimiento del deslizamiento generalmente desarrolla deformaciones a tensión en la parte superior del deslizamiento y deformaciones a compresión en la parte baja del deslizamiento.

a) Deslizamiento paralelo



b) Deslizamiento transversal

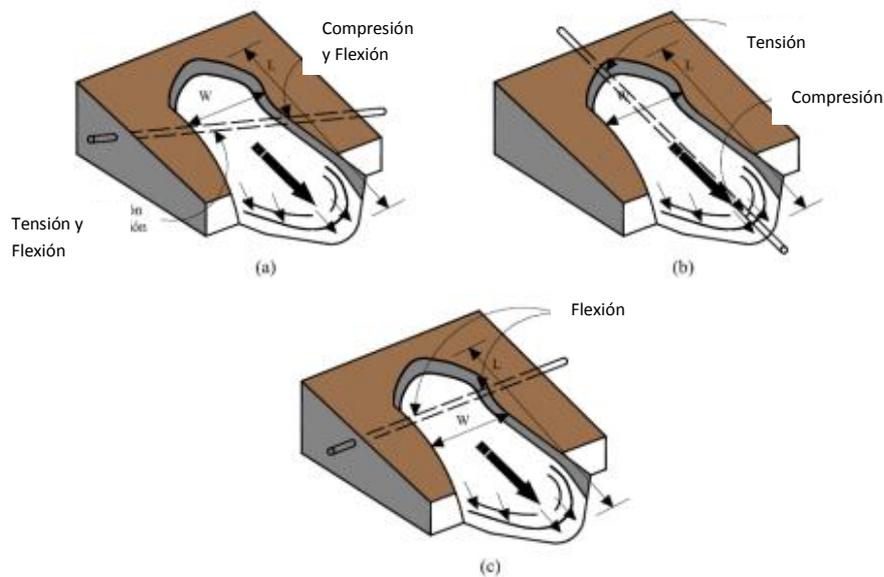


Fuente: Ingeniería y Geotecnia Ltda. 1991

Figura 7.4 Movimientos de masa en ductos

Un ducto transversal al movimiento del deslizamiento puede desarrollar deformaciones a tensión en la parte central del deslizamiento y una combinación de deformaciones a tensión y compresión (flexión) en los límites del deslizamiento.

La deformación permanente del terreno se refiere a un Desplazamiento Irrecuperable del Suelo (DPS, Deformación Permanente del Suelo) debida a fallamiento, deslizamiento, asentamiento o desprendimiento lateral inducido por licuefacción. En general, la deformación permanente del suelo representa uno de los mayores riesgos que puede causar daños sustanciales a los ductos.



Referencias:

- (a) El ducto atraviesa la zona DPS en cualquier ángulo.
- (b) El ducto atraviesa la zona DPS en la dirección del movimiento.
- (c) El ducto atraviesa la zona DPS perpendicular al movimiento.

Fuente: Ingeniería y Geotecnia Ltda. 1991.

Figura 7.5 Tipos de deformación del ducto respecto a su orientación en función del deslizamiento

Los aumentos en las deformaciones totales a flexión del ducto, obtenidas de inspecciones en línea de tipo inercial, se comparan con los valores de deformación a flexión (a tensión y compresión) admisibles establecidos por cada una de las compañías que operan y controlan la integridad de los ductos. Estos criterios se deben determinar a partir de la calidad de los materiales, calidad de la soldadura en construcción, índices de operación, estudios *full scale* (destructivos con materiales reales del ducto) y todos los estudios de integridad que puedan ayudar a disminuir el carácter empírico o teórico de los criterios utilizados en la industria.

A continuación se presenta la recomendación para el uso de las fórmulas empíricas de criterios de deformación determinados a partir de la formulación de *Gresnigt*⁷⁹.

En general, las fallas ocasionadas por deformación a flexión en los movimientos de ductos asociados a condiciones geotécnicas de suelo inestable, ocurren en soldaduras como consecuencia de un mecanismo de falla a tensión que ocasiona la ruptura del material correspondiente a la zona afectada por el calor (HAZ – *Heat Affected Zone*). Por otra parte, las fallas en el cuerpo del ducto obedecen a mecanismos de falla a compresión que generan abolladuras y arrugas. En consecuencia, en los movimientos de ductos asociados a condiciones geotécnicas de suelo inestable, los máximos aumentos en las deformaciones a flexión respecto a la línea base, en el cuerpo del ducto, obtenidos de la comparación de inspecciones inerciales, se confrontan con los criterios a compresión.

⁷⁹ *Recommended Strain Levels for monitoring Ocesa Pipelines, Kiefner & Associates Inc. 2006*



Asimismo, los máximos aumentos en las deformaciones a flexión respecto a la línea base, en soldaduras, obtenidos de la comparación de inspecciones inerciales, se confrontan con los criterios a tensión. Todo lo anterior aplica sólo a casos en los que no se tiene en cuenta el efecto geométrico ocasionado por las diferencias entre el vector principal de la carga externa y el alineamiento del ducto en el tramo de aplicación de la carga y en las zonas adyacentes.

| | CRITERIO A TENSIÓN | CRITERIO A COMPRESIÓN |
|-------------------|---|---|
| CRITICO | $TC = 196$ | $CC = 100\% \left[0.5 \left(\frac{t}{D} \right) - 0.0025 + 3000 \left(\frac{PD}{2Et} \right)^2 \right]$ Gresnigt empirical relationship |
| EMERGENCIA | $TE = 100\% \left[0.75 - \left(0.01 - 30 \frac{PD}{2Et} \right) \right]$ | $CE = 0.90 (CC)$ |
| ADMISIBLE | $TA = 100\% \left[0.50 - \left(0.01 - 30 \frac{PD}{2Et} \right) \right]$ | $CA = 0.67 (CC)$ |
| |  |  |
| | t = Espesor de Pared D = Diámetro nominal P = Presión de Operación | E = Módulo de Young |

Fuente: "Recommended strain levels for monitoring OCENSA pipelines", 2006, Dennis C. Johnston y Michael J. Rosenfeld, P.E.

Tabla 7.1 Correlaciones para determinar criterios de deformación en ductos

7.4. Anexo 1 - Aspectos técnicos de interés de las herramientas inerciales y geométricas

7.4.1. La herramienta inercial

La herramienta inercial está diseñada para satisfacer una gran variedad de necesidades usando un método aproximado e incorporando un número variable de sensores diferentes. La herramienta puede ser diseñada a medida y adaptada a las líneas de gas o fluido con modificaciones menores. La inspección suministra información geográfica en 3D y geométrica de los sistemas a los operadores de ductos.

Existen dos tecnologías primarias que usualmente son útiles para generar dicha información: la unidad de medición inercial (IMU), que proporciona las características estructurales y geográficas del ducto; y los brazos mecánicos de un calibrador, los cuales capturan el diámetro interno del ducto.

Otros dispositivos y sensores complementan la herramienta: odómetros, transmisores de rastreo del pig raspador, sistema de memoria estable y fuente de alimentación.

Por lo general la herramienta inercial está acondicionada con los siguientes sensores:

- El **Sistema de Navegación Inercial (SNI)** comprende giroscopios con velocidad angular y acelerómetros lineales. El sistema mide la ruta precisa que el Pig toma durante el recorrido en el



ducto. Este sistema es utilizado para producir un plano detallado de la línea, mide la curvatura e identifica cualquier característica que afecte la linealidad del ducto.

- Los **odómetros** miden la distancia que se ha movido el *Pig* a lo largo de la línea (alineamiento topográfico) y la velocidad instantánea en la línea.
- Los **sensores de presión y temperatura** miden la presión y temperatura en la línea durante la corrida del *Pig*.
- Los **calibradores** miden el diámetro interno del ducto, ovalidad, tamaño y forma de abolladuras.

7.4.1.1. Sistemas de medida inercial

Los datos del vector posicional recopilados por la herramienta durante la inspección representan un conjunto de información crítica necesaria para el cálculo preciso de la deformación a flexión y curvatura del ducto.

Los sistemas de medida inercial analíticos no involucran una referencia específica pero usan giroscopios y acelerómetros externos para calcular la orientación relativa entre el estado inicial y actual del sistema. Este tipo de sistema es llamado “Sistema *Strapdown* Inercial”. La unidad de medida de este sistema tiene tres sensores angulares ortogonales entre sí y tres acelerómetros ortogonales entre sí, adheridos rígidamente al cuerpo en el cual se ha de implementar el sistema.

Generalmente, la herramienta inercial usa *Strapdown*; giroscopio de fibra óptica basado en la unidad de medida inercial (IMU) para adquirir la posición e información en el entorno del ducto. Los sistemas de navegación inercial utilizan datos de acelerómetros y sensores inerciales de velocidad angular (giroscopios) para determinar una posición física del cuerpo y la velocidad relativa con respecto a alguna referencia de coordenadas. Las unidades de medida no llegan a ser sistemas de navegación inercial hasta que los datos que generan hayan sido procesados para suministrar información posicional. La herramienta registra todos los datos de la IMU y esos datos son post-procesados luego de la ejecución para suministrar información de posición.

7.4.1.2. Procesamiento de datos

El estudio con la herramienta inercial suministra un esquema, el perfil y la deformación a flexión del ducto. Esto permite localizar al ducto en el sistema de coordenadas (UTM) y detectar su movimiento entre cada ejecución. La posición del ducto es suministrada en términos de Norte, Este y Cota como una función del levantamiento topográfico.

- **Posición del ducto**

Los datos son trasladados, rotados y escalados a los “puntos de amarre” con coordenadas conocidas. Estos puntos son típicamente seleccionados en válvulas, soldaduras, curvas, transición de espesores o cualquier otra característica del ducto que pueda ser detectada directa o indirectamente por los sensores de la herramienta.

Las coordenadas de estos puntos son usualmente obtenidas por GPS. Este procedimiento suministra la corrección de desplazamiento a largo plazo, lo cual puede introducir un error de posición absoluta en el estudio con el paso del tiempo.



7.4.2. La herramienta geométrica

Como se mencionó, la determinación de la geometría interna de un ducto proporciona detalles meticulosos de importancia para la determinación de cada deformación que el ducto presente a lo largo del recorrido. Para este propósito la herramienta lleva varias unidades y sensores que se describen brevemente a continuación:

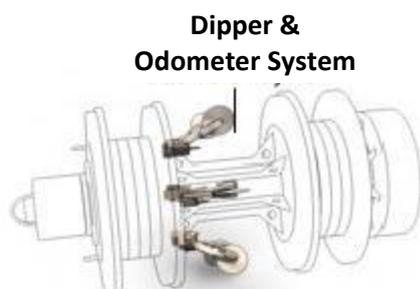
- **Unidad de odómetros y “dippers”**

Para entender mejor la función de los odómetros y *dippers* es necesaria su definición, proporcionada a continuación:

“*Dippers*” – Mide el ángulo del brazo *dipper* desde el cuerpo hasta la pared del ducto.

Odómetros – Mide distancia y velocidad, y localiza anomalías. La velocidad se mide mediante el sensor “ODO”, que mide las revoluciones de cada rueda del odómetro y registra la distancia.

Los “*dippers*”, así como los odómetros, indican las mediciones exactas del diámetro del ducto, así como las curvas y las distancias entre soldaduras, pero principalmente la localización de anomalías que haya en él, es decir, tienen como fin detectar cada detalle interno o cambio en la pared del ducto. Éstos determinan curvas, diámetro interno y distancia entre soldaduras.



Fuente: Performance Specification (2008), ROSEN Europe B.V.

Figura 7.6 Sistema de “*dipper*” y odómetro

La Figura 7.6 muestra un raspador de inspección geométrica con *dipper* y odómetro, que permite determinar la geometría interna del ducto con la finalidad de deducir la circunferencia interna del ducto, curvas, anomalías y soldaduras, para así comprobar si es factible o no introducir cualquier otro tipo de instrumento.

- **Unidad MDS (sensor electromagnético de distancia)**

La unidad MDS es una de las partes más importantes dentro del equipo instrumentado, pues mide los cambios de flujo magnético percibidos durante la inspección al ducto.

Su función principal es hacer las mediciones de distancia desde el sensor hasta la pared interna del ducto sin contacto, y se utiliza principalmente en la detección de fallas en un ducto, pero empleando el ensayo no destructivo por corrientes de Eddy.

Este tipo de sensor contiene 8 bobinas que trabajan bajo el principio “*Eddy Current*” con el objetivo de medir la distancia del sensor a la pared del ducto. Este tipo de sensores electromagnéticos tiene la



capacidad de ser utilizado para determinar curvas, anomalías, arrugas o cualquier discontinuidad que el ducto presente a lo largo de una trayectoria.

El uso de la técnica de “*Eddy Current*” permite realizar la detección de defectos o anomalías en el ducto, tales como: picaduras, abolladuras, soldaduras, golpes, algún tipo de corrosión, grietas, fisuras y fracturas, entre otros. Las ventajas del uso de éstos equipos son principalmente su rapidez y que no tienen dificultad debido a la geometría interna del ducto (no se atascan).

- **Unidad de mapeo**

Los equipos de mapeo son exactos por su medición y determinan la orientación y posición exacta en donde se encuentra un defecto. Esto se debe a que funcionan principalmente por medio de acelerómetros y giroscopios que permiten visualizar el ducto en 3^{ra} dimensión.

Los equipos de mapeo son utilizados también en la medición de la geometría interna de los ductos. Su ventaja es la unidad de navegación inercial, también llamada IMU, la cual permite digitalizar la orientación y posición del ducto en 3 dimensiones por medio de un sistema computarizado con el que mide la localización exacta de los defectos o daños a lo largo del mismo.

- **Unidades de sensores**

Las unidades de sensores son las encargadas de detectar anomalías que se encuentren dentro de la estructura a inspeccionar. Estos sensores combinan dos tecnologías: por medios mecánicos y electrónicos. El sensor electrónico detecta la geometría interna del ducto con la unidad de sensores electromagnéticos a distancia (unidades MDS), y el sensor de posición supervisa la posición mecánica del brazo que se encuentra en la parte inferior.

Los sensores que básicamente lleva la herramienta son:

- Unidad de sensores.
- Unidad de odómetros.
- “E-box” y unidad de almacenamiento.
- Unidad de batería.

La unidad de sensores a distancia es la más utilizada en la inspección de ductos, proporcionando como resultado un informe completo de todos los defectos encontrados.

La visualización y posición de una anomalía causada por cualquier daño, defecto, abolladura, etc. se pueden determinar por medio de las unidades de sensores que proporcionan las herramientas instrumentadas de inspección interna.

7.5. Anexo 2 - Clasificación de defectos en ductos⁸⁰

Un defecto es una anomalía existente en el ducto, cuyas dimensiones pueden ser variables, por lo cual no está dentro de los parámetros permisibles de una norma de calidad, o no cumple con una

⁸⁰ J.L. González Velázquez. “Procedimiento de Análisis de Integridad de Ductos para Transporte de Hidrocarburos”, V.2.0-2001, Feb, 2001



especificación exacta. A continuación se presenta/indica la clasificación de los defectos por su evolución, origen, geometría y comportamiento mecánico.

7.5.1. Por su evolución

Los defectos por evolución suelen darse por el paso del tiempo, sin ser detectados fuera de los planes de mantenimiento correctivo o preventivo. Éstos se subdividen en: defectos progresivos y defectos estáticos.

- **Defectos progresivos**

Son aquellos cuyas dimensiones se incrementan con el tiempo, debido a efectos ambientales, mecánicos y de servicio. Dentro de los defectos progresivos se incluyen la corrosión uniforme, la corrosión localizada, las delaminaciones y el ampollamiento por hidrógeno, los agrietamientos ocasionados por corrosión-esfuerzo, y los agrietamientos por fatiga.

- **Defectos estáticos**

Son defectos cuyas dimensiones no aumentan con el paso del tiempo. Dentro de los defectos estáticos se tienen las abolladuras, entallas, rayones, deformación, pliegues, desalineamientos, defectos geométricos, defectos de soldaduras y defectos del material⁸¹.

7.5.2. Por su origen

Los defectos por el origen se clasifican en: defectos de manufactura, defectos causados por el servicio, por fuerzas externas, y por construcción, los cuales se definen a continuación.

- **Defectos de manufactura**

Ocurren durante la fabricación del ducto e incluyen: grietas, traslapes, incrustaciones durante el rolado, endurecimientos localizados, laminaciones, inclusiones y segregación.

- **Defectos causados por el servicio**

Se deben a la combinación de un material susceptible con un ambiente agresivo y en ciertos casos con esfuerzos, entre los cuales se tienen los desgastes por corrosión uniforme y localizada, externa e interna, la fragilización por hidrógeno, el agrietamiento por corrosión-esfuerzo y el agrietamiento-ampollamiento inducido por hidrógeno.

- **Defectos causados por fuerzas externas**

Se deben al contacto físico con otros objetos, así como a las presiones por movimiento de suelos, subsidencia y presiones de viento o marea, que producen abolladuras, rayaduras, pandeo y deformación.

⁸¹ GAI, 2003, CAP.II



- **Defectos de construcción**

Son introducidos durante el tendido del ducto e incluyen la socavación - fusión incompleta, falta de penetración, grietas y desalineamientos en soldaduras, abolladuras, deformación en frío, etc.⁸².

7.5.3. Por su geometría

Los defectos por su geometría están relacionados por todas aquellas causas que de alguna manera afectan el diámetro interno del ducto, así como su geometría (diámetro, espesor y esfuerzos a los que está sometido un ducto).

- **Puntuales**

Son defectos pequeños, cuyas dimensiones (largo y ancho) son del mismo orden de magnitud que el espesor. Normalmente este tipo de defectos no degrada la resistencia del ducto y podrían ocasionar riesgos de fugas o derrames localizados.

- **Axiales**

Son defectos cuyo ancho es menor al equivalente a 5 minutos técnicos de la circunferencia y su largo es al menos diez veces el ancho. Son muy sensibles a la presión y pueden producir fugas, derrames o explosiones.

- **Circunferenciales**

Son defectos cuya dimensión mayor está en el ancho y son sensibles a la flexión y expansión.

- **Aereales**

Son aquellos cuyo largo y ancho son similares y a su vez mucho mayores que el espesor, siendo sensibles a la presión⁸³.

7.5.4. Por su comportamiento mecánico

Los defectos por su comportamiento mecánico son principalmente causados por el uso de la estructura, ya que no se operan a los márgenes establecidos.

- **Defectos controlados por la presión**

Su crecimiento y falla son impulsados por el esfuerzo circunferencial inducido por la presión interna, pudiendo fallar cuando la presión rebasa un determinado valor, o bien si su tamaño es lo suficientemente grande como para fallar a la presión normal de operación. Éstos generan: grietas axiales, erosión, corrosión uniforme, picaduras, cazuelas, delaminaciones escalonadas, golpes, entalles agudos, rayas longitudinales, defectos en la costura longitudinal y bandas de inclusiones.

- **Defectos controlados por el esfuerzo longitudinal**

Su comportamiento es el mismo que en el caso anterior, excepto que la fuerza impulsora es el esfuerzo longitudinal en el ducto. La principal contribución al esfuerzo longitudinal después de la

⁸² GAI, 2003, CAP.II

⁸³ Idem ⁸²



presión interna son las flexiones y pandeos del ducto. Los defectos susceptibles de falla bajo este esfuerzo son todos aquellos cuya dimensión máxima esté en la dirección circunferencial.

En la Tabla 7.2 se presenta un resumen para determinar el tipo de defecto en el ducto de acuerdo con su origen, y en su caso, especificar la manera en la que se manifiesta.

| DEFECTO | CONTROL | ORIGEN | EFFECTO |
|--|-------------------|---|--|
| Grietas longitudinales | Presión | Enfriamiento rápido SCC (<i>Stress Corrosion Cracking</i>). Rotura por corrosión, esfuerzo o bajo tensión, fatiga | Fuga, reducción de resistencia, ruptura |
| Grietas circunferenciales | Flexión y pandeo | Ídem | Ídem |
| Incrustaciones en la placa durante el rolado | Presión | Defecto de fábrica | Reducción de la resistencia, ruptura |
| Endurecimientos localizados | Presión | Enfriamiento rápido y segregación | Agrietamiento en servicio (ver grietas) |
| Socavación, fusión incompleta y falta de penetración en soldadura de campo | Presión y flexión | Mala aplicación de soldadura | Reducción de la resistencia |
| Traslapes y marcas de rolado en placa | Presión | Defecto de fábrica | Reducción de la resistencia |
| Corrosión uniforme y erosión | Presión | Fluido corrosivo y arrastre de sedimento | Reducción de la resistencia, ruptura |
| Abolladuras, pliegues y deformaciones | Presión | Fuerzas externas | Disminución de la resistencia, agrietamientos y corrosión localizada |
| Entalle longitudinal | Presión | Ídem | Agrietamiento, falla |
| Laminaciones simples y ampollas | Presión | Agrietamiento inducido por hidrógeno | Fugas y disminución de la resistencia |
| Desalineamientos | Flexión y presión | Construcción | Ídem |

Fuente: Medinaceli et al. (2015). Análisis de Integridad de Ductos, YPFBT.

Tabla 7.2 Tipos de defectos, control, origen y efecto

7.6. Anexo 3 - método de lectura de galgas de deformación de hilo vibrante puntuales en las juntas

7.6.1. Procesamiento de los datos

Los datos provenientes de toda lectura periódica de instrumentación mecánica deben compararse contra una lectura anterior o lectura inicial. Es necesario obtener en cada junta monitoreada la diferencia de deformaciones axiales en cada sensor de deformación, en el período transcurrido entre las dos lecturas.



| DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN ENTRE LAS DOS LECTURAS | | | | |
|--|------------------|--|----------------------|---------------------------|
| ESQUEMA | POSICIÓN HORARIA | 1. LECTURA INICIAL O LECTURA DE REFERENCIA | 2. LECTURA PERIÓDICA | 3. DIFERENCIA ENTRE 1 Y 2 |
| | | Deformación (μe) | Deformación (μe) | Δ Deformación (μe) |
| | 12:00 | 2500 | 2500 | 0 |
| | 02:00 | 1000 | 4500 | 3500 |
| | 09:00 | 4500 | 1000 | -3500 |

Fuente: Instructivo de medición e interpretación de lecturas de instrumentación mecánica, OCENSA.

Tabla 7.3 Sección de procesamiento de los datos. Arreglo de 3 galgas a 90°

En el reporte de interpretación de los datos se encuentra una hoja de cálculo para cada tipo de arreglo posible, para la distribución de las galgas (3 galgas a 90°, 3 galgas a 120° y 6 galgas a 60°).

7.6.2. Determinación de las deformaciones axiales en la circunferencia del ducto

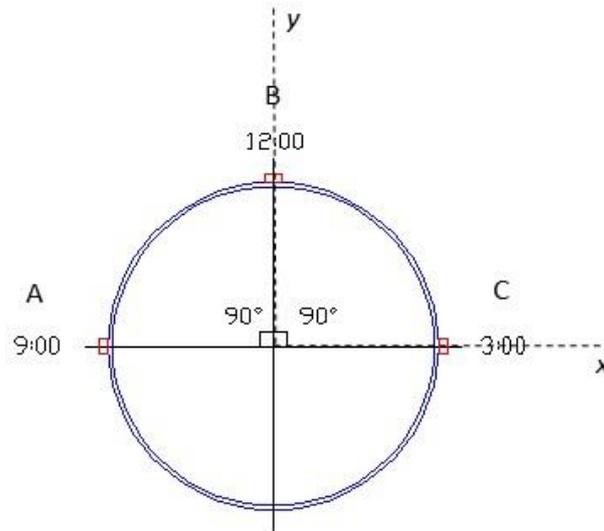
Una vez obtenida la diferencia de deformación en cada una de las galgas o sensores de deformación entre la lectura periódica y la lectura de referencia, se procede a calcular en cada junta las deformaciones axiales en toda la circunferencia del ducto. Esto es posible de hacer ya que, conociendo los valores de deformación axial en tres puntos de la circunferencia del ducto separados 90° o 120° entre sí, es posible obtener el valor de deformación axial en cualquier punto de la circunferencia. Esto se hace empleando las siguientes ecuaciones según sea el tipo de distribución de las galgas.

7.6.2.1. Arreglo de tres galgas a 90°

Al escoger este tipo de arreglo para el monitoreo del ducto es posible conocer las deformaciones axiales en cualquier punto de la circunferencia por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 1: } Z = \frac{A+C}{2} + \frac{C-A}{2} \cdot \frac{x}{r} - \frac{A+C-2B}{2} \cdot \frac{y}{r}$$

En donde Z es la deformación axial en el punto (x,y) , x e y son las coordenadas cartesianas con origen en el centro del ducto, r es el radio externo del ducto y A , B y C son las deformaciones axiales a las 9:00, 12:00 y 3:00 horas respectivamente, obtenidas por medio de los sensores de deformación (ver la Figura 7.7).



Fuente: Instructivo de medición e interpretación de lecturas de instrumentación mecánica, OCENSA.

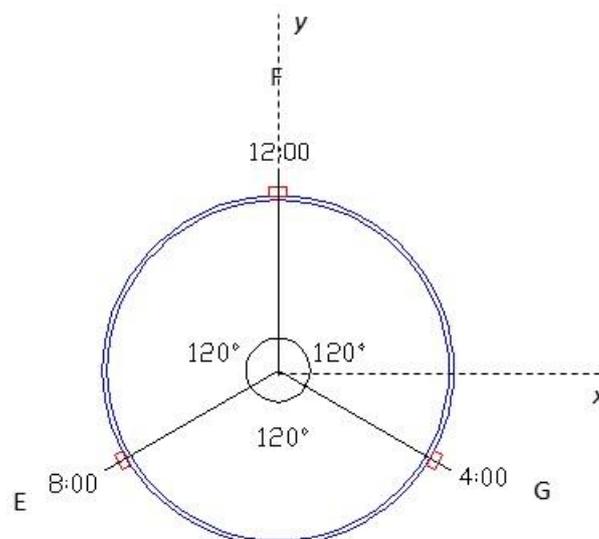
Figura 7.7 Arreglo de 3 galgas a 90°

7.6.2.2. Arreglo de tres galgas a 120°

Al escoger este tipo de arreglo para el monitoreo del ducto es posible conocer las deformaciones axiales en cualquier punto de la circunferencia por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 2: } Z = \frac{E + F + G}{3} - \frac{\sqrt{3} \cdot (E - G)}{3} \cdot \frac{x}{r} - \frac{(E + G - 2 \cdot F)}{3} \cdot \frac{y}{r}$$

En donde Z es la deformación axial en el punto (x,y), x e y son las coordenadas cartesianas con origen en el centro del ducto, r es el radio externo del ducto y E, F y G son las deformaciones axiales a las 8:00, 12:00 y 4:00 horas respectivamente, obtenidas por medio de los sensores de deformación (ver la Figura 7.8).



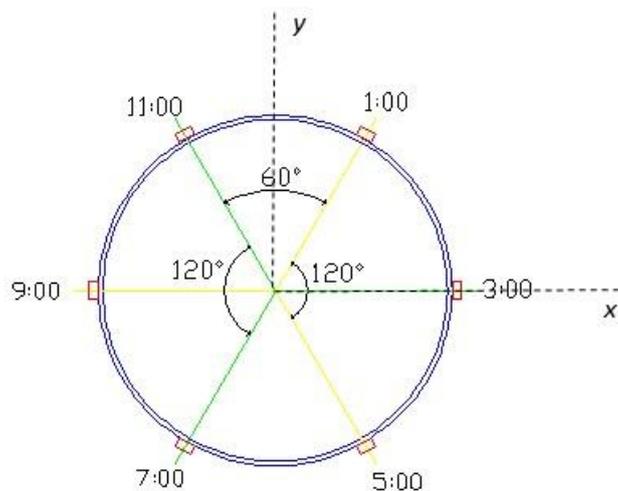
Fuente: Instructivo de medición e interpretación de lecturas de instrumentación mecánica, OCENSA.

Figura 7.8 Arreglo de 3 galgas a 120°



7.6.2.3. Arreglo de seis galgas a 60°

Este tipo de arreglo es una combinación de dos arreglos de tres galgas a 120°, y la deformación se calcula igualmente con la ecuación 2 pero girando el eje y 30° en sentido anti horario (arreglo en línea verde en la Figura 7.9), y girando el eje y 30° en sentido horario (arreglo en línea amarilla en la Figura 7.9). El objetivo de este arreglo es poder obtener las deformaciones axiales en la circunferencia del ducto aún cuando se presenten fallas en algún sensor de deformación, lo cual no se puede hacer al emplear una distribución de tres galgas únicamente.



Fuente: Instructivo de medición e interpretación de lecturas de instrumentación mecánica, OCENSA.

Figura 7.9 Arreglo de 6 galgas a 60°



7.6.3. Tabulación de los datos

Para cada junta monitoreada se debe obtener una tabla en donde se presente la deformación en porcentaje y en micro-deformación ($\mu\epsilon$), en función de la posición en el ducto, tal como se presenta en la Tabla 7.4.

| grados | x | y | deformación ($\mu\epsilon$) | deformación (%) |
|--------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0.4572 | 0 | 0 |
| 10 | 0.079391947 | 0.450254105 | 607.7686218 | 0.060776862 |
| 20 | 0.15637161 | 0.429627466 | 1197.070502 | 0.11970705 |
| 30 | 0.2286 | 0.395946815 | 1750 | 0.175 |
| 40 | 0.293882495 | 0.350235519 | 2249.756634 | 0.224975663 |
| 50 | 0.350235519 | 0.293882495 | 2681.155551 | 0.268115555 |
| 60 | 0.395946815 | 0.2286 | 3031.088913 | 0.303108891 |
| 70 | 0.429627466 | 0.15637161 | 3288.924173 | 0.328892417 |
| 80 | 0.450254105 | 0.079391947 | 3446.827136 | 0.344682714 |
| 90 | 0.4572 | 2.80069E-17 | 3500 | 0.35 |
| 100 | 0.450254105 | -0.079391947 | 3446.827136 | 0.344682714 |
| 110 | 0.429627466 | -0.15637161 | 3288.924173 | 0.328892417 |
| 120 | 0.395946815 | -0.2286 | 3031.088913 | 0.303108891 |
| 130 | 0.350235519 | -0.293882495 | 2681.155551 | 0.268115555 |
| 140 | 0.293882495 | -0.350235519 | 2249.756634 | 0.224975663 |
| 150 | 0.2286 | -0.395946815 | 1750 | 0.175 |
| 160 | 0.15637161 | -0.429627466 | 1197.070502 | 0.11970705 |
| 170 | 0.079391947 | -0.450254105 | 607.7686218 | 0.060776862 |
| 180 | 5.60138E-17 | -0.4572 | 4.28802E-13 | 4.28802E-17 |
| 190 | -0.079391947 | -0.450254105 | -607.7686218 | -0.060776862 |
| 200 | -0.15637161 | -0.429627466 | -1197.070502 | -0.11970705 |
| 210 | -0.2286 | -0.395946815 | -1750 | -0.175 |
| 220 | -0.293882495 | -0.350235519 | -2249.756634 | -0.224975663 |
| 230 | -0.350235519 | -0.293882495 | -2681.155551 | -0.268115555 |
| 240 | -0.395946815 | -0.2286 | -3031.088913 | -0.303108891 |
| 250 | -0.429627466 | -0.15637161 | -3288.924173 | -0.328892417 |
| 260 | -0.450254105 | -0.079391947 | -3446.827136 | -0.344682714 |
| 270 | -0.4572 | -8.40207E-17 | -3500 | -0.35 |
| 280 | -0.450254105 | 0.079391947 | -3446.827136 | -0.344682714 |
| 290 | -0.429627466 | 0.15637161 | -3288.924173 | -0.328892417 |
| 300 | -0.395946815 | 0.2286 | -3031.088913 | -0.303108891 |
| 310 | -0.350235519 | 0.293882495 | -2681.155551 | -0.268115555 |
| 320 | -0.293882495 | 0.350235519 | -2249.756634 | -0.224975663 |
| 330 | -0.2286 | 0.395946815 | -1750 | -0.175 |
| 340 | -0.15637161 | 0.429627466 | -1197.070502 | -0.11970705 |
| 350 | -0.079391947 | 0.450254105 | -607.7686218 | -0.060776862 |
| 360 | -1.12028E-16 | 0.4572 | -8.57604E-13 | -8.57604E-17 |

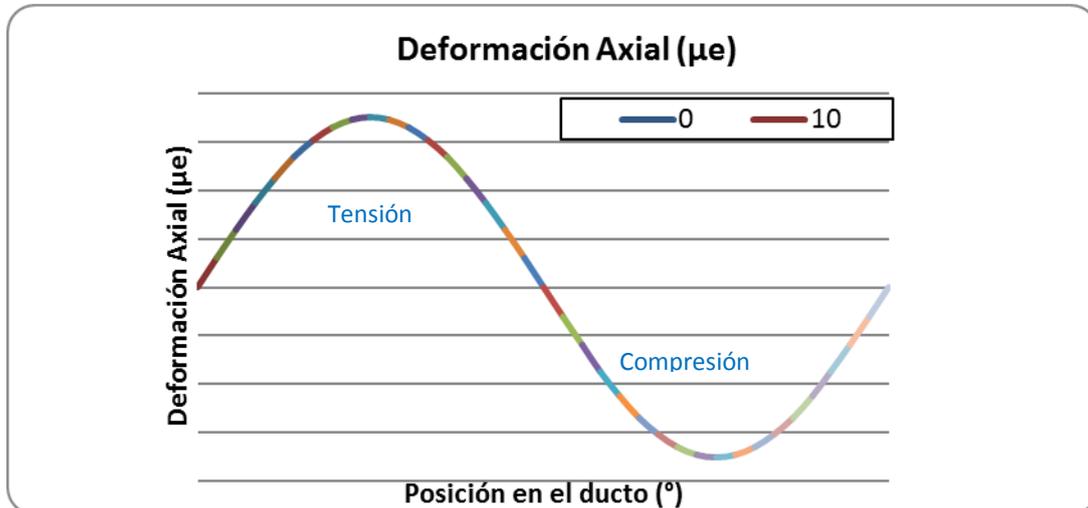
Fuente: Instructivo de medición e interpretación de lecturas de instrumentación mecánica, OCENSA.

Tabla 7.4 Presentación de los datos (ejemplo para un arreglo de tres galgas a 90°)

Los datos de la Tabla 7.4 fueron obtenidos como ejemplo, por medio de la ecuación 1 a partir de los datos de deformación que se encuentran en la Tabla 7.3 (arreglo de tres juntas a 90°). En la Tabla 7.4, las deformaciones positivas indican deformaciones en tensión y las negativas indican deformaciones en compresión.

7.6.4. Gráfico de deformación axial vs. posición en el ducto

Una vez obtenida la tabla de datos de deformación (Tabla 7.4) se procede a graficar los datos de deformación axial contra la posición en el ducto, tal como se muestra en la Figura 7.10.



Fuente: Instructivo de medición e interpretación de lecturas de instrumentación mecánica, OCENSA.

Figura 7.10 Deformación axial vs. posición en el ducto

7.6.5. Criterios de evaluación

Las deformaciones máximas en tensión y compresión halladas en cada junta deben ser comparadas contra las deformaciones permisibles y de emergencia, determinadas según la relación diámetro/espesor (D/t) del ducto.

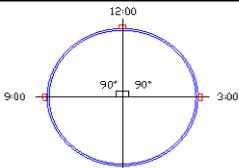
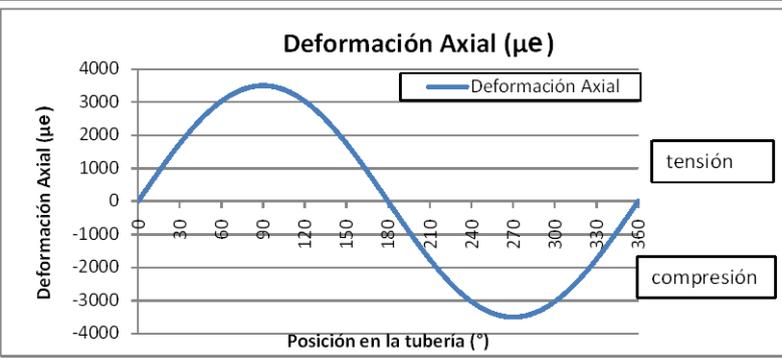
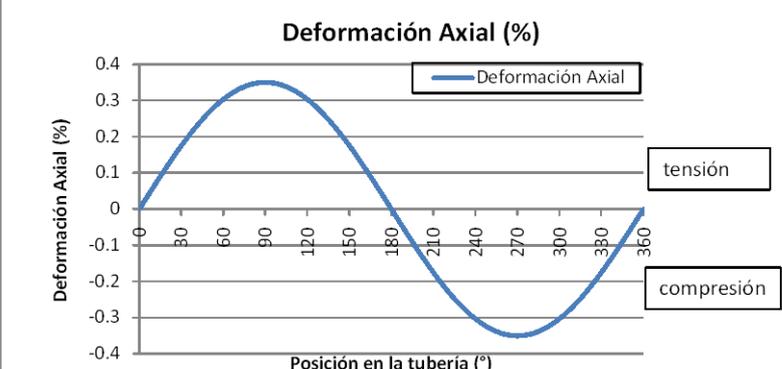
Reporte de interpretación de los datos

El análisis de los datos de todas las juntas monitoreadas debe quedar plasmado en el **Reporte de interpretación de los datos de instrumentación mecánica**. Este reporte debe permitir procesar los datos tomados en dos lecturas diferentes, calculando la tabla de deformaciones axiales en la circunferencia del ducto; elaborando el gráfico de deformación axial vs. posición en el ducto; y determinando las deformaciones máximas a tensión y compresión entre las dos lecturas comparadas.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para galgas de deformación localizada a 90° :



7.6.5.1. Arreglo de tres galgas a 90°

| Fecha del Reporte: | | OCE-XX-XXX-XXX | | |
|---|------------------|--|-------------------------------|--|
| NOTA: SOLO LLENAR LAS CASILLAS EN VERDE | | Pagina 1. | | |
| REPORT DE INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE INSTRUMENTACIÓN MECÁNICA | | | | |
| Abscisa de la junta monitoreada: | 000+000 |  | | |
| Diametro de la tubería (pulgadas): | 36 | | | |
| Fecha lectura inicial: | 14/07/2009 | | | |
| Fecha lectura periódica: | 15/08/2009 | | | |
| Espesor de la tubería (pulgadas): | 0.75 | | | |
| ARREGLO DE TRES GALGAS A 90° | | | | |
| DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN ENTRE LAS DOS LECTURAS | | | | |
| ESQUEMA | POSICIÓN HORARIA | 1. LECTURA INICIAL O LECTURA DE REFERENCIA | 2. LECTURA PERIÓDICA | 3. DIFERENCIA ENTRE 1 Y 2. |
| | | Deformación ($\mu\epsilon$) | Deformación ($\mu\epsilon$) | Δ Deformación ($\mu\epsilon$) |
|  | 12:00 | 2500 | 2500 | 0 |
| | 03:00 | 1000 | 4500 | 3500 |
| | 09:00 | 4500 | 1000 | -3500 |
| CÁLCULO DEL CAMBIO DE LA DEFORMACIÓN AXIAL EN CUALQUIER PUNTO DE LA CIRCUNFERENCIA DE LA TUBERÍA ENTRE LAS LECTURAS 1 Y 2. | | | | |
|  | | | | |
|  | | | | |

Fuente: OCENSA

Tabla 7.5 Ejemplo de cálculo para galgas de deformación localizada a 90°



OCE-XX-XXX-XXX
Pagina 2.

REPORTE DE INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE INSTRUMENTACIÓN MECÁNICA



OCENSA
Oleoducto Central S.A.

| Diámetro en metros | | 0.9144 | | |
|--------------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|
| grados | x | y | deformación (µε) | deformación (%) |
| 0 | 0 | 0.4572 | 0 | 0 |
| 10 | 0.079391947 | 0.450254105 | 607.7686218 | 0.060776862 |
| 20 | 0.15637161 | 0.429627466 | 1197.070502 | 0.11970705 |
| 30 | 0.2286 | 0.395946815 | 1750 | 0.175 |
| 40 | 0.293882495 | 0.350235519 | 2249.756634 | 0.224975663 |
| 50 | 0.350235519 | 0.293882495 | 2681.155551 | 0.268115555 |
| 60 | 0.395946815 | 0.2286 | 3031.088913 | 0.303108891 |
| 70 | 0.429627466 | 0.15637161 | 3288.924173 | 0.328892417 |
| 80 | 0.450254105 | 0.079391947 | 3446.827136 | 0.344682714 |
| 90 | 0.4572 | 2.80069E-17 | 3500 | 0.35 |
| 100 | 0.450254105 | -0.079391947 | 3446.827136 | 0.344682714 |
| 110 | 0.429627466 | -0.15637161 | 3288.924173 | 0.328892417 |
| 120 | 0.395946815 | -0.2286 | 3031.088913 | 0.303108891 |
| 130 | 0.350235519 | -0.293882495 | 2681.155551 | 0.268115555 |
| 140 | 0.293882495 | -0.350235519 | 2249.756634 | 0.224975663 |
| 150 | 0.2286 | -0.395946815 | 1750 | 0.175 |
| 160 | 0.15637161 | -0.429627466 | 1197.070502 | 0.11970705 |
| 170 | 0.079391947 | -0.450254105 | 607.7686218 | 0.060776862 |
| 180 | 5.60138E-17 | -0.4572 | 4.28802E-13 | 4.28802E-17 |
| 190 | -0.079391947 | -0.450254105 | -607.7686218 | -0.060776862 |
| 200 | -0.15637161 | -0.429627466 | -1197.070502 | -0.11970705 |
| 210 | -0.2286 | -0.395946815 | -1750 | -0.175 |
| 220 | -0.293882495 | -0.350235519 | -2249.756634 | -0.224975663 |
| 230 | -0.350235519 | -0.293882495 | -2681.155551 | -0.268115555 |
| 240 | -0.395946815 | -0.2286 | -3031.088913 | -0.303108891 |
| 250 | -0.429627466 | -0.15637161 | -3288.924173 | -0.328892417 |
| 260 | -0.450254105 | -0.079391947 | -3446.827136 | -0.344682714 |
| 270 | -0.4572 | -8.40207E-17 | -3500 | -0.35 |
| 280 | -0.450254105 | 0.079391947 | -3446.827136 | -0.344682714 |
| 290 | -0.429627466 | 0.15637161 | -3288.924173 | -0.328892417 |
| 300 | -0.395946815 | 0.2286 | -3031.088913 | -0.303108891 |
| 310 | -0.350235519 | 0.293882495 | -2681.155551 | -0.268115555 |
| 320 | -0.293882495 | 0.350235519 | -2249.756634 | -0.224975663 |
| 330 | -0.2286 | 0.395946815 | -1750 | -0.175 |
| 340 | -0.15637161 | 0.429627466 | -1197.070502 | -0.11970705 |
| 350 | -0.079391947 | 0.450254105 | -607.7686218 | -0.060776862 |
| 360 | -1.12028E-16 | 0.4572 | -8.57604E-13 | -8.57604E-17 |

| | |
|--|--------------|
| Deformación máxima a tensión (%): | 0.35 |
| Deformación máxima a compresión (%): | -0.35 |
| Días transcurridos entre las dos lecturas: | 32 |
| Relación diámetro/espesor (D/t): | 48 |

Fuente: OCENSA.

Tabla 7.6 Reporte de datos de cálculo para galgas de deformación localizada a 90°

Si las galgas de deformación indican deformaciones excesivas en el ducto, sus lecturas deben ser confrontadas con otra metodología de medición que dé indicaciones de movimientos geotécnicos, como los inclinómetros y control topográfico (ver Capítulo 5), o lecturas de corridas de herramienta inercial. Si dicha verificación arroja evidencias de movimiento geotécnico, se deberán tomar acciones de apertura de la zanja para permitir su alivio, verificación de la integridad mecánica del ducto y acciones de reparación.



8. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG)

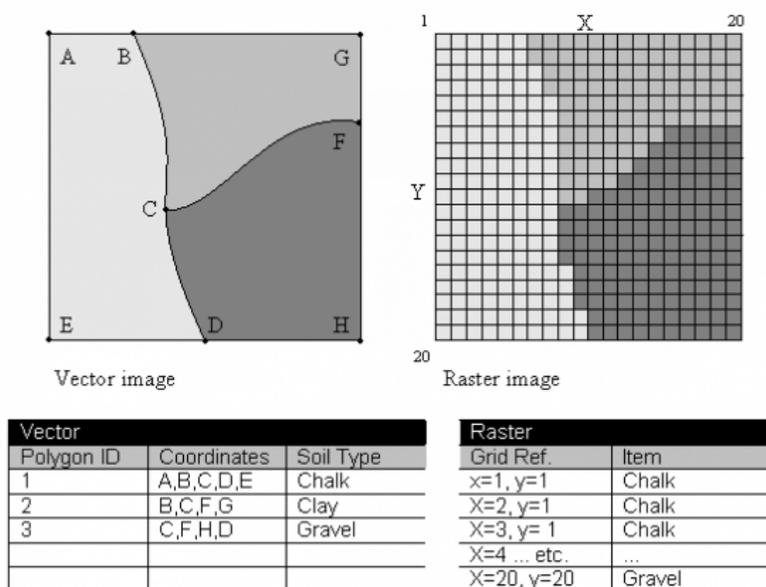
8.1. MARCO CONCEPTUAL

El especialista en epidemiología, Dr. John Snow suministró, en abril de 1854, el clásico ejemplo del concepto de los Sistemas de Información Geográfica cuando cartografió la incidencia de los casos de cólera en un mapa del distrito de SoHo en Londres. Este protoSIG permitió a Snow localizar con precisión un pozo de agua contaminado como fuente causante del brote.

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

El SIG permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no se podría obtener de otra forma.

La mayoría de los elementos que existen en la naturaleza pueden ser representados mediante formas geométricas (puntos, líneas o polígonos, esto es, vectores) o mediante celdas con información (raster)⁸⁴.



Fuente: <http://ahnet2-dev.cch.kcl.ac.uk>

Figura 8.1. Modelos vectoriales y raster

El modelo vectorial es el más usado en la actualidad debido a que en sus inicios los SIG fueron usados principalmente para representar información cartográfica (la cual usa este formato), y al hecho de

⁸⁴ http://sig.cea.es/tipos_SIG



requerir poca capacidad de cómputo para su visualización y manejo; sin embargo, en el caso de los modelos *raster* su uso es cada vez más común, especialmente en el ambiente científico y ambiental.

Una de las ventajas más importantes del modelo *raster* es su uniformidad que permite la programación y automatización de modelos que requieren cálculos matemáticos complejos, siendo una herramienta muy importante, especialmente en el caso de variables ambientales como erosión del suelo, manejo de recursos forestales, hidrología, etc.

La desventaja más importante del formato vector es que requiere el uso de equipos con alta capacidad de cómputo y almacenamiento debido a la cantidad de información que se maneja en este formato, sin embargo, en los últimos años esta desventaja se ha venido reduciendo por los avances de la industria de los computadores.

Los principales aspectos que puede resolver un SIG son:

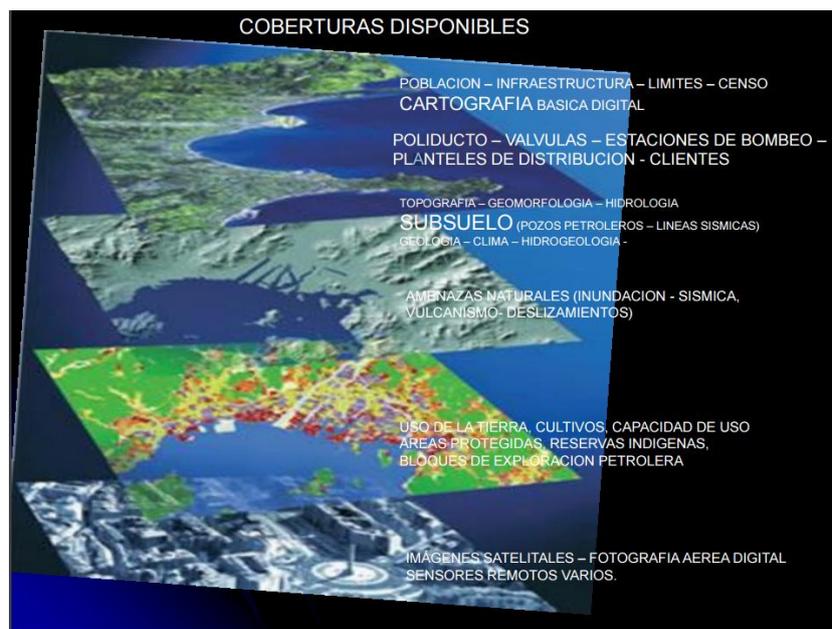
- **Localización:** preguntar por las características de un lugar concreto
- **Condición:** el cumplimiento o no de unas condiciones impuestas al sistema
- **Tendencia:** comparación entre situaciones temporales o espaciales distintas de alguna característica
- **Rutas:** cálculo de rutas óptimas entre dos o más puntos
- **Pautas:** detección de pautas espaciales
- **Modelos:** generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas

Dada la gran versatilidad de los sistemas de información geográfica, su campo de aplicación es muy amplio, pudiendo utilizarse en la mayoría de las actividades con un componente espacial. La profunda revolución que han provocado las nuevas tecnologías ha incidido de manera decisiva en su evolución.

8.2. ¿Qué es un Sistema de Información Geográfica?

El término SIG se aplica actualmente a los sistemas computarizados de almacenamiento, elaboración y recuperación de datos con equipo y programas específicamente designados para manejar los datos espaciales de referencia geográfica, y los correspondientes datos cualitativos o atributos⁸⁵. En general la información espacial se representa en forma de *capas* (véase la Figura 8.2), en las que se describen las diferentes variables de manera espacial como topografía, disponibilidad de agua, suelos, coberturas de la tierra, clima, geología, población, propiedad de la tierra, límites administrativos, e infraestructura (carreteras, vías férreas, sistemas de electricidad o de comunicaciones), entre otras.

⁸⁵ Sitio Web de Federación Americana de Organizaciones, FAO



Fuente: RECOPE, SIG, 2008.

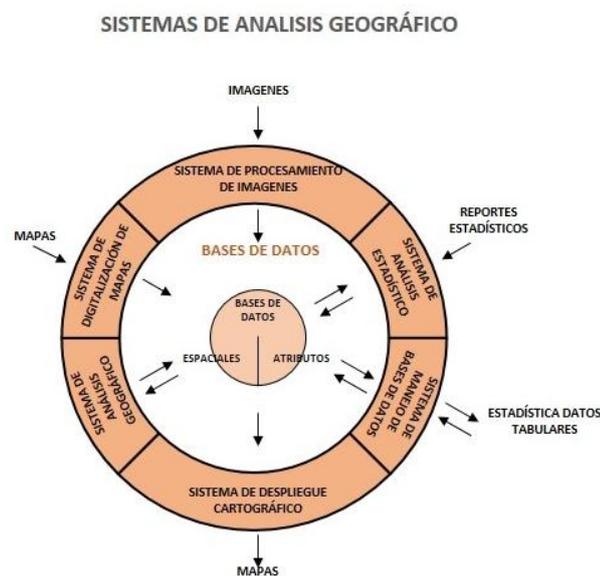
Figura 8.2 Organización de la información por capas

Un SIG es un conjunto de herramientas informáticas que captura, almacena, transforma, analiza, gestiona y edita datos geográficos (referenciados espacialmente a la superficie de la Tierra) con el fin de obtener información territorial para resolver problemas complejos de planificación, gestión y toma de decisiones apoyándose en la cartografía⁸⁶. Es un sistema geográfico porque permite la creación de mapas y el análisis espacial, es decir, la modelización espacial. Es un sistema de información porque orienta en la gestión, procesa datos almacenados previamente y permite consultas espaciales eficaces, repetitivas y estandarizadas, que permiten añadir valor a la información gestionada. Es un sistema informático con hardware y software especializados que tratan los datos obtenidos (bases de datos espaciales) y son manejados por personas expertas⁸⁷.

⁸⁶ Encarta 2012.

⁸⁷ 2005, SIG.

Otra fuente⁸⁸ define al SIG como un sistema computacional orientado a capturar, almacenar, administrar, integrar, manipular, analizar y presentar datos relacionados con elementos dispuestos sobre la superficie de la Tierra, y su posición en ella. Típicamente, se utiliza para el manejo de mapas, representados dentro del sistema como una o más capas diferentes, cada una de las cuales contiene información geográfica (posición de cada elemento en la Tierra), topológica (relaciones existentes entre los elementos de la capa) y temática (tema que busca representar contenido) sobre algún aspecto particular. Se denomina SIG a un sistema computarizado capaz de contener y procesar datos descriptivos de un lugar de la superficie terrestre. Estos datos son organizados básicamente como una serie de mapas temáticos (capas), con una base de datos de atributos asociados. Estos sistemas permiten la entrada, almacenamiento, manipulación, análisis y modelamiento, recuperación, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapas) y de sus atributos, de acuerdo a especificaciones y requerimientos concretos.

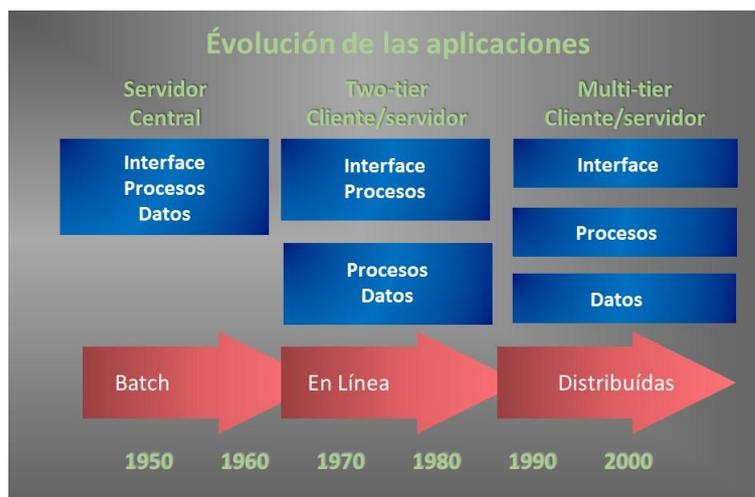


Fuente: RECOPE.

Figura 8.3 Concepto gráfico de SIG

Los SIG se componen de diversos sistemas que interactúan y permiten la generación de diferentes productos, ya sean digitales o analógicos, y el almacenamiento y análisis de información en bases de datos relacionales, interactuando con elementos de tipo geográfico para generar datos e información de apoyo a la toma de decisiones.

⁸⁸ INbio (Instituto Nacional de Biodiversidad de Costa Rica), 2005, septiembre.



Fuente: SIGINTERGRAPH, 2000.

Figura 8.4 Evolución de las aplicaciones

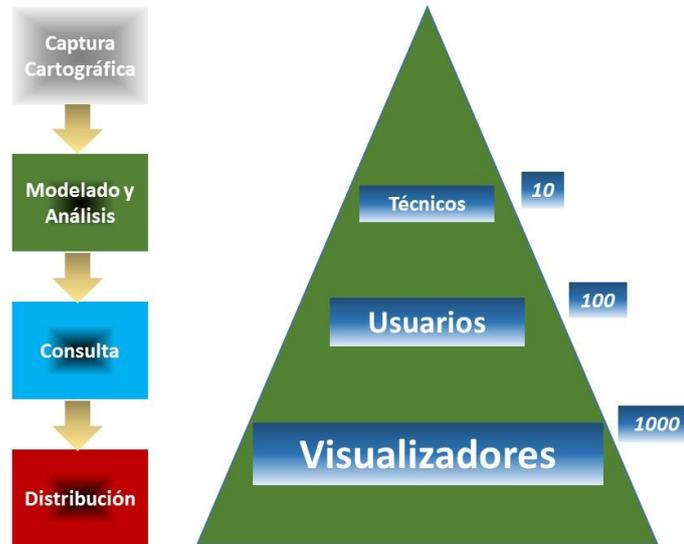
La evolución de los SIG va en paralelo a la evolución de las aplicaciones y los sistemas base, en todo caso la evolución corresponde desde principios de la era de los procesos en servidores centralizados donde interfase, procesos y datos se ejecutaban en un mismo nivel, hasta la separación de estos procesos siendo más eficientes y brindando una mayor autonomía a cada uno, permitiendo una más fluida y potente capacidad de análisis, presentación de datos y acceso a los mismos.

Los SIG permiten no solo ver datos textuales o informes técnicos, sino también combinarlos con fotografías aéreas e imágenes de satélite, brindando así una amplitud de análisis que ninguna otra herramienta logra.

Los sistemas de información son tecnologías que ayudan a los tomadores de decisiones, creando, manteniendo, almacenando y recuperando los datos que ellos necesitan. Entre más complejo sea el problema, y más localizaciones haya implicadas, más valiosos se vuelven los sistemas de información computarizados⁸⁹.

Es importante tomar en cuenta que el desarrollo de aplicaciones SIG debe estar enfocado en los usuarios finales, aquellos que hacen uso específico de estas aplicaciones en sus funciones diarias, es por ello que se debe ver como un triángulo en donde los especialistas en la organización son pocos y los usuarios intermedios y finales son muchos, en todas las áreas posibles.

⁸⁹ Valenzuela (1989, pp. 24-32).



Fuente: INTERGRAPH, 2000.

Figura 8.5 Usuarios – Especialistas SIG

8.2.1. Descripción de aplicaciones de los SIG

Para el Instituto Geográfico de Colombia (IGAC), los SIG son utilizados mundialmente para solucionar diferentes situaciones, y por sus características especiales pueden estar enfocados en diferentes áreas o en una combinación de estas.

La utilidad final del SIG radica en su capacidad para elaborar modelos, es decir, construir modelos del mundo real a partir de las bases de datos digitales y utilizar esos modelos para simular el efecto de un proceso específico en el tiempo, para un determinado escenario. La construcción de modelos constituye un instrumento muy eficaz para analizar las tendencias y determinar los factores que influyen en ellas, o para exponer las posibles consecuencias de las decisiones o proyectos de planificación que repercuten en la utilización y ordenación de los recursos.

A nivel continental, por ejemplo, los mapas de terreno pueden combinarse con mapas hidrológicos y datos climatológicos, para producir mapas donde figure la idoneidad de la tierra para distintos tipos o intensidades de usos, o para cultivos específicos. Pueden añadirse datos demográficos y administrativos para obtener proyecciones sobre futuras hipótesis de oferta y demanda por región o país.

A nivel nacional y local, las posibles aplicaciones del SIG son casi infinitas. Por ejemplo, para determinar los mejores lugares potenciales para producir ciertos cultivos comerciales, el planificador agrícola puede utilizar bases de datos geográficos en las que se combine información sobre suelos, topografía y precipitaciones para determinar el tamaño y potencial de las zonas biológicamente adecuadas. También puede superponer sobre otras bases de datos con información sobre propiedad de la tierra, infraestructura de transportes, disponibilidad de mano de obra y distancia del mercado para hacer más completa la información. Además, el planificador puede cambiar continuamente las características de los distintos datos descriptivos a través del tiempo para determinar las posibles repercusiones de las circunstancias cambiables, como son los efectos de la sequía, el aumento o descenso de los precios nacionales o mundiales, o la construcción de nuevas carreteras⁹⁰.

⁹⁰ INETEC (2005, octubre).



8.2.2. Ejemplos de aplicaciones

8.2.2.1. Control de existencias y del proceso de trasiego

Capacidad de ligar la información de los elementos incluidos en el SIG con bases de datos externas, en donde se contemplan los datos referentes a los inventarios actualizados de las existencias en los sitios de almacenamiento, así como de los procesos de trasiego en oleoductos, acueductos, etc.

8.2.2.2. Control de mantenimiento

La agilidad del SIG para el manejo de base de datos espaciales y de atributos, permite la retroalimentación constante sobre el estado del mantenimiento en cualquier elemento de la infraestructura, como es el caso de un tanque de almacenamiento, al cual se puede acceder directamente desde el mapa digital. Adicionalmente, el SIG liga fotografías a los elementos incorporados, tales como: fotos de válvulas, tanques, áreas de proceso, oleoductos, pasos especiales, etc.

8.2.2.3. Control de servidumbres de paso

Mediante la utilización del SIG se puede manipular toda la información referente a las servidumbres de paso, desde el plano catastral de la propiedad, hasta la base de datos de atributos (nombre del propietario, longitud de la servidumbre, referencias del registro, estado actual, etc.) para cada una de las servidumbres.

8.2.2.4. Estudios de impacto ambiental

En estos estudios se requiere realizar muchos tipos de superposiciones o traslapes de información correspondientes a diferentes mapas temáticos (ej. uso del suelo, zonas protegidas, topografía, geología, hidrología, etc.), que por lo general se encuentran a diferentes escalas. Mediante la herramienta del SIG, toda esta información se incorpora en forma digital y con el mismo sistema de coordenadas, lo cual permite realizar todos esos tipos de traslapes de manera muy sencilla y en poco tiempo, con la ventaja adicional de que todos los nuevos mapas resultantes de este proceso, son generados automáticamente. En los sistemas convencionales esto significaría la utilización de más horas de dibujante y profesional para obtener el mapa final.

8.2.2.5. Apoyo en las etapas de diseño y nuevas obras

El SIG tiene la capacidad de manejar gran cantidad de variables que son consideradas a la hora de tomar las decisiones en los procesos de diseño y construcción de nuevas obras. Estas variables pueden incluir tanto lo relacionado con el entorno (topografía, tipo de suelo, hidrología, infraestructura adyacente, zonas protegidas, red vial, etc.), como las características propias de la obra, incluyendo la incorporación de los planos constructivos.



8.2.2.6. Selección de rutas óptimas

Mediante el análisis de diferentes tipos de variables, las cuales pueden ser clasificadas como restricciones o factores, el sistema puede determinar cuál podría ser la ruta de menor costo para una obra determinada (ej. líneas de transmisión eléctrica, oleoductos, acueductos, etc.).

8.2.2.7. Planificación de la respuesta en emergencias

Capacidad para combinar todo lo referente a infraestructura, red vial, servicios (Cruz Roja, Bomberos, Hospitales, etc.), recursos y muchos otros más elementos utilizados en los procesos de toma de decisiones para la planificación y atención de emergencias.

8.2.2.8. Monitoreo de variables ambientales para gestión del riesgo.

Permiten modelar variables ambientales, tales como precipitación, vientos y temperatura, que puedan llegar a afectar la infraestructura, asentamientos humanos, sectores productivos, etc. Una vez que la variable ambiental alcanza umbrales definidos para afectación, se generan las alertas respectivas para tomar las acciones y correctivos correspondientes.

8.2.2.9. Relevamiento de datos para el monitoreo de peligros ante deslizamientos e inundaciones

Se pueden elaborar formularios personalizables, fáciles de crear y utilizar, en los cuales se transfiere la base de datos relacional con los campos, dominios e incluso datos, para que los usuarios tengan mayor eficiencia en el trabajo de campo, para evitar la recopilación de datos repetidos y para lograr una alta validación e integridad de los datos geotécnicos e hidrotécnicos colectados en campo.



Fuente: RECOPE.

Figura 8.6 SIG – Aplicaciones



8.2.3. Sistemas relacionados

Un SIG tiene una estrecha relación, y muchas veces conexión, con otros programas que aunque fueron creados y se usan para otros propósitos, comparten muchas funciones comunes con un SIG. Algunos de estos programas o sistemas son los siguientes.

8.2.3.1. Sistemas de manejo de bases de datos

DBMS (*Database Management System*) es un sistema de software de propósito general que facilita el proceso de definir, construir y manipular bases de datos para diversas aplicaciones. Construir una base de datos es el proceso de guardar los datos mismos en algún medio de almacenamiento controlado por el DBMS. En la manipulación de una base de datos intervienen funciones como consultar la base de datos para obtener información específica, actualizar la base de datos para reflejar cambios en el mini mundo, y generar informes a partir de los datos. En adición a lo anterior, se define el DBMS como un conjunto de programas que se encargan de manejar la creación y todos los accesos a la base de datos, para lo cual se utilizan herramientas tanto para la definición de datos (DDL - *Data Definition Language*) como para su manipulación (DML - *Data Manipulation Language*)⁹¹.

Un SIG tiene varias funciones de DBMS, pero un DBMS carece de las capacidades de consulta y despliegue espacial presentes en SIG. Estos, en ciertos casos, tienen sistemas internos mientras que otros se pueden ligar a DBMS existentes en el mercado. Este último caso tiene la enorme ventaja de permitir la manipulación de datos fuera de SIG⁹².

8.2.3.2. Paquetes de diseño asistido por computadora

CAD (*Computer Aided Design*) maneja puntos, líneas y polígonos con un marco espacial de referencia. A diferencia de un SIG, por lo general es difícil enlazar atributos de una base de datos a elementos, o asignar simbología automáticamente de acuerdo a un criterio definido por el usuario. Inicialmente fue creado para el diseño y dibujo técnico de objetos, sin embargo ha sido utilizado extensamente para aplicaciones geográficas.

8.2.3.3. Procesamiento de imágenes

Consiste en equipos y programas para analizar imágenes digitales, las que son adquiridas como una matriz de píxeles, cada uno de los cuales contiene datos espectrales de una celda de una imagen de matriz.

Inicialmente estos sistemas fueron diseñados para el análisis de combinaciones de espectros con el fin de producir mapas con características del terreno. Esta tecnología ha evolucionado considerablemente, tanto en su precisión como en las aplicaciones. Hoy es usada en diagnósticos por medio de imágenes de resonancia magnética y tomografía axial computarizada.

Entre los sistemas relacionados es necesario incluir los GPS (Sistemas de Posicionamiento Global) que, a pesar de no ser parte de un SIG, desde su introducción se han vuelto una herramienta de alto

⁹¹ Daniel Cohen (2000, pág. 151)

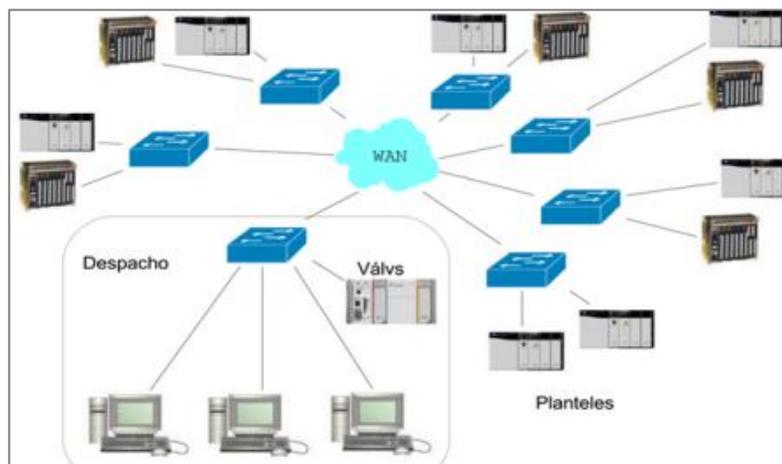
⁹² IGNC (2005, agosto)

valor en estas aplicaciones. Este sistema consiste en 24 satélites lanzados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica en una órbita tal que, desde cualquier punto de la Tierra, siempre es posible ver cuatro de ellos. Estos satélites constantemente transmiten un código de identificación. Por medio de triangulación es posible calcular la posición del receptor en la Tierra. Con el equipo y tiempo, la exactitud es de unos cuantos centímetros por lo que éste sistema ha llegado a sustituir muchos de los procedimientos topográficos requeridos en el pasado⁹³.

Cabe aclarar que el sistema GPS es el más utilizado en la actualidad pero no el único. El sistema GLONASS (Sistema Global de Navegación por Satélite) es el equivalente ruso y los sistemas Galileo y Beidou en desarrollo, serán los referentes europeo y chino respectivamente.

8.3. Sistemas y plataformas de monitoreo y control de trabajo de campo remoto

Dentro de los principales sistemas de monitoreo y control remoto aplicado a la industria petrolera se encuentran los Sistema de Control, Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA por sus siglas en inglés). Dentro del apartado de adquisición de datos, las terminales remotas cuentan con equipos electrónicos especiales (sensores, transmisores, interruptores, etc.), que permiten visualizar en el monitor de la estación las condiciones de temperatura, presión, caudal, densidad y otras variables importantes dentro del proceso de transferencia bajo custodia.



Fuente: RECOPE.

Figura 8.7 Esquema de interconexión de un sistema SCADA general

Otra de las ventajas es el grado de automatización que se logra con el sistema SCADA, ya que se puede actuar directamente sobre los equipos del ducto de las estaciones desde el teclado dedicado o con el ratón de la computadora. Por ejemplo, encender y apagar motores para bombeo, abrir y cerrar válvulas, entre otras funciones. Para la supervisión del proceso de transferencia se cuenta con información referente al conteo de producto trasegado, registros de alarmas de operación de los equipos (alto voltaje, sobre corriente, etc.) y de comportamiento del ducto (alta o baja presión, cambios de densidad, etc.), además de registros de actividades e impresión de reportes horarios con información referente al trasiego en la estación.

⁹³ IGNC (2005, agosto)



La escalabilidad que presenta el sistema SCADA permite desarrollar proyectos de automatización en las estaciones e incluirlos dentro del sistema existente. En la terminal maestra se concentra toda la información relevante de la operación de las terminales remotas del ducto, lo que permite una optimización de la operación, así como correr programas de aplicaciones que permiten la detección de fugas y el seguimiento de tandas (batches o lotes) de producto en el ducto. Las terminales remotas son independientes en su operación, lo que implica que en caso de pérdida de las comunicaciones con la terminal maestra, estas continúan operando de forma independiente y automática.

Las HMI⁹⁴ son *Stand-Alone*, esto significa que son como servidores independientes que contienen los servicios de comunicación (*Hardware y Software*) y los servicios de visualización. De esta manera, cada PLC⁹⁵ del ducto está siendo interrogado tanto por las HMI de su respectivo plantel, como por las HMI de despacho y de mantenimiento que se requieran. Igualmente, la cantidad de PLC que cuestionan las HMI del centro de control va en aumento.

A los efectos de control de las geoamenazas, el sistema SCADA es un aliado vital que permite detectar problemas en los ductos dadas las alertas que indican pérdidas de presión, caudal, etc., las que pueden ser provocadas por la acción de efectos de la naturaleza tales como deslizamientos, avalanchas, flujos de escombros, caída de rocas, erosión severa, sismos, etc. Desde este punto de vista, el monitoreo del ducto puede incluir las invasiones del DDV, donde el factor antrópico, además del vandalismo, pueden inducir a geoamenazas, tales como desestabilización de taludes, profundización de cunetas, manejo inapropiado de aguas de escorrentía, anclaje de puentes y postes, etc.

8.3.1. El monitoreo directo - plataforma web SIG.

Se puede contar con una plataforma SIG cuya estructura de acceso y geoprocesamiento principal se pueden resumir en la Figura 8.8.



Fuente: RECOPE.

Figura 8.8 Ejemplo gráfico de geoprocesamiento y disposición de geodatos

⁹⁴ Interfaz de usuario, por sus siglas en inglés, Human Machine Interface.

⁹⁵ Controlador Lógico Programable, por sus siglas en inglés, Programmable Logic Controller.



Es así como se puede lograr ampliar las capacidades de uso de su plataforma SIG por medio de la incorporación de una infraestructura disponible en la nube, con datos subidos y gestionados de manera controlada, a los cuales se puede acceder mediante dispositivos móviles (tabletas, GPS y teléfonos inteligentes). Igualmente, por medio de éstos, se puede disponer de la recolección controlada de los datos de campo necesarios para la atención de incidentes o para el monitoreo general de la infraestructura de ductos por geoamenazas.

Esto se realiza mediante la utilización de los datos que se suben a la nube y la disposición de mapas base detallados, fotografías aéreas e imágenes satelitales que faciliten la orientación y la ubicación del personal de campo.

8.4. ¿Qué es GIS Online?

GIS Online es un completo sistema de administración de contenidos en colaboración, disponible en línea vía internet, que permite a las organizaciones administrar su información geográfica en un entorno seguro y configurable.

La plataforma proporciona una infraestructura a demanda para crear mapas web, habilitar los datos en la red, compartir los mapas, los datos y las aplicaciones, y administrar el contenido y los diversos usuarios de la organización. Incluye mapas base, datos para los mapas, aplicaciones, plantillas configurables, y herramientas SIG y API para desarrolladores.



Fuente: INTERGRAPH 2010.

Figura 8.9 Acceso a todo para todos por medio de GIS online

Las organizaciones pueden disponer de su infraestructura en la nube o adquirir suscripciones que permiten configurar y administrar un sitio GIS Online propio, y un conjunto de recursos.

Una suscripción con algún desarrollador, puede incluir cuentas de organización para los miembros de la organización. Existen cuentas personales disponibles para los funcionarios internos o para personal



externo autorizado, que requiera acceder al contenido compartido por los usuarios de la red SIG, y crear, almacenar y compartir mapas, aplicaciones y datos.

8.5. Esquema de integración

Desde un espacio en la nube al cual se accede vía *WebSite*, se configuran los usuarios y los servicios, se crean los mapas y se publican, todo de manera muy simple.

En la Figura 8.10 se muestra un esquema general de integración, desde el cual se puede ver que desde la nube en un ambiente Web de trabajo, se permite disponer de la información a un gran grupo de usuarios por medio de diferentes opciones de acceso.



Fuente: ESRI (www.arcgis.com).

Figura 8.10 Entorno de gestión de un SIG en línea

8.6. ¿Qué se puede hacer con GIS online?

Lo principal es que GIS online proporciona recursos para compartir y colaborar con sus miembros y más allá de la organización. Las organizaciones pueden compartir el contenido geoespacial y proporcionar acceso a información fundamental, al tiempo que mantienen el control sobre sus datos.

Es importante destacar que el potencial de esta herramienta radica en su acceso en tiempo real, apoyando la gestión de monitoreo y toma de decisiones de una manera oportuna y sincronizada.

8.7. Aplicaciones de esta tecnología en los procesos de trabajo de campo en la empresa

Dentro de las aplicaciones para el monitoreo de ductos por geoamenazas se citan las siguientes utilidades:



- a. Monitoreo e inspección por peligros ante deslizamientos identificados previamente o simultáneamente al tiempo del reporte (nuevos).
- b. Monitoreo e inspección por peligros ante inundaciones.
- c. Inspección de puntos de erosión severa en cruces fluviales y aéreos de fuerte escorrentía.
- d. Identificación de las áreas de alta consecuencia (HCA) y control de derrames para ductos.
- e. Monitoreo de áreas identificadas con imágenes de satélite.
- f. Detección de represamiento efímero, aguas arriba, que pueda inducir una avalancha descontrolada y afectar el paso de las líneas aguas abajo, en áreas de inundación y cauces confinados.
- g. Identificación de objetos contundentes inestables (p. ej. rocas), que en su precipitación puedan golpear y afectar la infraestructura de distribución (ducto, puente, anclajes, etc.).
- h. Revisión del estado de las estructuras de protección y mitigación de riesgo, tales como elementos de contención (p.ej. gaviones, camisas de concreto o metálicas), de soporte, de control erosivo, de protección catódica, etc.; así como elementos de información y alarma, como mojones, puntos de control topográfico y señalización.
- i. Investigación periódica, mediante recorrido, de la situación de los derechos de paso (servidumbres), para determinar el estado y seguridad jurídica de los mismos, y advertir sobre posibles acciones antrópicas que puedan inducir una amenaza directa a la infraestructura empresarial o que favorezcan de alguna manera el desarrollo e implementación de una nueva geoamenaza (construcciones que obstaculizan el paso para mantenimiento preventivo y correctivo, construcción de caminos y pasos que mermen la cobertura de enterramiento, remoción de tierras, construcción de cunetas, inestabilización de taludes, obstrucción y profundización de cauces, etc.).
- j. Observación de sitios vulnerables preestablecidos ante sismicidad severa por efectos de fracturamiento y fallas superficiales, licuefacción y derrumbes.
- k. Vigilancia de zonas de afectación, durante actividad volcánica, por acumulación anómala de cenizas y escombros, encauzamiento de productos volcánicos y sismicidad local; con relación con el paso de las líneas.
- l. Revisión de estado de la protección por corrosión externa (cobertura aislante “*tape*”, conductividad de protección catódica, etc.)
- m. Atención de alertas reportadas y localizadas por el sistema SCADA.

Desde el punto de vista de monitoreo en tiempo real, en su etapa de implementación, se han establecido cinco áreas de acción, que cuentan con dispositivos móviles de comunicación en línea que proporcionan fichas específicas para la recolección de datos para ser compartidas en la “nube”; mediante una aplicación denominada “Colector”. Estas cinco áreas están conceptualizadas de la siguiente manera:

1. Mantenimiento. Incluye cuadrillas de diagnóstico, prevención y corrección, las que en su actividad cotidiana se soportan con el sistema en tiempo real informando anomalías, procedimientos y necesidades inmediatas.



2. Topografía. Su cuadrilla se dedica al replanteo continuo de las líneas del ducto y sus estructuras relacionadas con el fin de detectar e informar cambios sustanciales en el alineamiento de la infraestructura, la instalación y seguimientos de puntos de control geodésico en sitios de alta peligrosidad geológica y antrópica, medición de verticalidad de torres de anclaje de puentes y pasos importantes, y medición y demarcación continua de derechos de paso.
3. Geología. Mantiene un diagnóstico continuo, desde el punto de vista de la identificación, seguimiento y categorización de las geoamenazas, sus causas, posibles efectos y medidas de mitigación y contingencia. Se basa además en la información en línea suministrada por las otras áreas.
4. Instrumentación. Realiza el monitoreo y mantenimiento de todos los instrumentos electrónicos gestores de información localizada sobre el comportamiento dinámico del sistema de distribución, como válvulas, antenas de comunicación, protección catódica, fuentes de energía, etc. También es posible conectar los elementos del monitoreo del terreno o del ducto (Capítulos 5 y 7), que incluso pueden incluir mediciones en tiempo real.
5. Servidumbres. Se refiere a la vigilancia y seguimiento de la seguridad jurídica y catastral de los derechos de paso establecidos, detectando y resolviendo situaciones de invasión y deterioro de las áreas delimitadas o, en su defecto, subsanando las inconsistencias legales de las mismas. Este área además mantiene actualizada la base de datos georreferenciada de los DDV y propiedades, de tal forma que puedan ser consultadas directamente desde los sitios de interés de forma sincronizada.

Las cinco aristas de recolección están interconectadas y pueden compartir información mediante la plataforma, utilizando el mecanismo en la modalidad de “Colector”, sin poder variar el contenido de las fichas preestablecidas.

Como punto central está establecida una sexta área administrativa que puede ingresar al sistema mediante una herramienta exclusiva, de consulta y edición, y que le faculta para generar las directrices y acciones a tomar según los reportes actualizados, dada su potestad en cuanto a la toma de decisiones. La modalidad de consulta y edición, cuyo dominio se restringe a la administración técnica, permite modificar y actualizar los reportes así como intercambiar instrucciones y directrices con las áreas operativas.



8.8. Anexo 8.1: Geoprocesamientos fundamentales en SIG⁹⁶

El geoprocesamiento en SIG se trata de una serie de análisis basados en el procesamiento de la información geográfica, en inglés Geoprocessing. Este módulo pone a nuestra disposición un conjunto de herramientas y un mecanismo que permite la combinación de las mismas en una secuencia de operaciones mediante modelos.

El conjunto de procedimientos que se aglutina en geoprocesamiento está destinado a establecer relaciones y análisis entre dos o más capas (comúnmente conocidas como *shapefile*) independiente de su naturaleza. Por lo general, estos procesos, se realizan mediante el análisis de dos capas, aunque en algún caso es posible operar con una sola o con más de dos a la vez.

Las herramientas de geoprocesamiento pueden realizar pequeñas pero fundamentales operaciones en los datos geográficos, tales como extraer o superponer datos, reproyectar una capa, añadir campos a una tabla y calcular sus valores, y establecer rutas óptimas, entre otras. Este tipo de herramientas son más comúnmente empleadas en geoprocesamiento y, por supuesto, se encuentran disponibles en cualquier software SIG, como por ejemplo *ArcGIS*, *QGIS* o *gvSIG*.

Las herramientas a analizar están al alcance de cualquier usuario de un SIG, ya sea que se encuentre en un nivel inicial o profesional, el geoprocesamiento es parte esencial en el trabajo diario en este campo.

Buffer (zona de influencia)

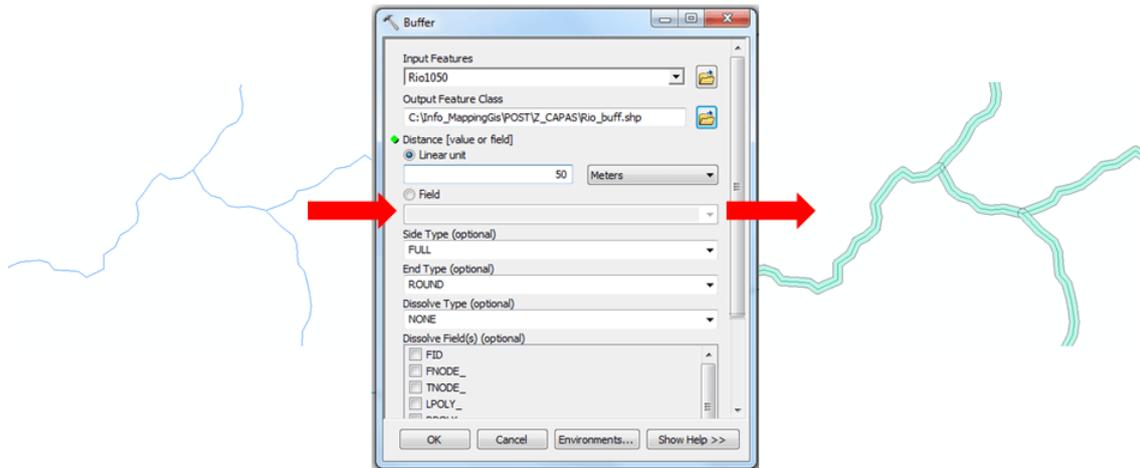
Se trata de una herramienta sencilla que se enmarca dentro del grupo de herramientas que establecen análisis de proximidad (junto con Near y Point Distance, por ejemplo).

También es conocida como zona de influencia y es una de las herramientas más comunes y utilizadas en los SIG, ya que permiten obtener nueva información para determinar, por ejemplo, qué elementos geográficos se encuentran dentro de un área de influencia determinada. Por ejemplo, esta herramienta permitiría establecer un perímetro de protección en el cauce de un río.

Geoprocesamiento - buffer (zona de influencia)

A partir de un elemento vectorial se crea una nueva capa que lo recubre en una zona de influencia cuyo radio es el indicado en la herramienta de análisis. Un buffer puede realizarse sobre cualquier tipo de capa vectorial (puntos, líneas o polígonos). Además, se pueden generar buffer independientes para cada elemento de dicha capa o bien combinarlos de forma que todos ellos generen un único polígono.

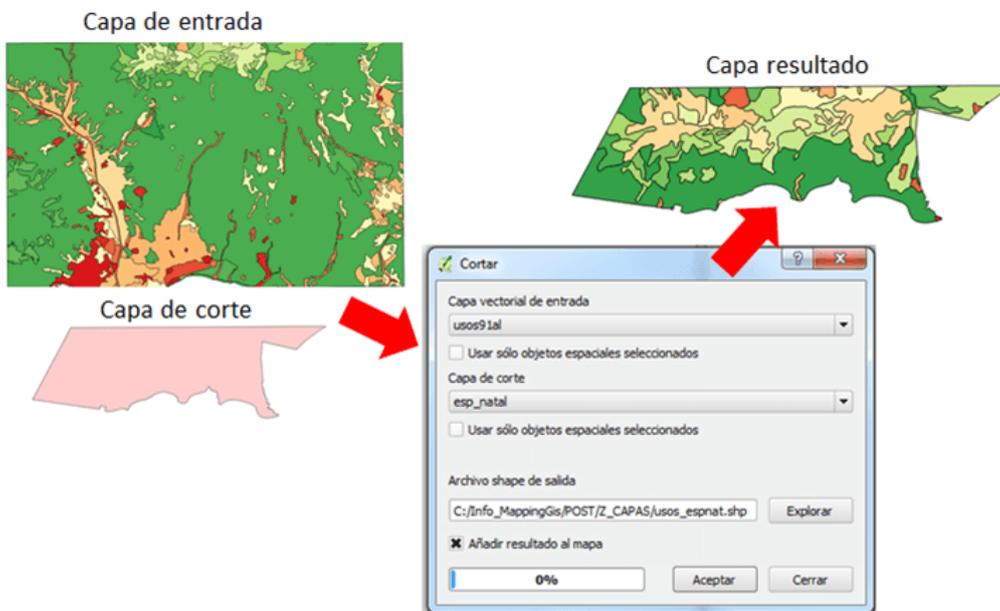
⁹⁶ <http://mappinggis.com/2014/10/herramientas-de-geoprocesamiento-en-gis/>



Clip (cortar)

Esta herramienta se utiliza para conocer los elementos geográficos (ya sean de tipo puntual, lineal o poligonal) que se encuentren dentro de unos límites establecidos mediante una capa poligonal de corte. Se emplea esta herramienta, por ejemplo, si se desea trabajar con la información relativa a los usos del suelo dentro de un límite municipal, despreciando toda aquella información que quede fuera de dicho límite.

Geoprocesamiento - clip (cortar)

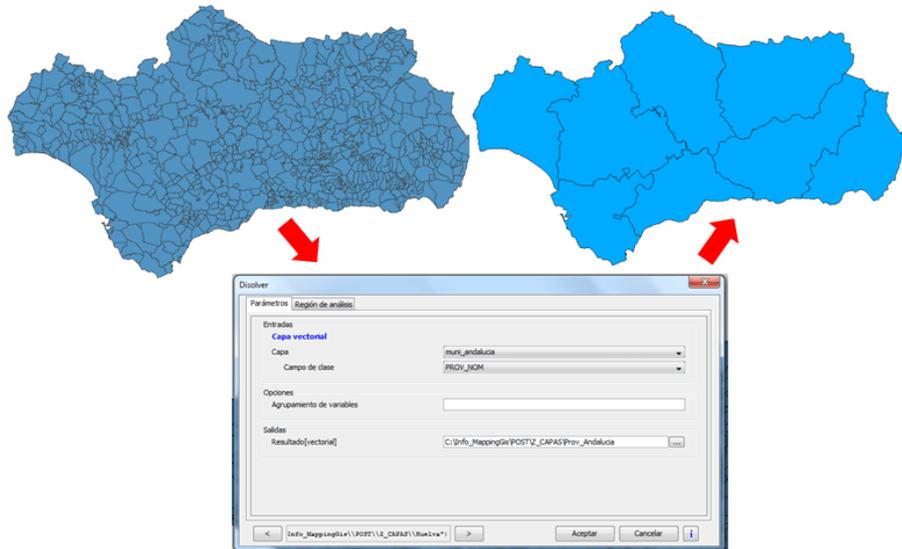


Dissolve (disolver)

Permite agregar los elementos de una capa que comparten el mismo valor en un campo determinado de su tabla de atributos, dando lugar a una nueva capa resultado de dicha agregación. Esta operación permite simplificar los elementos geográficos de la capa de entrada, así como los registros de su tabla de atributos, unificando elementos que presenten la misma propiedad. Puede aplicarse tanto en elementos de tipo puntual, lineal o poligonal. Se trata de una herramienta muy útil cuando se desea,

por ejemplo, extraer de una capa de municipios una capa con la extensión de las provincias a las que pertenecen, a través de la agregación de los diferentes polígonos que conforman los municipios.

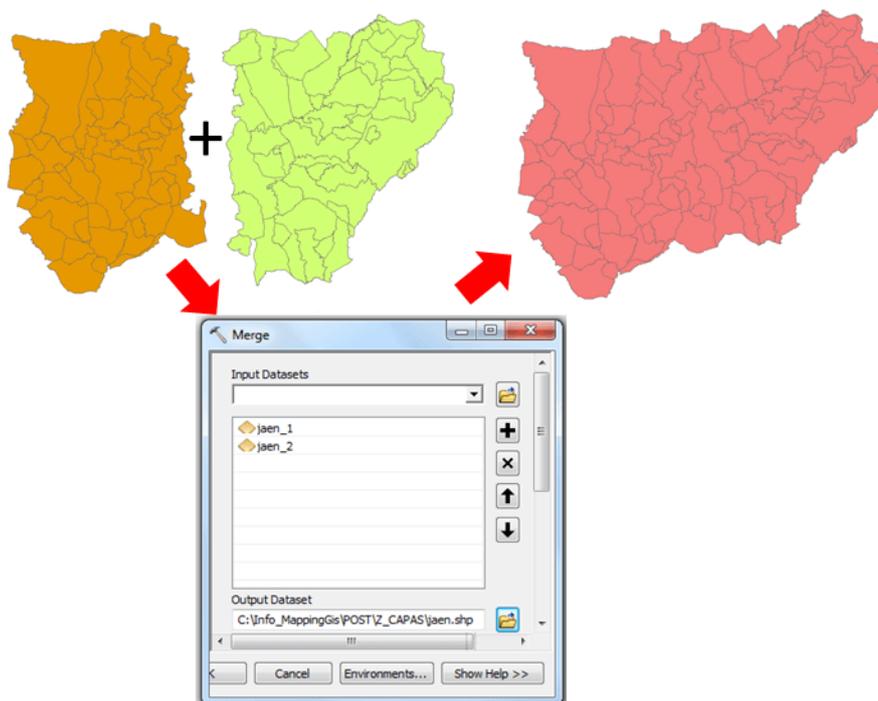
Geoprocesamiento - dissolve (disolver)



Merge (fusión)

Permite la yuxtaposición de dos capas por contigüidad generando una nueva capa que comprende los elementos geográficos de ambas capas de entrada. Se trata de una herramienta a emplear con especial cuidado ya que si se emplea combinando capas cuyos elementos geográficos se superponen, se obtendrán solapamientos de entidades.

Geoprocesamiento - merge (fusión)

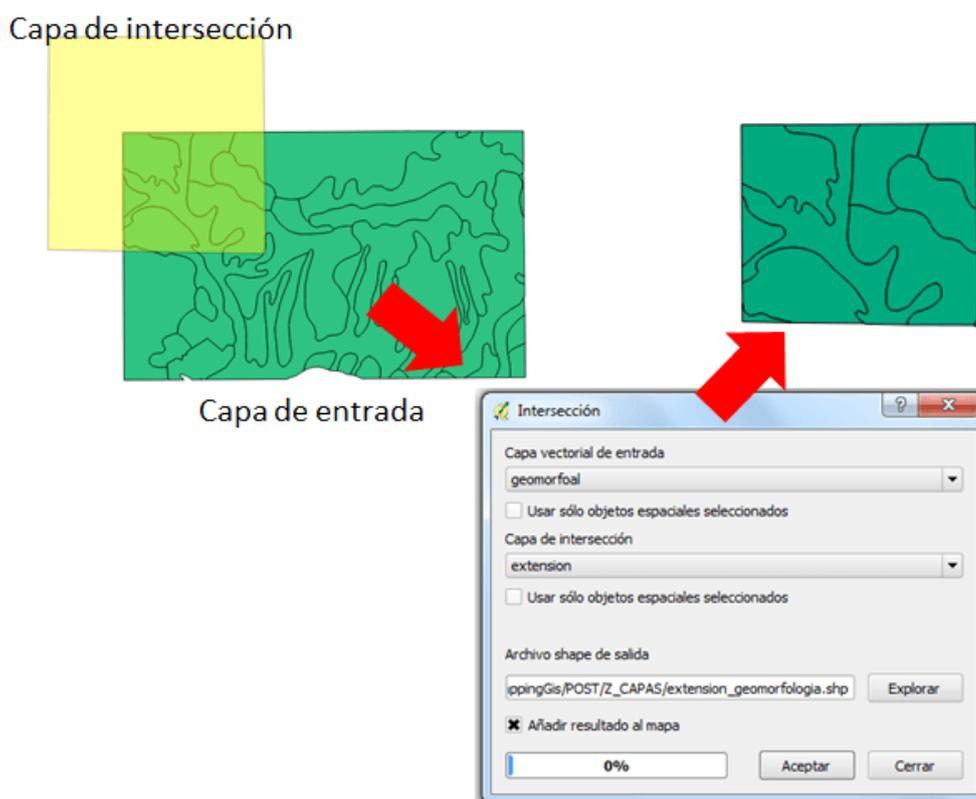




Intersect (intersección)

A partir de la operación de intersección de dos capas, los elementos de entrada son cortados a partir de otra capa superpuesta (capa de intersección) a la primera. El resultado es una nueva capa que recoge la combinación espacial de los distintos elementos que conforman ambas capas. Esta herramienta es útil, por ejemplo, para obtener información sobre las unidades geomorfológicas de una determinada zona de estudio.

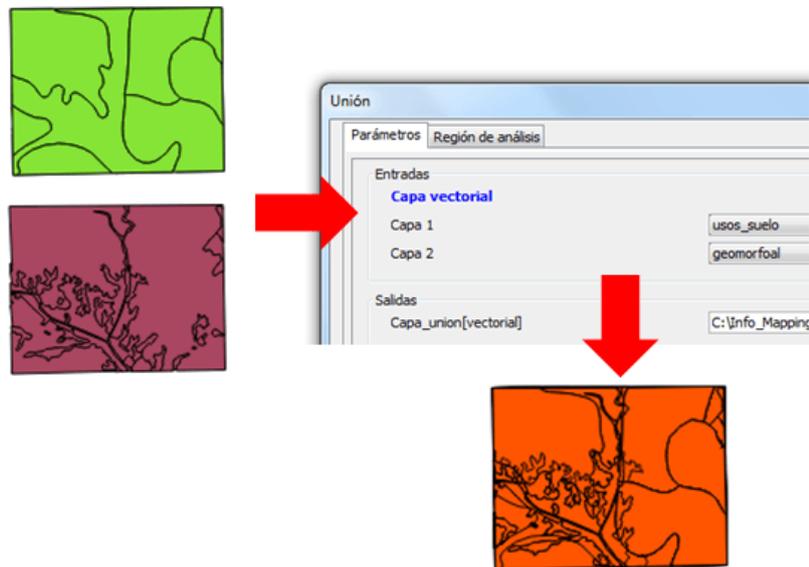
Geoprocesamiento - Intersect (Intersección)



Union (unión)

La unión de dos capas combina los elementos de una capa poligonal de entrada con los polígonos de una capa superpuesta a la primera (capa de unión). El resultado es una capa que presenta una información procedente de la combinación de las entidades geográficas en ambas capas. Hay que destacar que con esta herramienta no se generan registros duplicados por solapamiento, sino límites vectoriales que muestran la combinación de atributos de las capas después de la superposición sufrida de una respecto a la otra. Es útil emplear esta herramienta, por ejemplo, cuando se desea conocer las diferentes combinaciones entre usos del suelo y unidades geomorfológicas que se dan en una zona de estudio.

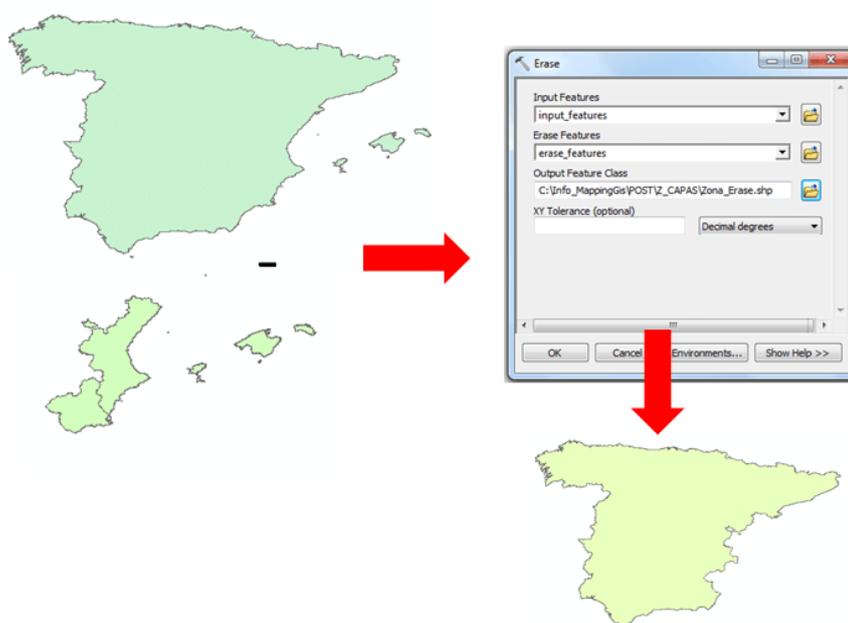
Geoprocesamiento - union (unión)



Eraser (borrar)

Se trata de una operación que permite borrar aquellas porciones de elementos de entrada que son comunes con la capa de borrado. Solo aquellas zonas de los elementos de entrada que caigan fuera de las fronteras de los polígonos de borrado, estarán presentes en la capa de salida. Por ejemplo, esta herramienta es útil si se desea crear una capa con la zona de estudio y se deben ir eliminando esas porciones de espacio que no interesan.

Geoprocesamiento - erase (borrar)

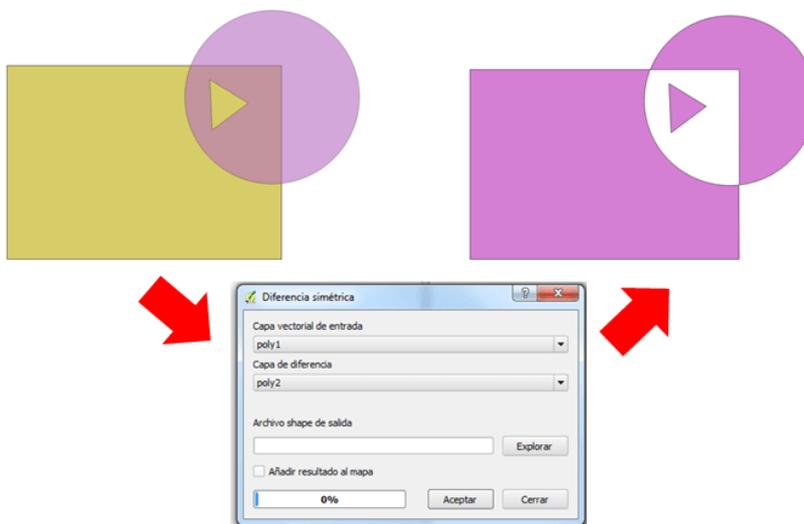




Symmetrical difference (diferencia simétrica)

Se trata de una operación similar a *erase*, con la diferencia de que serán borradas aquellas porciones de los elementos de entrada que sean comunes a las del polígono de borrado, manteniéndose en la salida, aquellos elementos que no sean comunes a ambos.

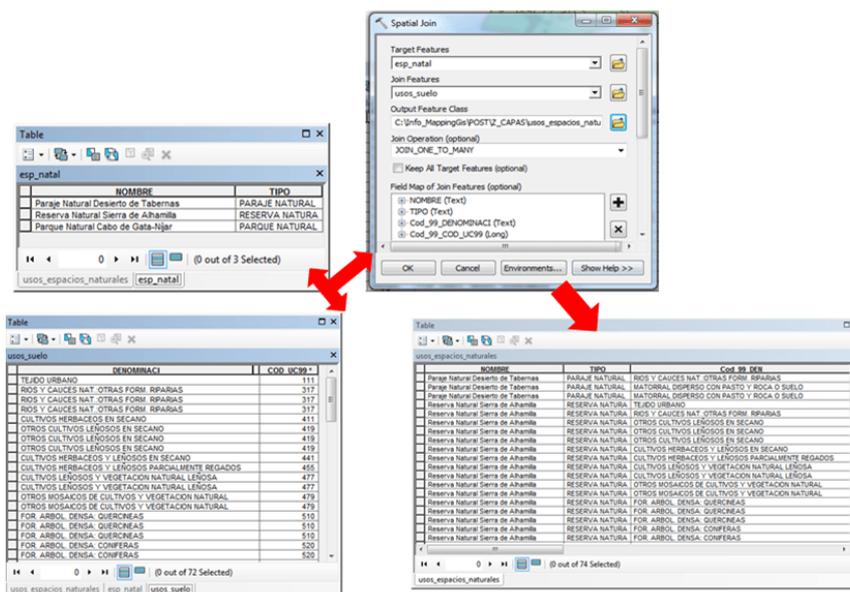
Geoprocesamiento - symmetrical difference (diferencia simétrica)



Spatial join (unión espacial)

Consiste en una unión de tablas en función de la localización compartida de los elementos de dos capas. Los elementos de la capa de entrada sobre la que se realiza el *join* espacial son los que reciben los campos que constituyen la tabla de atributos de los elementos de la capa de superposición (*overlapping features*). Por ejemplo, se puede emplear esta herramienta para conocer los diferentes usos de suelo que se encuentran dentro de determinados espacios naturales.

Geoprocesamiento - spatial join (unión espacial)



Model builder/ constructor de modelos/ modelizador

Un constructor de modelos no es propiamente una herramienta de geoprocésamiento, sino una herramienta muy práctica para automatizar y encadenar las herramientas de geoprocésamiento vistas anteriormente. Un modelo es aquella secuencia de operaciones analíticas que conduce a la obtención de un resultado, y cuya complejidad suele requerir la generación de un esquema previo que indique el flujo de datos: cuáles son los datos de entrada, las operaciones implicadas, los datos de salida, y cómo el output de una operación pasa a ser el input de otra.

Tanto ArcGIS, como QGIS y gvSIG ofrecen esta herramienta que facilita la automatización de las labores de geoprocésamiento como conjunto, en lugar de su ejecución individual, ahorrando tiempo, evitando errores y facilitando la gestión de los mismos. Además, los modelos generados pueden ser reutilizados posteriormente, simplemente modificando sus parámetros.

Geoprocésamiento con model builder en ArcGIS y constructor de modelos en QGIS y gvSIG

Model builder en ArcGIS, constructor de modelos en QGIS y modelizador en gvSIG



Fuente: Sitio Web Wikipedia (septiembre de 2005).

Figura 8.11 Mapa temático



9. ANEXO 1: MATRIZ DE USO

En la matriz de uso se presenta una perspectiva de la aplicabilidad de cada técnica de monitoreo para cada geoamenaza, con base en la experiencia de las operadoras participantes en la elaboración de la presente guía. En ese sentido, el lector debe tener en cuenta -con base en sus experiencias y premisas de gestión de activos- las limitaciones que algunas de las técnicas pueden presentar. Estas limitaciones pueden ser función, entre otros, de la temporalidad de la amenaza y los planes de acción derivados (enfoque preventivo – enfoque correctivo), la velocidad de los movimientos presentes (lentos – rápidos) y la logística de adquisición y transmisión de información.

MATRIZ DE USO DE LOS MÉTODOS DE MONITOREO, ÁMBITO DE APLICACIÓN

| MÉTODO DE MONITOREO | GEOAMENAZAS GEOTÉCNICAS | | | | | | | | GEOAMENAZAS HIDROTÉCNICAS | | | | | GEOAMENAZA EROSIÓN | | | | | | GEOAMENAZA SISMO | | | METEOROLÓGICA | | CAPÍTULO | | | |
|--|-------------------------|-----------|------------------------|-------|----------------------|------------------|------------------|----------|---------------------------|-------------------------|-------------------|----------|-----------------------|--------------------|---------|----------------------|--------|---------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------|------------------------|----------|-------|---------|---|
| | Desliza- miento | Reptación | Propagación lateral | Flujo | Avalancha / Lahar | Caida de roca | Volca- miento | Complejo | Socavación de fondo | Socavación de margen | Curso paralelo | Avulsión | Avenida torrencial | Surcos | Cárcava | Pérdida de tapada | Eólica | Por oleaje | Tubería (piping) | Asenta- miento | Falla geológica | Actividad sísmica | Licua- ción | Actividad volcánica | | Rayos | Lluvias | |
| Recorridos de inspección aéreos | SI | LIM | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | | | SI | | SI | | | SI | LIM | | | 4,1 | |
| Recorridos de inspección terrestres | SI | LIM | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | SI | LIM | SI | LIM | | SI | LIM | | | 4,2 | |
| Inspecciones puntuales | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | LIM | | SI | LIM | | | 4,3 | |
| Interpretación de imágenes | LIM | SI | LIM | LIM | LIM | LIM | LIM | SI | | LIM | SI | SI | LIM | SI | SI | | LIM | SI | | SI | SI | | SI | LIM | | | 4,6 | |
| Indicadores de desplazamiento | SI | LIM | SI | SI | | | | SI | LIM | SI | SI | | | | | | | | SI | | | | | | | | 5,1 | |
| Imágenes de radar (Análisis multitemporal) | LIM | LIM | | | | | | LIM | | SI | SI | SI | LIM | SI | SI | LIM | LIM | SI | | SI | | | | SI | | | 5,12 | |
| Monitoreo topográfico | SI | LIM | SI | | | | | SI | | SI | SI | | | | SI | SI | SI | SI | | SI | SI | | SI | | | | 5,2 | |
| Monitoreo batimétrico | | | | | | | | | SI | SI | SI | | | | | SI | | | | | | | | | | | 5,3 | |
| Nivel de ríos | | | | | | | | LIM | LIM | SI | SI | SI | | | | LIM | | | | | | | | | | | 5,4 | |
| Inclinómetros | LIM | LIM | | | | | | SI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5,5 | |
| Piezómetros | SI | SI | | | | | SI | SI | | | | | | | | | | | SI | SI | | SI | | | | | 5,6 | |
| Marcadores de nivel de arena | | | | | | | | | | | | | | | | LIM | SI | SI | LIM | SI | | | | | | | 5,8 | |
| Monitoreo de lluvias | SI | SI | | SI | LIM | | | SI | LIM | LIM | LIM | LIM | | | | | | | | | | | | | SI | | 6,1 | |
| Monitoreo de sismos | SI | | SI | LIM | LIM | SI | | SI | | | | | | | | | | | LIM | LIM | SI | LIM | SI | | | | 6,2 | |
| Actividad eólica | | | | | | | | | | | | | | SI | SI | SI | SI | | | | | | | | | | 6,3 | |
| Actividad volcánica | | | | | SI | | | | | | | | | | | | | | | | | SI | | SI | | | 6,4 | |
| Herramientas inerciales | LIM | SI | LIM | LIM | LIM | | | SI | LIM | LIM | SI | | | SI | SI | | | SI | SI | SI | | SI | SI | LIM | | | 7.2.1.1 | |
| Sensores de deformación (Strain gages) | SI | SI | SI | LIM | LIM | | | SI | | | | | | | | | | | SI | LIM | | | | | | | 7.2.2 | |
| Fibra óptica geotécnica | LIM | SI | | LIM | LIM | | | LIM | | | | | | SI | | | | SI | SI | | | | | | | | 7.2.4.2 | |
| Aplicaciones de plataformas SIG (Sistema de Información Geográfica) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gestión e interpretación de imágenes | SI | | | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | LIM | SI | LIM | LIM | SI | LIM | LIM | | LIM | | SI | SI | NO | LIM | | | | | 8 |
| Análisis y modelado de terrenos | SI | | | | SI | LIM | LIM | | LIM | LIM | LIM | LIM | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | | | | 8 |
| Monitoreo remoto en línea | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | 8 |
| Simulación dinámica de elementos | SI | | | | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | LIM | SI | SI | SI | SI | SI | SI | 8 |
| Otros | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI | 8 |

CONVENCIONES

| |
|----------|
| SI |
| LIMITADO |



10. ANEXO 2: SOLUCIONES GEOTÉCNICAS APLICADAS A LA INTEGRIDAD DE DUCTOS

10.1. LA GESTIÓN DE INTEGRIDAD DE DUCTOS FRENTE A LAS GEOAMENAZAS

Oleoducto Carrasco - Cochabamba "OCC"

10.1.1. Resumen ejecutivo

El presente caso de uso muestra la aplicación de una parte del programa de integridad desarrollado por YPFB Transporte S.A. (YPFBT), el cual se basa en la identificación y análisis de riesgo por geoamenazas. Para el caso se presenta el análisis de un segmento del ducto GCC operado por YPFBT.

Como parte del esfuerzo de implementar un programa sistemático de priorización de inversiones y de los trabajos de mantenimiento, basado en los principios de la gestión de riesgos, YPFBT contrató a BGC-Avot para desarrollar un modelo de evaluación cuantitativa de riesgo para calificar las amenazas e identificar los sectores expuestos a los niveles más altos de probabilidad de falla.

YPFBT ha implementado el programa de análisis de riesgo de ductos expuestos a geoamenazas aplicando el Modelo de BGC-AVOT en los ductos más críticos del sistema. El proceso de aplicación del modelo demanda básicamente la ejecución de las siguientes tareas principales:

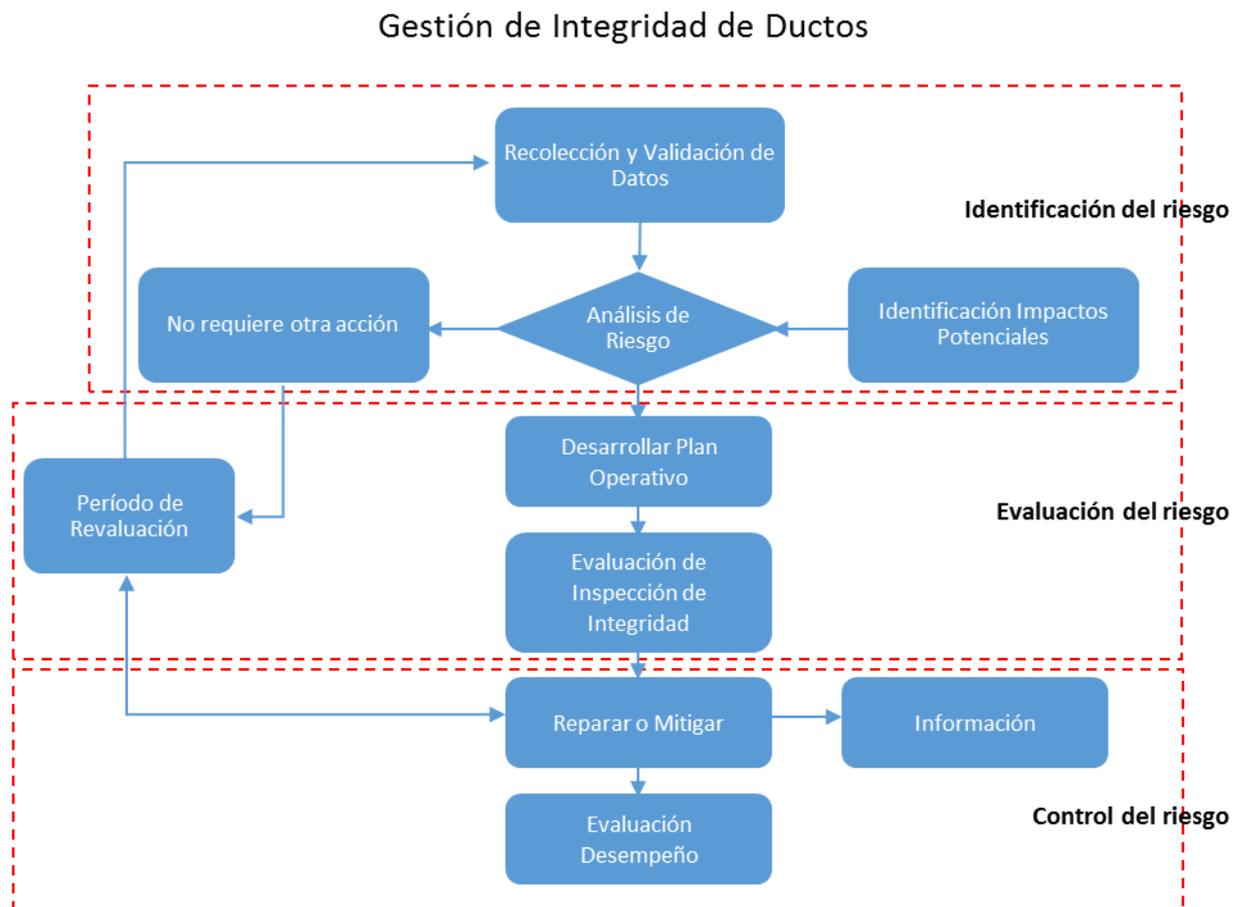
1. Elaborar el historial de sucesos o eventos del ducto con la finalidad de obtener una apreciación de la historia operacional y utilizar como referencia para la definición de la topología de segmentos geotécnicos, hidrológicos y tectónicos.
2. Establecer una base de datos y mapeo de cada ducto en toda su longitud (recopilación, validación y homogenización de datos básicos).
3. Realizar la segmentación dinámica de cada ducto (definición de topología de segmentos geotécnicos, hidrológicos, y tectónicos).
4. Realizar la caracterización y calificación de las geoamenazas consideradas en cada segmento (llenar o responder las preguntas o atributos para cada tipo de amenaza).
5. Realizar la simulación y cálculo de la probabilidad de Falla (YPFBT) para determinar los distintos segmentos de cada ducto en función de la probabilidad de ocurrencia de los eventos considerados (asociados a la situación y características particulares de los diferentes segmentos del ducto) y de la vulnerabilidad del ducto.
6. Identificar los segmentos críticos (en función de la probabilidad de falla debida a geoamenazas) que requieran un estudio más detallado y de eventuales medidas tendientes a reducir la probabilidad o riesgo de falla del ducto.
7. Estudiar en detalle los segmentos críticos identificados y diseñar las medidas preventivas y correctivas que constituyen el plan de acción o el plan de emergencia del ducto considerado.
8. Preparar informes del proceso realizado.



De acuerdo con los plazos para la ejecución de obras de control o mitigación, y a la criticidad de cada segmento, la siguiente etapa es el periodo de evaluación en función de los plazos establecidos en la Norma interna de YPFBT ITM118 (Instructivo de Trabajo de Mantenimiento), “Trabajos de Análisis de Riesgos de Ductos Expuestos a Geoamenazas”.

10.1.2. Introducción

YPFBT trabaja desde hace algunos años en un programa sistemático, comprensivo, e integrado de gestión de integridad de ductos, basado en los principios de la gestión de riesgos, que incluye, entre otros, la identificación y análisis de riesgos por fenómenos naturales (debido a aspectos geológicos, geomorfológicos, hídricos, sísmicos, etc.), más conocidos como geoamenazas, que le permiten establecer e implementar un programa de acciones preventivas y correctivas con el objeto de prevenir y mitigar los efectos de fenómenos naturales que puedan afectar la operación segura de los ductos y causar derrames u otros⁹⁷.



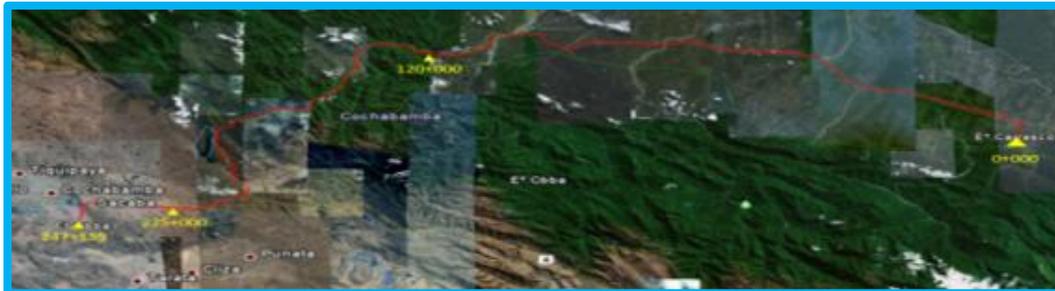
Fuente: Jefatura de Integridad de Ductos, YPFBT.

Figura 10.1 Gestión de Integridad de Ductos YPFBT

⁹⁷ Gestión de Integridad de Ductos Expuestos a Geoamenazas, YPFBT 2012.

En 2011, de acuerdo con la programación de análisis de riesgo, se realizó la evaluación del Oleoducto Carrasco - Cochabamba "OCC" que parte de la Estación de Carrasco y recorre 247 km hasta llegar a la Estación Gualberto Villarroel, ambas dentro del departamento de Cochabamba.

En la siguiente imagen satelital (Figura 10.2) se aprecian las zonas de acuerdo con su distancia con respecto al poste de kilometraje (KP).



Referencias: — Ducto OCC
▲ KP's

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC".

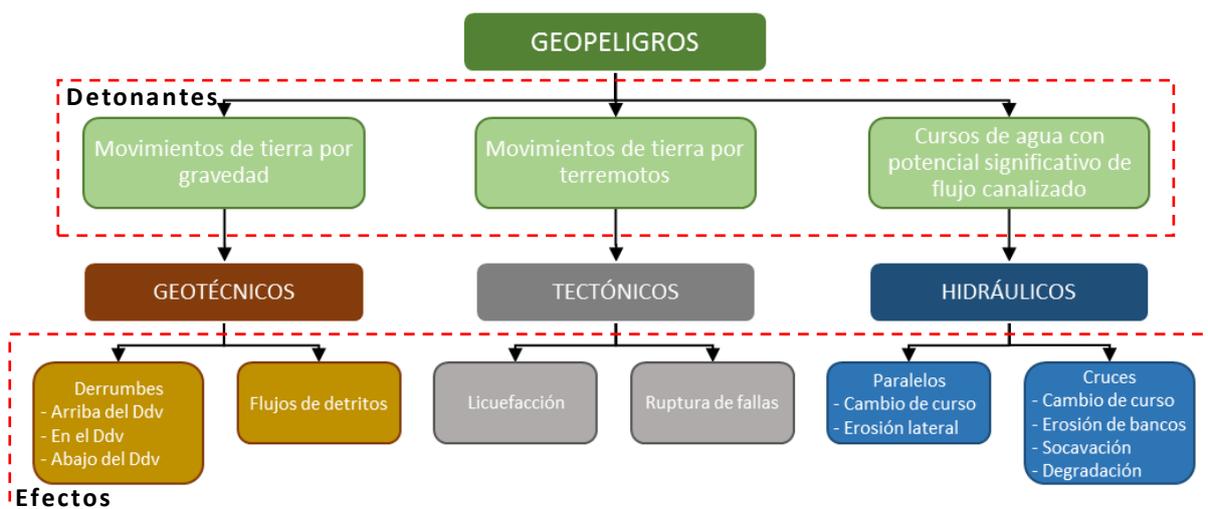
Figura 10.2 Vista general del ducto OCC

10.1.3. Aplicación del Programa de Gestión de Integridad de Ductos

En los siguientes acápite se describe y aplica cada paso del programa.

10.1.3.1. Identificación de impactos potenciales

Con el fin de optimizar la gestión de riesgos y asegurar las inversiones y los trabajos de mantenimiento, el modelo de evaluación cuantitativa de riesgos califica las amenazas e identifica los sectores expuestos a diferentes niveles de riesgo.



Fuente: elaboración propia en base a documento "Gestión de Integridad de Ductos Expuestos a Geoamenazas".

Figura 10.3 Modelo de clasificación de las geoamenazas de YPFBT



10.1.3.2. Recolección y validación de datos

El primer paso en la evaluación del potencial de daño al sistema de ductos o segmento es recolectar, revisar, validar, e integrar los datos y la información necesaria. Esta tarea contempla los siguientes pasos:

10.1.3.3. Elaboración de historial de sucesos o eventos de cada ducto

Se analizó la hoja de vida del ducto, donde se detallaba la información respecto a la ocurrencia de sucesos o eventos de derrames o escape de producto y las causas que los ocasionaron (lluvias, derrumbes, crecidas de los ríos, etc.), a lo largo de todo el tiempo que estuvo en operación; esto sirvió de referencia para la definición de topología de segmentos geotécnicos, hidrológicos y tectónicos.

10.1.3.4. Establecer base de datos y mapeo de cada ducto

El propósito de esta tarea es contar con la mayor cantidad posible de información sobre el ducto a lo largo de todo su recorrido, tal como información cartográfica y digital (planos As-built del ducto, imágenes satelitales, fotografías aéreas, mapas IGM 1:50.000 y 1:250.000, mapas geológicos y geomorfológicos, mapas hidrográficos, de suelos, cobertura vegetal y otros mapas temáticos).

En la recopilación de esta información se identificaron tres zonas con características singulares detalladas a continuación:

| KP | ZONA | Precipitación Prom. anual [mm/año] | Clasificación climática según Köppen | Unidad fisiografía y caracterización | Cobertura vegetal |
|-------------------|------------------------------|------------------------------------|--|--|---|
| 0+000 - 120+000 | Pie de monte Oriental Andina | 1600 | Af (tropical siempre húmedo) | Llanura de pie de monte oriental, pequeñas ondulaciones. | Abundante, suelos poco aptos para actividades agrícolas extensivas. |
| 120+000 - 225+000 | Yungas Corani y Chapare | 5400 | Af (tropical siempre húmedo) | Subandino, cadenas montañosas medias y altas. | Abundante, vegetación de alto porte apta para agricultura industrial. |
| 225+000 - 247+139 | Valle de Cochabamba | 500 | Cwa (mesotérmico con invierno seco y frío) | Cordillera oriental, llanura fluvio-lacustre. | Rala, de poca altura, áreas de cultivos de pequeña escala. |

Fuente: Elaboración propia en base a "Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC".

Tabla 10.1 Caracterización de zonas que atraviesa el ducto OCC

En este caso, de acuerdo a su fisiografía, cobertura vegetal y precipitación promedio anual, la zona con mayores eventos es la del Subandino, constituida por cadenas de serranías y colinas, principalmente en el tramo entre los KP 120+000 a KP184+000, donde la topografía va desde 400 a 1.500 msnm, con pendientes que alcanzan el 100% y donde se tienen valles profundos con ríos de caudales considerables, cuyos aportes en la zona son:



| Descripción | Área [km ²] | Q medio anual [m ³ /s] |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Río Espíritu Santo III | 1005,21 | 43,63 |
| Río Santa Isabel | 244,03 | 10,59 |
| Río Isarzama | 296,68 | 12,88 |
| Río Ivirgarzama | 287,66 | 12,48 |

Fuente: Elaboración propia en base a "Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC".

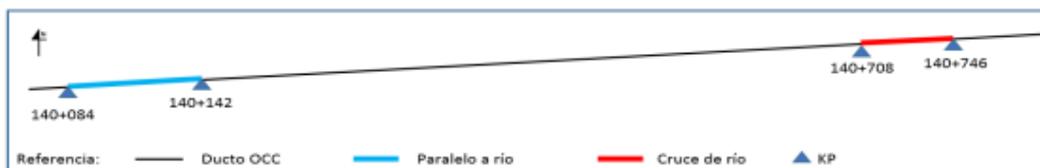
Tabla 10.2 Caracterización de zonas que atraviesa el ducto OCC

Geológicamente, la zona crítica presenta principalmente areniscas, limolitas y lutitas, rocas sedimentarias detríticas de propiedades físico-mecánicas bajas por naturaleza.

10.1.3.5. Realizar la segmentación dinámica de cada ducto

Con base en la información recopilada en las Tareas 1 y 2, se realizó la segmentación del ducto en campo, con colectores GPS de alta resolución que cuentan con trazo geo-referenciado, y en gabinete se determinaron los KP de inicio y fin de cada segmento geotécnico, hidrotécnico y tectónico.

Asimismo, en la inspección de campo se respondieron (llenando) las preguntas diseñadas para cada segmento. La información básica recopilada en las tareas 1 y 2, que se encuentra cargada en el colector GPS, fue corroborada o modificada según corresponda en base a lo observado. A continuación se muestra un ejemplo de segmentación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10.4 Ejemplo de segmentación del ducto OCC

10.1.3.6. Realizar la caracterización y calificación de las geoamenazas

En esta etapa se definen los atributos para cada tipo de peligro con base en una inspección detallada de campo; in situ se definen la topología y las respuestas finales para completar la base de datos para su introducción al modelo de análisis de riesgo.



Fuente: “Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC” YPFBT.

Figura 10.5 Cruce aéreo KP 140+708-140+746

Algunas preguntas llenadas en campo son:

- ¿Cuál es la pendiente máxima del curso de agua por donde cruza el ducto?
4 – 10 %
- ¿Cuál es el régimen de caudal?
Efímero
- ¿La llanura de inundación está sujeta potencialmente al flujo de detritos en el lugar del cruce?
Sí
- ¿Hay evidencia de erosión activa o reciente en los bancos de la izquierda o derecha?
Sí
- ¿Cuál es la configuración de diseño del ducto?
Cruce aéreo

10.1.3.7. Análisis de riesgo por geoamenazas

Con base en todos los datos recolectados en el paso anterior se ejecutó el modelo de análisis de riesgo por geoamenazas para determinar la probabilidad de falla (PoF) en función de la probabilidad de ocurrencia de los eventos considerados (asociados con la situación y características particulares de los diferentes segmentos del ducto) y de la vulnerabilidad del ducto.

La probabilidad de falla para el evento (Pf Geoamenaza) se determina con la siguiente relación:

$$Pf_{\text{Geoamenaza}} = 1 - [(1 - Pf_{\text{Geotécnica}}) * (1 - Pf_{\text{Hidrotécnica}}) * (1 - Pf_{\text{Tectónica}})]$$



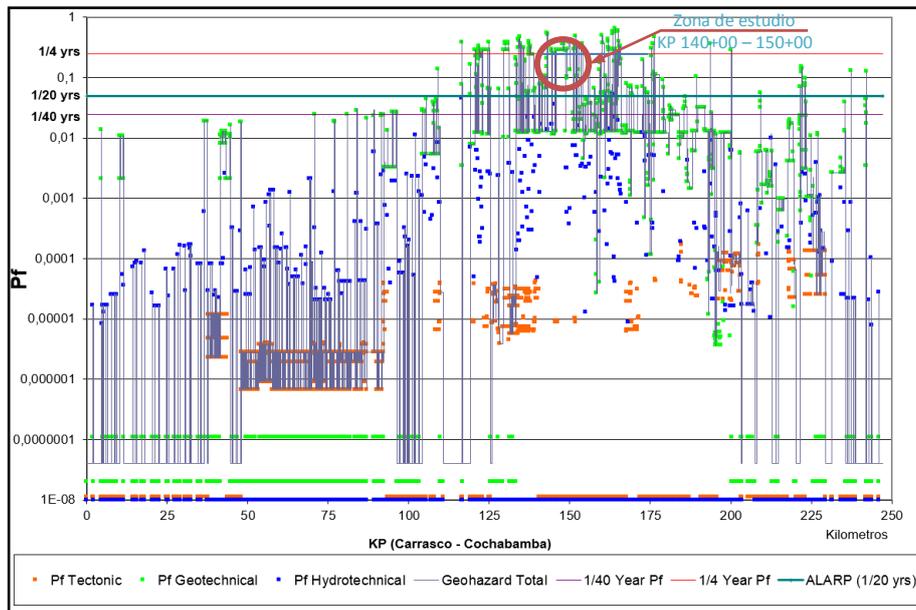
Para el segmento en estudio se tiene:

| Kp Inicial | Kp Final | Pf Geotécnica | Pf Hidrotécnica | Pf Tectónica | Pf Geoamenaza |
|------------|------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| 140+708,00 | 140+746,00 | 0,077054838 | 0,004930143 | 1,1E-08 | 0,0816051 |

Fuente: elaboración propia en base a "Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC".

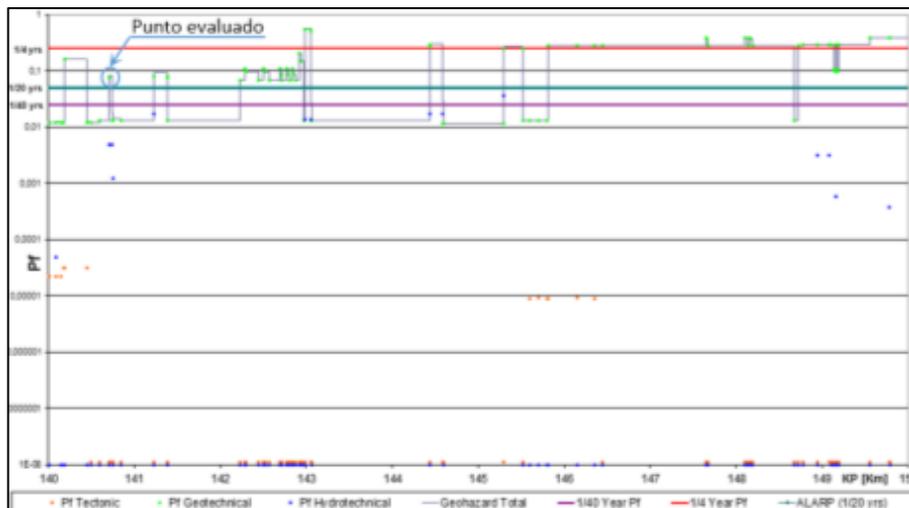
Tabla 10.3 Resultados de probabilidad de falla (Pf) por evento

Posteriormente, los resultados obtenidos se clasifican y categorizan según su Pf viendo gráficamente para todo el ducto OCC se obtuvo:



Fuente: Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC.

Figura 10.6 Probabilidad de falla del ducto OCC-2011



Fuente: Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC.

Figura 10.7 Vista ampliada de la zona KP 140+000 - 150+000



10.1.3.8. Desarrollar el Plan Operativo

Una vez realizada la modelación de geoamenazas, y obtenidos los resultados de cálculo de Probabilidad de Falla (PoF), se identificaron todos los segmentos que reportan Probabilidades de Falla (total o parcial) $\geq 0,05$ (correspondiente a un período de retorno $Tr \leq 20$ años).



Figura 10.8 Bandas de la Probabilidad de Falla

| Descripción | Tiempo de Retorno | YPFBT | Prof. |
|-------------|---|-------|--------|
| URGENTE | $Tr \leq \frac{1}{4}$ años | A | 0.25 |
| ALARP | $\frac{1}{4} < Tr \leq \frac{1}{20}$ años | B | 0.05 |
| BAJO | $Tr > \frac{1}{20}$ años | C | 0.0025 |

Fuente: Jefatura de Integridad de Ductos, YPFBT.

Tabla 10.4 Clasificación de la Probabilidad de Falla

| Kp Inicial | Kp Final | Pf Geotécnica | Pf Hidrotécnica | Pf Tectónica | Pf Geoamenaza | Pof Clasificación |
|------------|------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|---------------------|
| 140+708,0 | 140+746,00 | 0,077054838 | 0,004930143 | 1,1E-08 | 0,0816051 | ALARP ⁹⁸ |

Fuente: Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC.

Tabla 10.5 Clasificación de probabilidades de falla del ducto OCC

Para los eventos que se encuentran sobre la franja ALARP, la probabilidad de falla determina la criticidad de las medidas preventivas, las cuales se detallan en planes de acción o de emergencia según corresponda.

Los planes describen -para cada segmento- la problemática del sector, tipo de geoamenaza y posibles daños que vayan a ocurrir. Se proponen obras de mitigación de manera conceptual indicativa que se presentan de manera esquemática con sus respectivas recomendaciones y sugerencias para el momento de ejecución. También incluye un presupuesto estimado de las obras propuestas para cada segmento; lo que los diferencia es el tiempo de ejecución de las obras de mitigación o control:

- **Plan de Acción** – Segmentos ALARP con probabilidad de falla $\geq 0,05$ y $< 0,25$ ($\frac{1}{4} < Tr \leq \frac{1}{20}$ años)

El Plan de Acción propone acciones que se deben programar en la planificación de inversiones para el mantenimiento de los ductos en un plazo máximo de 2 años.

- **Plan de Emergencia** - Segmentos URGENTE con probabilidad de falla $\geq 0,25$ ($Tr \leq \frac{1}{4}$ años)

⁹⁸ Acrónimo del inglés "As Low As Reasonably Practicable"

El Plan de Emergencia propone medidas a corto plazo que deben programarse en un plazo no mayor a 6 meses.

10.1.4. Evaluación e Inspección de Integridad

Los segmentos que se encuentran dentro del plan de acción o del plan de emergencia deben ser estudiados en detalle para establecer las medidas de mitigación preventivas y correctivas, técnicas y económicamente factibles, tendientes a reducir la probabilidad o riesgo de falla del ducto debido a geoamenazas.

10.1.4.1. Problemática del sector

En el segmento KP 140+708 – 140+746 se tiene un cruce aéreo con torres auto-soportadas en ambos lados para vencer el río Cristal Mayu. El ducto es superficial antes y después de dicho cruce, el margen derecho en sentido del flujo tiene un muro de gaviones a la altura de la torre que no es suficiente para proteger el talud, en el margen izquierdo la configuración cambia ya que el ducto es paralelo al río y ese sector no cuenta con ninguna obra de control para deslizamientos.



Fuente: Plan de Acción Ducto OCC – 2011.

Figura 10.9 Márgenes del Río Cristal Mayu - evaluación 2011

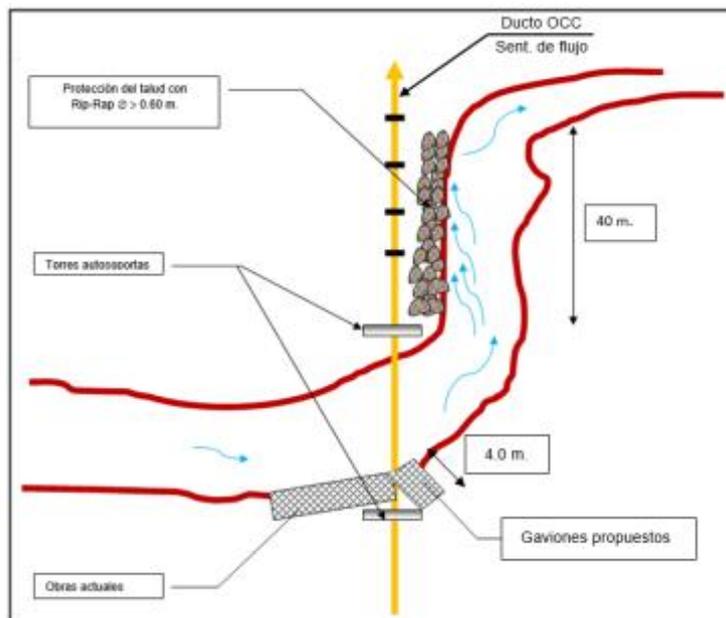
10.1.4.2. Obras de mitigación propuestas

En el margen derecho se recomendó ampliar el muro de gaviones para estabilizar el talud y proteger la torre; se debe dar continuidad al muro ya existente y mantener su geometría. El muro debe direccionar el flujo de manera tal que -en épocas de lluvias- las crecidas no afecten al soporte, así como también debe estar ubicado adecuadamente para darle estabilidad al talud.

En el margen izquierdo se recomendó proteger el talud con Rip-Rap $\varnothing > 0,60$ m. Como el ducto se encuentra paralelo al cauce, se deben evitar los procesos de erosión que puedan llegar a poner en riesgo las fundaciones de la torre y de los soportes que tiene el ducto seguidamente al cruce aéreo.



A continuación se muestra un esquema de la ubicación tentativa de las obras de mitigación; ya que el segmento está clasificado como Alto y es parte del Plan de Acción, estos trabajos se deben realizar en un plazo no mayor a 2 años. El porqué de este periodo se describirá en el acápite de criticidad y periodo de evaluación.



Fuente: Plan de Acción Ducto OCC – 2011.

Figura 10.10 Esquema de ubicación de obras propuestas

10.1.5. Reparar o mitigar

Las obras recomendadas fueron ejecutadas: se colocó un muro de hormigón y gaviones para protección de la barranca contra los embates del río, y protección de las fundaciones de la torre del margen derecho.



Fuente: Informe de Evaluación de Obras Ducto OCC – 2013.

Figura 10.11 Obras de contención - margen derecho - Río Cristal Mayu



10.1.6. Periodo de reevaluación

El análisis de riesgo se debe realizar periódicamente con intervalos regulares, y cuando sucedan cambios sustanciales en el sistema de ductos o en los sectores evaluados. El Instructivo de Mantenimiento de YPFBT, ITM.118 “Trabajos de Análisis de Riesgos de Ductos Expuestos a Geopeligros” establece un periodo máximo de 10 años entre evaluaciones desde que se realice una evaluación de confirmación en el año 7, de que el ducto está en condiciones de aguantar hasta el año 10.

Por la naturaleza dinámica de los eventos de geoamenazas, la evaluación de confirmación se debe realizar en los segmentos con criticidad ALTA, ALARP y URGENTE a los 7 años de realizada la primera evaluación completa. De acuerdo a esto se tiene el siguiente programa de reevaluaciones:

| Descripción | Tiempo de Retorno | Año 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|-----------------------------------|-------|------|---|------|---|---|-----|------|---|-----|-----|
| URGENTE | $Tr \leq \frac{1}{4}$ años | E/A | EO/A | - | - | - | - | E/A | EO/A | - | E/A | E/A |
| ALARP | $\frac{1}{4} < Tr \leq 1/20$ años | E | A | A | EO/A | - | - | E | A | A | E | A |
| ALTO | $1/20 < Tr \leq 1/40$ años | E | - | - | - | - | - | E | - | - | E | - |
| MODERADO | $1/40 < Tr \leq 1/400$ años | E | - | - | - | - | - | - | - | - | E | - |
| BAJO | $1/400 < Tr \leq 1/4000$ años | E | - | - | - | - | - | - | - | - | E | - |
| MUY BAJO | $Tr > 1/4000$ años | E | - | - | - | - | - | - | - | - | E | - |

E -> Evaluación

E/A -> Evaluación y acción dentro de los próximos 6 meses

A -> Acción en los siguientes dos años

EO -> Evaluación de obras

Fuente: Jefatura de Integridad de Ductos, YPFBT.

Tabla 10.6 Programa de evaluación y reevaluación de riesgos por geoamenazas

Se toma como año 1, para fines de programación, a la primera evaluación completa de todo el ducto y se determina la criticidad de cada segmento. A los 6 meses de esta evaluación completa se deben ejecutar las acciones recomendadas en el Plan de Emergencia en todos los segmentos de criticidad URGENTE. En los años 2 y 8 se evalúan las obras del Plan de Emergencia, o si fuera necesario se realizan nuevas acciones para mitigar el riesgo de los segmentos con criticidad URGENTE. En los años 2, 3, 8 y 9 se realizan las acciones del Plan de Acción para la mitigación de riesgos de los segmentos con criticidad ALARP. En el año 4 se evalúan las obras del Plan de Acción, o si fuera necesario se realizan nuevas acciones para mitigar el riesgo de los segmentos con criticidad ALARP. En el año 7 se realiza la evaluación de confirmación. En el año 10 se realiza una evaluación completa de todo el ducto y se reclasifican los segmentos para volver a empezar el programa como año 1.

Para el ducto OCC se realizó la evaluación de obras en la gestión 2013 en la cual se verificó la eficiencia y funcionamiento de las obras de mitigación ejecutadas por el departamento de Mantenimiento de Líneas, con el fin de disminuir los riesgos por geoamenazas y garantizar la integridad del ducto.

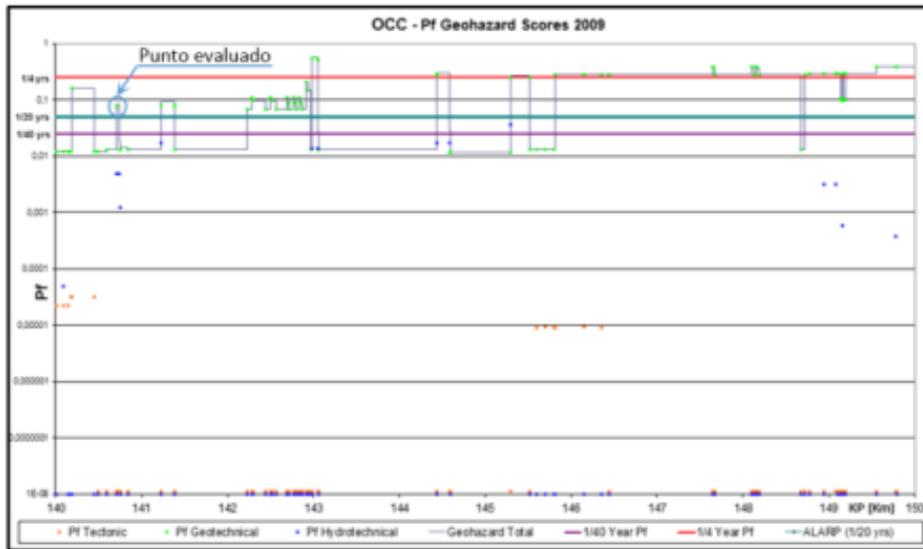


| KP Inicial | KP Final | 2011 | | 2013 | |
|------------|------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| | | Pf Geoamenaza | Po Clasificación | Pf Geoamenaza | Po Clasificación |
| 140+708,00 | 140+746.00 | 0,077055 | ALARP | 0,044987 | ALTO |

Fuente: Elaboración Propia en base a Plan de Acción OCC – 2011 e Informe de Evaluación de Obras OCC – 2013.

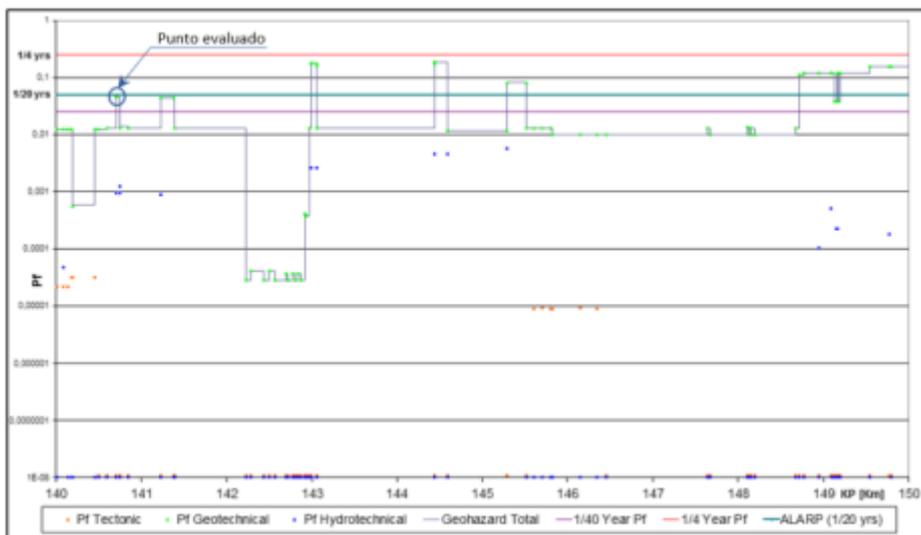
Tabla 10.7 Comparación de resultados de evaluación y reevaluación - ducto OCC

Las obras recomendadas para el sector fueron las adecuadas, la probabilidad de falla se redujo en un 55%; ahora está clasificada como baja.



Fuente: Informe de Evaluación de Geoamenazas Ducto OCC – 2011.

Figura 10.12 Probabilidad de falla - ducto OCC-2011



Fuente: Informe de Evaluación de Obras Ducto OCC – 2013.

Figura 10.13 Probabilidad de falla ducto OCC-2013



De acuerdo con la evaluación de las obras realizadas para el segmento KP 140+708 – 140+746, la disposición de un muro de hormigón y gaviones para proteger al talud y garantizar la estabilidad de la torre del lado derecho, es la adecuada; el segmento pasa de ALARP a BAJO.

Las obras fueron realizadas dentro del plazo del programa de re-evaluaciones, es decir, a los dos años de realizada la evaluación completa del ducto se hizo el control de obras. Para la gestión 2017 se prevé una nueva evaluación de los segmentos con criticidad ALARP y URGENTE.

Los segmentos que aún mostraban criticidad ALARP fueron señalados para un nuevo Plan de Acción.

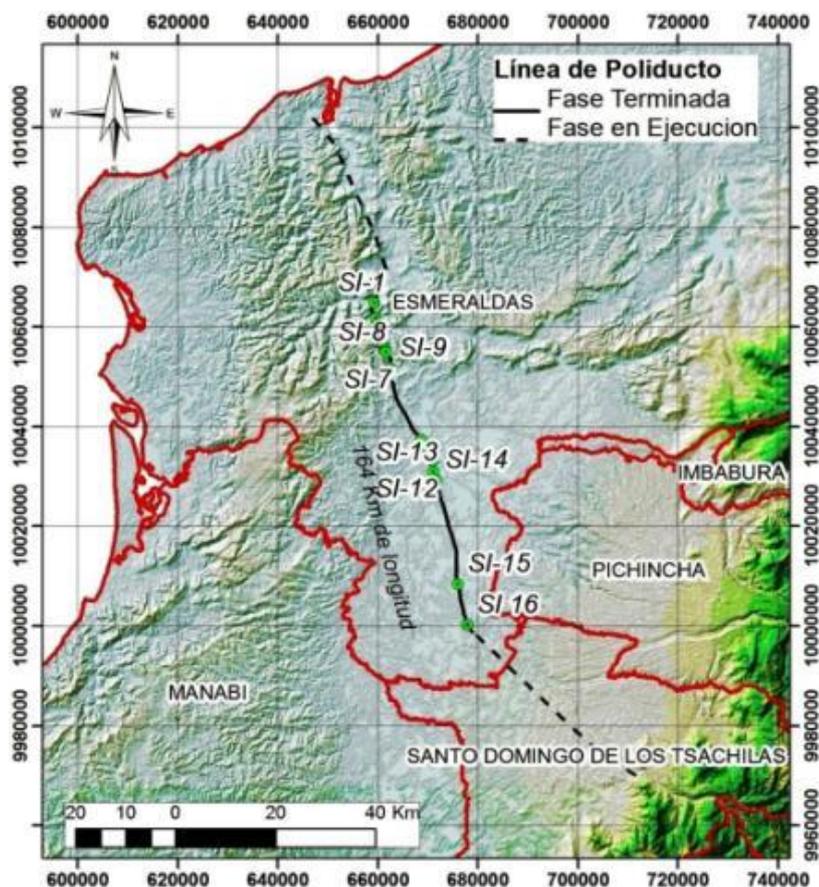


10.2. Estudio de geología de superficie - poliducto Esmeraldas-Santo Domingo

10.2.1. Resumen ejecutivo

EP-PETROECUADOR gestionó la realización de los estudios de geología de superficie para el proyecto: “Estudios de ingeniería básica y de detalle para el cambio de tubería del poliducto Esmeraldas – Santo Domingo”⁹⁹.

Este estudio de geología tuvo la finalidad de analizar la geomorfología del terreno y la identificación de estructuras o procesos geológicos existentes a lo largo del ducto desde la estación Cabecera Esmeraldas hasta la estación de bombeo de Santo Domingo. Datos preliminares reportaron previamente dieciséis sitios con evidencia de inestabilidad en el terreno o fenómeno geológico extremo (subsistencia del terreno, deslizamiento o derrumbes de estratos rocosos, fracturamiento, entre otros), que podrían afectar el ducto. En los afloramientos rocosos se identificaron las unidades litológicas y estratigráficas, fallamiento y diaclasas con su dirección y buzamiento estructural; además se determinó el comportamiento geomecánico del substrato rocoso donde se asienta el ducto.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Referencias: SI: sitios inestables identificados.

Figura 10.14 Mapa de ubicación del tramo del ducto Esmeraldas – Santo Domingo.

⁹⁹ Estudio de Geología de Superficie, Cía. SISMICA – CONSULTORES, EP PETROECUADOR, 2013.



10.2.2. Objetivos del estudio geológico

- ✓ Realizar un levantamiento geológico – geomorfológico del tramo del ducto Esmeraldas – Santo Domingo, de 164,03 kilómetros de longitud.
- ✓ Identificar zonas de riesgo geológico con efecto de daño para el ducto, tales como: (a) zonas con deslizamientos o movimientos de tierra superficiales, (b) zonas con deslizamientos o movimientos de tierra profundos, (c) derrumbes y desprendimientos de bloques rocosos desde zonas de laderas fracturadas o diaclasadas, (d) zonas de erosión de cobertura de suelo o denudación del terreno, (e) fallamiento superficial y dislocamiento vertical del terreno asociado a tectónica activa.
- ✓ Elaborar un mapa sismotectónico, identificando fallas activas y capaces de generar sismos en el orden de magnitud de $6 \leq M_w \leq 7$, además de confrontar la actividad tectónica con datos sismológicos instrumentales obtenidos en el catálogo NEIC (*National Earthquake Information Center*).
- ✓ Caracterizar la cinemática y geometría de las fallas geológicas activas que afectan la trayectoria del ducto y delinear nuevas variantes del tramo del mismo.
- ✓ Correlacionar estratigráficamente desde datos obtenidos en la fase de geotecnia y prospección geofísica (si hay disponibilidad de secciones sísmicas de refracción).
- ✓ Analizar el comportamiento geomecánico de las unidades litológicas identificadas por medio del método de Bieniawski, para determinar la resistencia a la compresión uniaxial. Estudio de variantes o alternativa de obras de protección en sitios de inestabilidad geológica; o en donde se ha perdido el DDV por invasión de población.
- ✓ Elaboración de informe final, para lo cual será necesario realizar una interpretación general (síntesis) de todos los datos e informes analizados a lo largo del estudio, para -de esta manera- poder generar las conclusiones y recomendaciones finales.

10.2.3. Fases de investigación geológica y metodología

Para el estudio de riesgo geológico se consideraron todos los rasgos estructurales y estratigráficos que indicaban discontinuidades laterales. El análisis de las líneas sísmicas (de estar disponibles) permite conocer estas discontinuidades en el subsuelo. La morfología del terreno a partir de análisis topográficos permite establecer la pendiente en el terreno con gradiente variable, así como delimitar sectores de hondonadas y altos topográficos. Estos últimos son considerados en el análisis de riesgo aplicado a delinear posibles trayectos de infraestructuras petrolíferas.

El presente programa de investigación fue organizado en tres fases principales; una primera fase de compilación de datos geológicos del área de estudio, que permitió determinar la morfología, tectónica, procesos sedimentarios y geodinámica del área de estudio. Se obtuvo información a escala (1:50.000, 1:10.000), incluyendo la revisión de modelos de elevación digital del terreno (MDT) a partir de datos topográficos y los rasgos morfológicos en el terreno, que caracterizan y determinan las zonas críticas con evidencia de fenómenos geológicos activos o potencialmente activos, tales como:



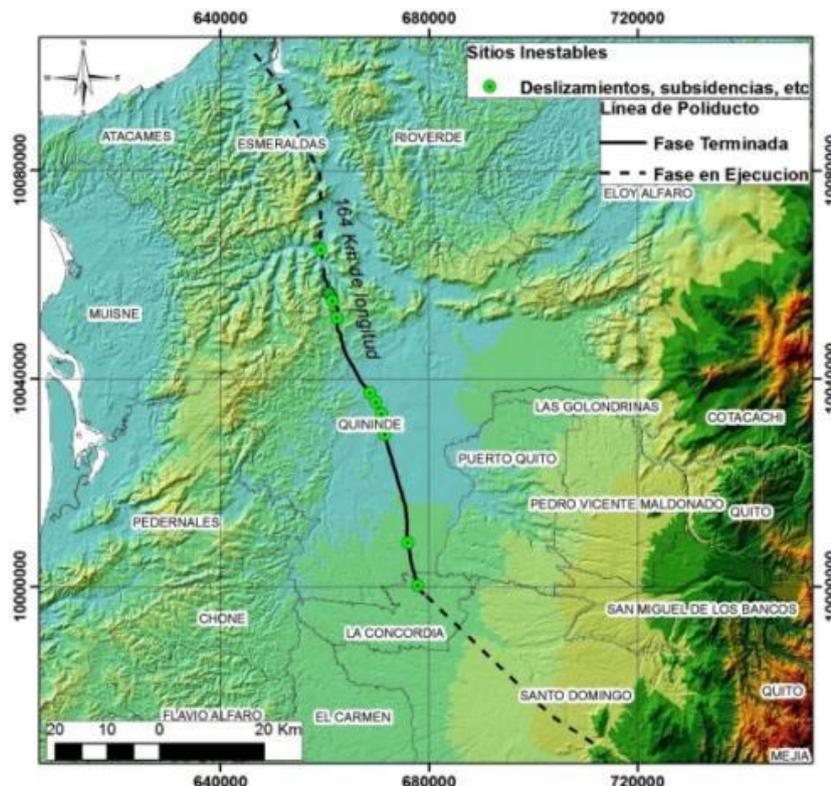
fallamiento superficial, deslizamientos de masas de tierras, subsidencia del terreno, altos rocosos diaclasados entre otros, esto, dependiendo de las condiciones geológicas presentes.

En la segunda fase, los datos de geología de superficie fueron confrontados con los datos de perforaciones geotécnicas y de prospección geofísica (a través de sísmica de refracción, sondeos eléctrico-verticales y REMI's, para confirmar la aplicación de estos análisis en zonas inestables críticas). Este análisis permitió conocer las características físicas del subsuelo; como velocidades de las ondas P y S, discontinuidades en el subsuelo y profundidad del substrato rocoso. Se contó con un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis de los datos, así como para la elaboración de isópacos estructurales, entre otros.

La tercera fase consistió en la elaboración del informe final, en el cual se explica toda la documentación y datos analizados, la metodología empleada para el estudio, la descripción de los procesos realizados, los resultados obtenidos, y las conclusiones y recomendaciones finales.

10.2.4. Área de estudio

El área de estudio comprende el tramo del ducto Esmeraldas – Santo Domingo, con una longitud instalada de 164,03 km. Este tramo del ducto atraviesa los cantones de Santo Domingo, La Concordia (provincia de Santo Domingo de los Tsachilas), La Unión, Quinindé y Esmeraldas (provincia de Esmeraldas), al norte de Ecuador.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.15 Localización de estaciones de muestreo¹⁰⁰

¹⁰⁰ Donde se identificaron 16 sitios inestables desde el PK-39 al PK-119.



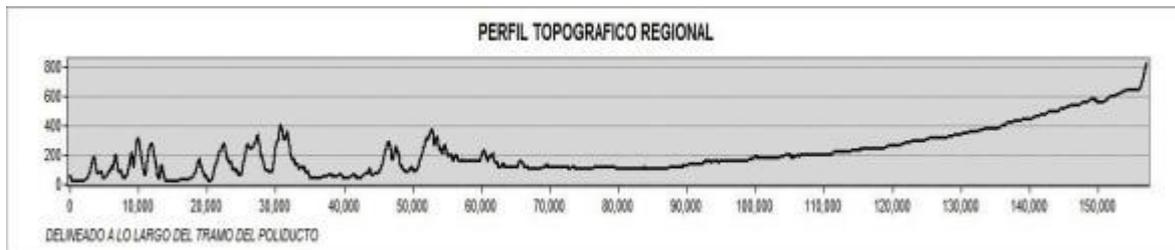
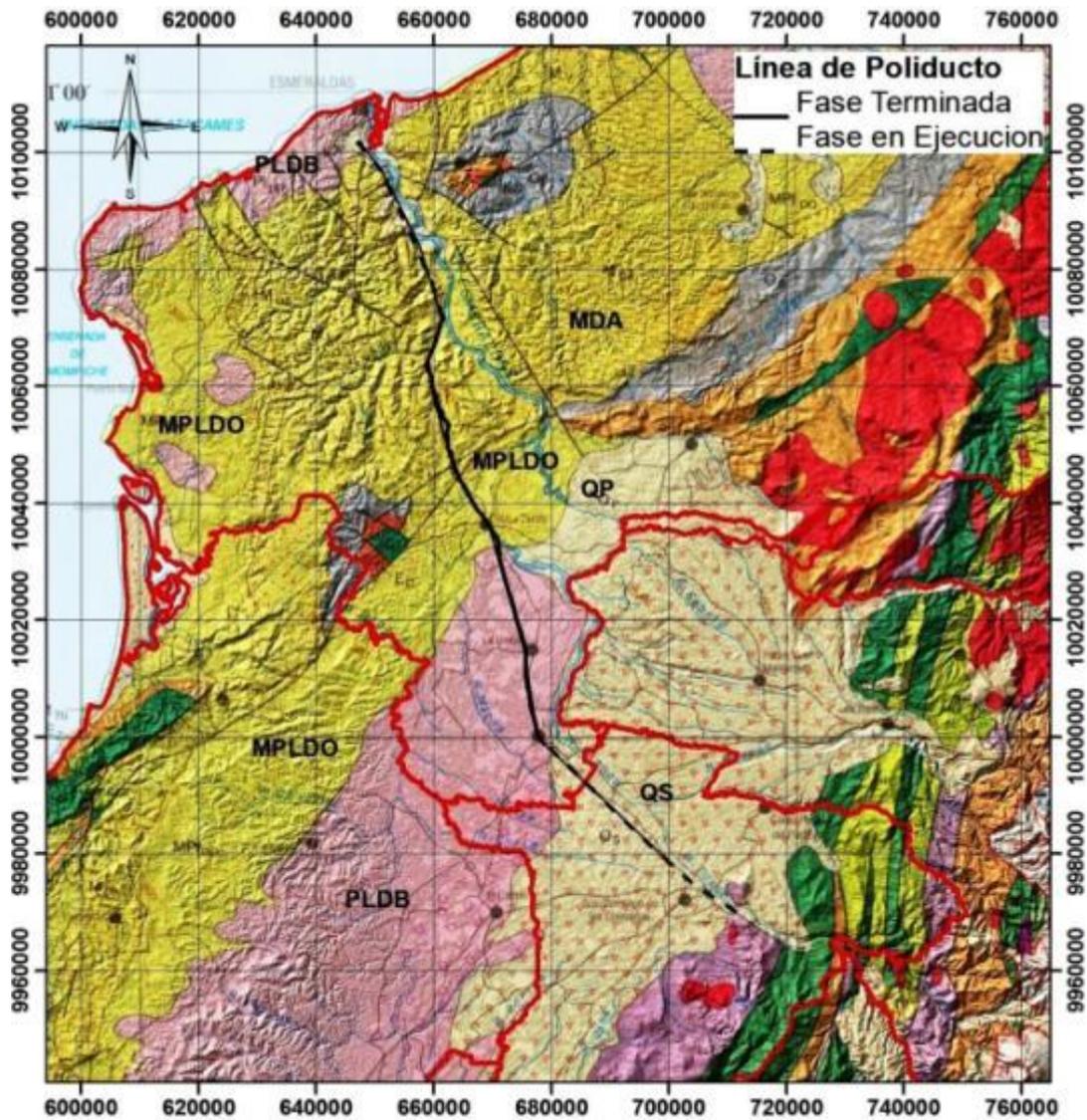
Durante la fase de geología de superficie y exploración se trabajó en 80 estaciones de muestreo desde el PK-39 al PK-119, abreviadas con las iniciales “SI”.

| Id. | Fenómeno geológico |
|------------|------------------------------------|
| SI-1 | Subsidencia |
| SI-2 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-3 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-4 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-5 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-6 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-7 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-8 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-9 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-10 | Incisión fluvial |
| SI-11 | Represamiento y sedimentación |
| SI-12 | Deslizamientos y subsidencia |
| SI-13 | Represamiento y subsidencia |
| SI-14 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-15 | Escarpes de deslizamientos |
| SI-16 | Sitio de aglomeración - Cementerio |

Fuente: EP PETROECUADOR.

Tabla 10.8 Estaciones de muestreo durante la fase de geología de superficie y exploración¹⁰¹

¹⁰¹ En las estaciones de muestreo desde el PK-39 hasta el PK-119 se identificaron 16 sitios inestables.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.16 Mapa geológico regional y la proyección espacial del ducto¹⁰²

¹⁰² El perfil topográfico trazado a lo largo del ducto fue obtenido del modelo digital del terreno DEM's para Ecuador continental. MPLDO: formación Borbon y Viche. PLDB: formación Onzole.



10.2.5. GEOLOGÍA

10.2.5.1. Formaciones geológicas aflorantes a lo largo del tramo del ducto

El sitio de estudio se asienta sobre dos formaciones geológicas principales, Borbon – Viche y Onzole.

La formación Borbón¹⁰³ es un depósito detrítico de extensión regional a lo largo de la cordillera costera de Ecuador. Tiene una edad -según la bibliografía¹⁰⁴- que va del Plioceno al Pleistoceno temprano. Los afloramientos mejor expuestos están sobre el flanco oriental de la cordillera costera. La formación Borbón nunca antes fue estudiada en detalle por lo cual no se tienen datos específicos acerca de su edad, litología, mineralogía y ambientes de depositación. La única sucesión litoestratigráfica que existe viene de Benítez (1995), pero no está basada en un corte de campo. Sin embargo, esta formación es muy importante porque es la última de extensión regional, anterior al levantamiento de la cordillera costera, lo que significa que, en sus sedimentos, registró el levantamiento de la cordillera occidental y costera. Con este fin se realizó una sección al noreste del pueblo de Santa Ana (Manabí), en la zona denominada Guarumo.

La formación Viche (Mioceno Temprano - Mioceno Medio Temprano) está formada por arcillolita parda, a veces limolítica, con nódulos y bancos lenticulares de calizas y algunos bancos arenosos (Figura 10.17). En la Zona de Río Verde, en el flanco Sur del anticlinal, afloran 900 m de esta formación. La microfauna es abundante y visible a la lupa en el campo. En la sección Norte del Horst de Río Verde se presentan arcillolitas de color gris verdoso y gris azulado, fosilíferas y en parte tobáceas. Según Canfield, la formación Viche ha sido observada en el pozo Camarones-1. La formación está entre los 612 y 950 m (2009 y 3116 pies) de profundidad, y corresponde a lutitas tobáceas de color gris verdoso y gris azulado con laminaciones y en algunos lugares bentonítica cálcica¹⁰⁵. La formación brinda nanofósiles calcáreos, foraminíferos, radiolarios y palinomorfos que se ilustran en razón de que, por una parte, testimonian la edad Neógeno, y a la vez han provisto una asociación peculiar de microfósiles depositados en un medio marino de plataforma externa a talud superior con aguas ricas en nutrientes orgánicos.

¹⁰³ Bristow y Hoffsteter (1977)

¹⁰⁴ Benítez (1995); Deniaud (1998)

¹⁰⁵ Cecil Hagen (1947)

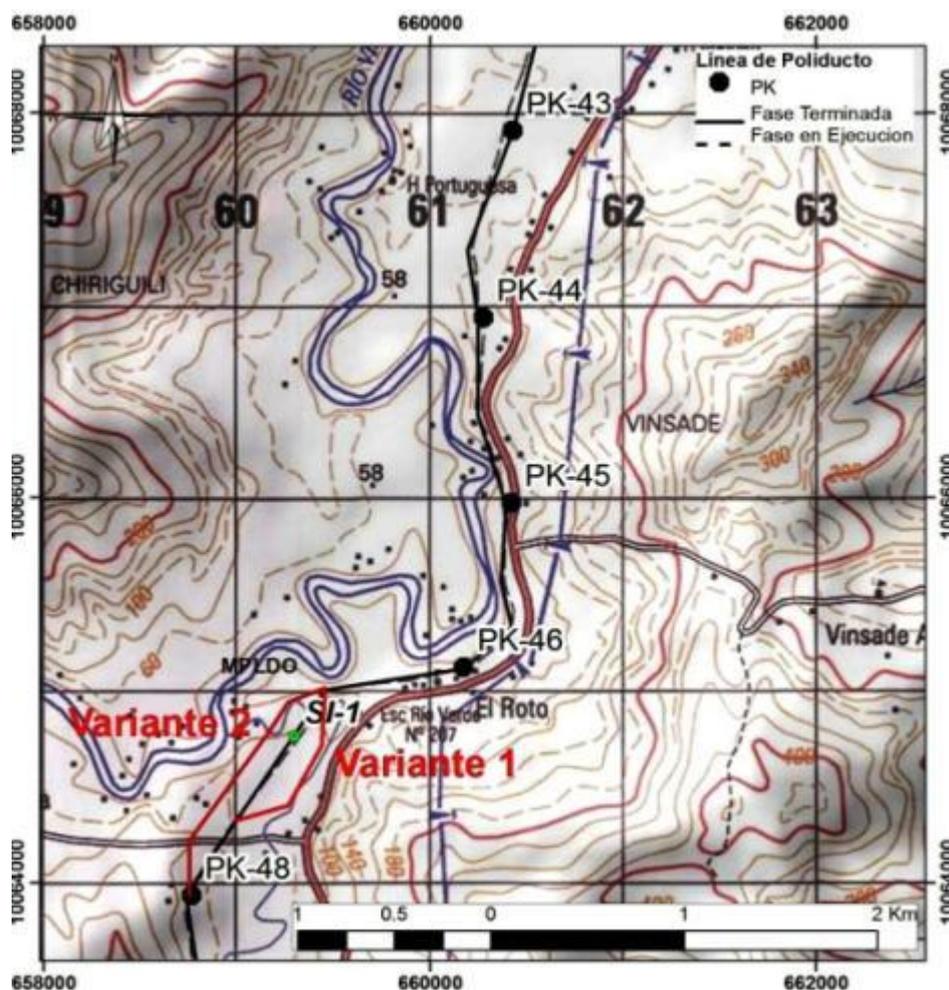


10.2.6. EVALUACIÓN GEOLÓGICA DE SITIOS INESTABLES

10.2.6.1. Sitio inestable SI-1 localizado en el sector "El Roto"

Aspectos geomecánicos de la deformación del terreno

Este tramo del ducto se encuentra asentado en una terraza aluvial donde las condiciones geomecánicas del material no son las adecuadas para soportar la carga del ducto. Este margen fluvial del estero Viche no presenta muros de contención que impidan la rápida aceleración de la erosión por dinámica fluvial, la cual ha incidido en el asentamiento o subsidencia del terreno desplazando al ducto en sentido vertical.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.17 Extracto de la carta topográfica Viche a escala 1:50.000¹⁰⁶

¹⁰⁶ Proporciona información relevante al sentido del ducto y la nueva variante posible.

Conclusiones previas y recomendaciones técnicas

Con referencia en los datos geológicos obtenidos en el terreno, la tasa de desplazamiento vertical y la subsidencia continuarán hasta alcanzar el punto de ruptura o colapso del ducto. En este punto de muestreo, el estero Viche ha incrementado el ancho del caudal fluvial por lo que no es recomendable, en esta situación, realizar obras civiles de remediación.

Con todos los antecedentes citados, se recomienda optar por una de las dos variantes propuestas:

- Variante 1: desplazar el ducto 50 m al este, como se indica en la Figura 10.18.
- Variante 2: continuar el trazado por el tramo del OCP y conectar nuevamente en la estación PK-48.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.18 Paisaje geomorfológico del terreno¹⁰⁷

10.2.6.2. Sitios inestables SI-2 a SI-8 identificados en el sector “Loma de Caple”

Aspectos geomecánicos de la deformación del terreno

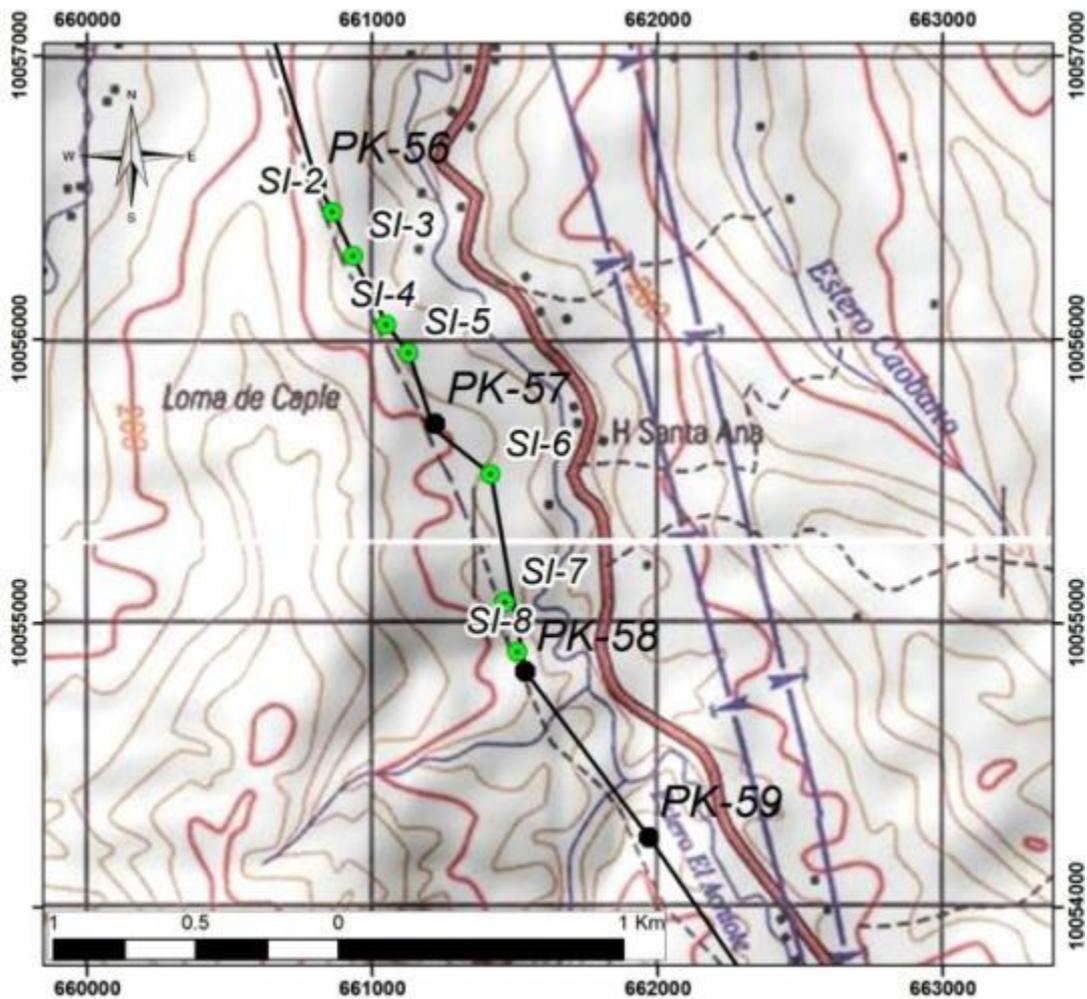
Para el sector Loma de Caple, ubicado a 1,8 km al norte del Recinto “El Vergel”, entre las estaciones PK-56 y PK-58, se identificaron 7 sitios inestables de características geomorfológicas similares.

En este sector de “Loma de Caple”, el ducto se encuentra asentado en estratos rocosos de limolitas y areniscas correspondientes a la formación geológica Borbon. Geomorfológicamente, el relieve es caracterizado por colinas de pendiente suave, entre los 10 y 30 grados de inclinación en sus laderas, y en cuyas zonas bajas de hondonadas y cursos de esteros se han desarrollado activos escarpes de deslizamientos.

¹⁰⁷ Indicando la extensión de la zona de subsidencia y la propuesta para la nueva variante del ducto.



Para el sitio inestable SI-2 se evidencia un escarpe activo de deslizamiento que está cortando el DDV. Este escarpe tiene dos comportamientos diferentes en referencia a la tendencia del ducto. El escarpe que se desarrolló en sentido paralelo al ducto tiene desprendimientos laterales que dejaron el ducto al descubierto. La tendencia de este deslizamiento no podría ocasionar daños severos, no obstante, el daño lo puede provocar el escarpe de deslizamiento con sentido perpendicular al ducto; la carga del material desplazado puede provocar un colapso de la infraestructura.



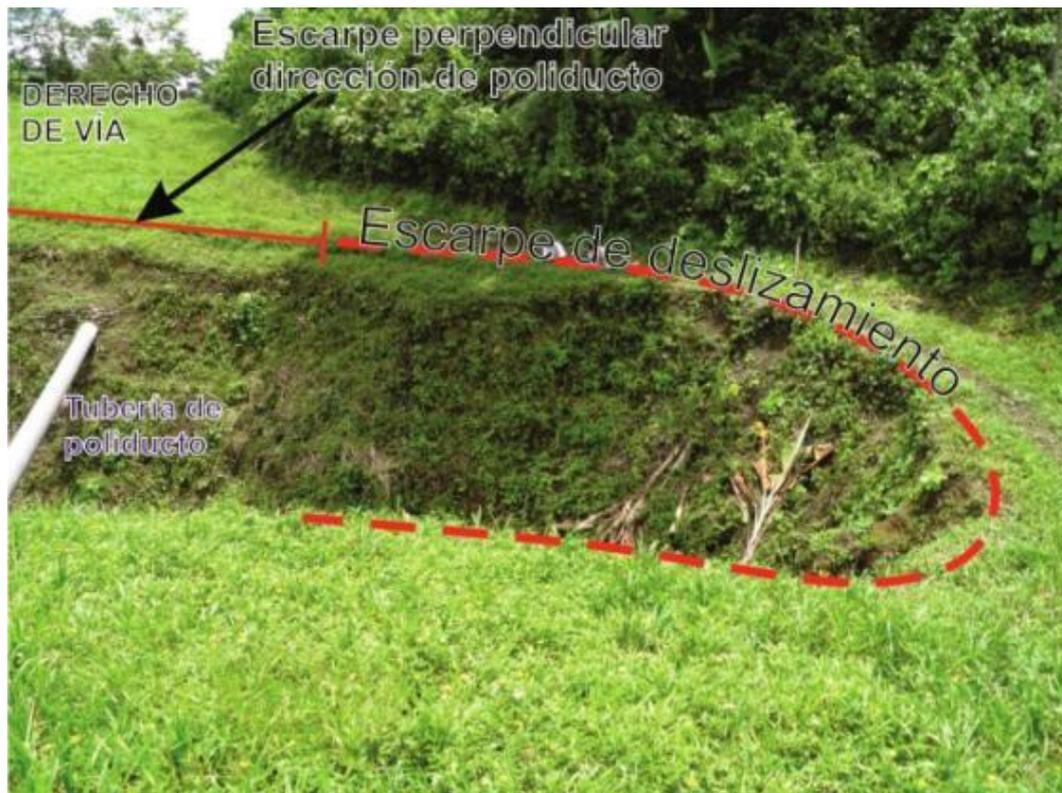
Fuente: EPPETROECUADOR.

Figura 10.19 Extractos de las cartas topográficas Mirador y Viche a escalas 1:50.000¹⁰⁸

¹⁰⁸ Proporciona información relevante al sentido del ducto.

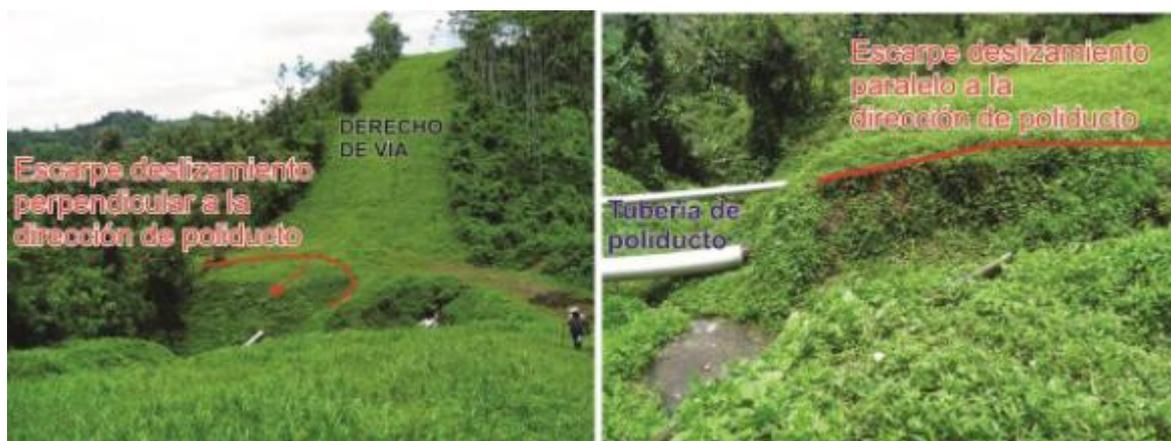
En el sitio inestable SI-3 se evidencia un escarpe activo de deslizamiento con características similares al descrito para el SI-2. Asimismo, el comportamiento geomecánico de los escarpes de deslizamientos tiene tendencias diferentes en referencia a la posición del ducto.

En la Figura 10.20 se puede observar que la ladera no tiene canales de captación de agua, provocando también denudación de la delgada cobertura vegetal. Las aguas de escorrentías actúan sobre los bordes de los escarpes desprendiendo el material rocoso e incrementado la dimensión del deslizamiento.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.20 Escarpe activo de deslizamiento en el sitio inestable SI-2



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.21 Escarpe activo de deslizamiento en el sitio inestable SI-3



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.22 Escarpe activo de deslizamiento en el sitio inestable SI-4

En el sitio inestable SI-4 se evidencia un escarpe activo de deslizamiento con características similares al descrito para los sitios SI-2 y SI-3. En este sitio hay evidencia de formación de humedales por represamiento de aguas de escorrentías, las cuales son indicios de escarpes potenciales de deslizamientos de plano profundo de tipo rotacional. No hay sistemas de canales en la zona de ladera.

En el sitio inestable SI-5 se evidencia la formación de escarpes potenciales de deslizamientos y humedales. Desde el punto de vista del análisis del riesgo geológico, considerando las condiciones climáticas actuales y la ausencia de canales captadores de agua, los escarpes pueden alcanzar el nivel considerable para socavar el terreno en un corto periodo de tiempo.

En el sitio inestable SI-6 se presenta una serie de escarpes desarrollados que ocasionó la reducción del acceso del DDV. Considerando los escarpes con tendencias de movimientos perpendiculares al ducto, se presenta la formación de un humedal (como se indica en la Figura 10.23), la cual puede acelerar la tasa de velocidad del deslizamiento.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.23 Denudación de la cobertura vegetal y formación de potenciales escarpes de deslizamientos para el sitio inestable SI-5

En el sitio inestable SI-7 también se evidencia un escarpe activo de deslizamiento con características similares a los descritos en este sector de Loma de Caple. En este sitio aún no se han formado humedales, no obstante, por la falta de canales captadores de las aguas de escorrentía, puede incrementarse la tasa de velocidad de los escarpes de deslizamientos con movimiento perpendicular al ducto, siendo éstos los más significativos de daño a la infraestructura.



Durante la compilación de datos geológicos y geomorfológicos del sitio inestable SI-8 se presentó una intensa lluvia que permitió observar la ausencia de sistemas de canales captadores. En la Figura 10.24 se observan los efectos de daños en el terreno causados por la alta precipitación de la zona de estudio.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.24 Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-6



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.25 Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-7



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.26 Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-8

Conclusiones previas y recomendaciones técnicas

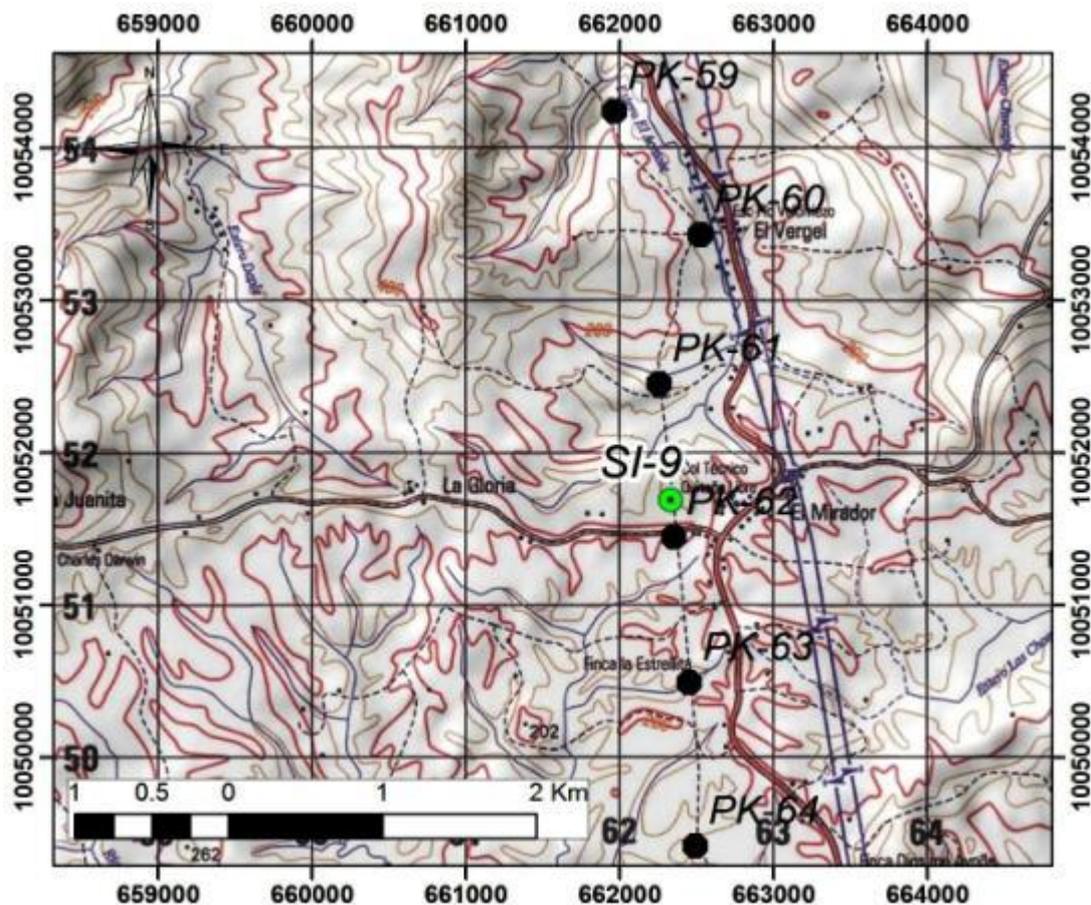
En las estaciones de sitios inestables SI-2 a SI-8 se evidenciaron escarpes de deslizamientos y zonas de humedales. Se debe prestar particular atención a los escarpes con movimiento perpendicular al ducto, ya que pueden causar daño directo y colapso de la infraestructura.

En todo este tramo del DDV no se desarrollaron canales captadores de agua de escorrentía, por lo que es recomendable realizar un sistema que canalice los aportes de precipitaciones directamente a los esteros y ríos.

10.2.6.3. Sitio inestable SI-9 identificado en el sector “El Mirador”

Aspectos geomecánicos de la deformación del terreno

El sitio inestable SI-9 se encuentra a 240 m de distancia de la estación PK-62 (ver la Figura 10.27). En este sector de “El Mirador”, el ducto se encuentra asentado en estratos rocosos de limolitas y areniscas, correspondientes a la formación geológica Borbon (ver el mapa geológico de la Figura 10.16). Geomorfológicamente, el relieve se caracteriza por colinas de pendiente suave, entre 8 y 28 grados de inclinación. En sus laderas, en las zonas bajas de hondonadas y cursos de esteros, se desarrollaron, escarpes activos de deslizamientos en posición lateral a la ladera, los que están cortando el acceso del DDV.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.27 Extracto de la carta topográfica Mirador a escala 1:50.000¹⁰⁹

En el terreno se evidencian planos lístricos (escarpes principales semicirculares en planta, donde se desplazó el estrato rocoso) de tres deslizamientos rotacionales. La dirección de desplazamiento se localiza en la parte lateral del DDV. No se evidencian deslizamientos perpendiculares al ducto (como los descritos en las estaciones SI-2 a SI-9), sin embargo, y debido a la ausencia de canales captadores de agua, se pueden formar humedales (hondonadas en zona de terraza) y posteriormente escarpes de deslizamientos.

Conclusiones previas y recomendaciones técnicas

A los costados del acceso del DDV se forman deslizamientos rotacionales. Para evitar el continuo desarrollo de los escarpes se recomienda realizar un sistema que canalice los aportes de precipitaciones directamente a los esteros y ríos.

¹⁰⁹ Con información relevante al sentido del ducto.



Fuente: EP PETROECUADOR.

Figura 10.28 Escarpes activos de deslizamientos en el sitio inestable SI-9

Con base en este estudio, posteriormente se implementaron varios sistemas de remediación para controlar y minimizar los fenómenos geológicos (geoamenazas) descritos anteriormente en éstos y otros sitios inestables del ducto referido.



10.3. Instrumentación y monitoreo de soluciones de ingeniería para reptación de masas coluviales en Serra Do Mar, Brasil

10.3.1. Resumen ejecutivo

Los ductos ORBIG y OLAPA de TRANSPETRO, ubicados sobre la Serra do Mar, cadena montañosa localizada en el Sureste de Brasil, en los estados de Río de Janeiro y Paraná, atraviesan suelos de origen coluvial. Estas masas de suelo presentan movimientos asociados a lluvias intensas y han ocasionado la rotura de los ductos.

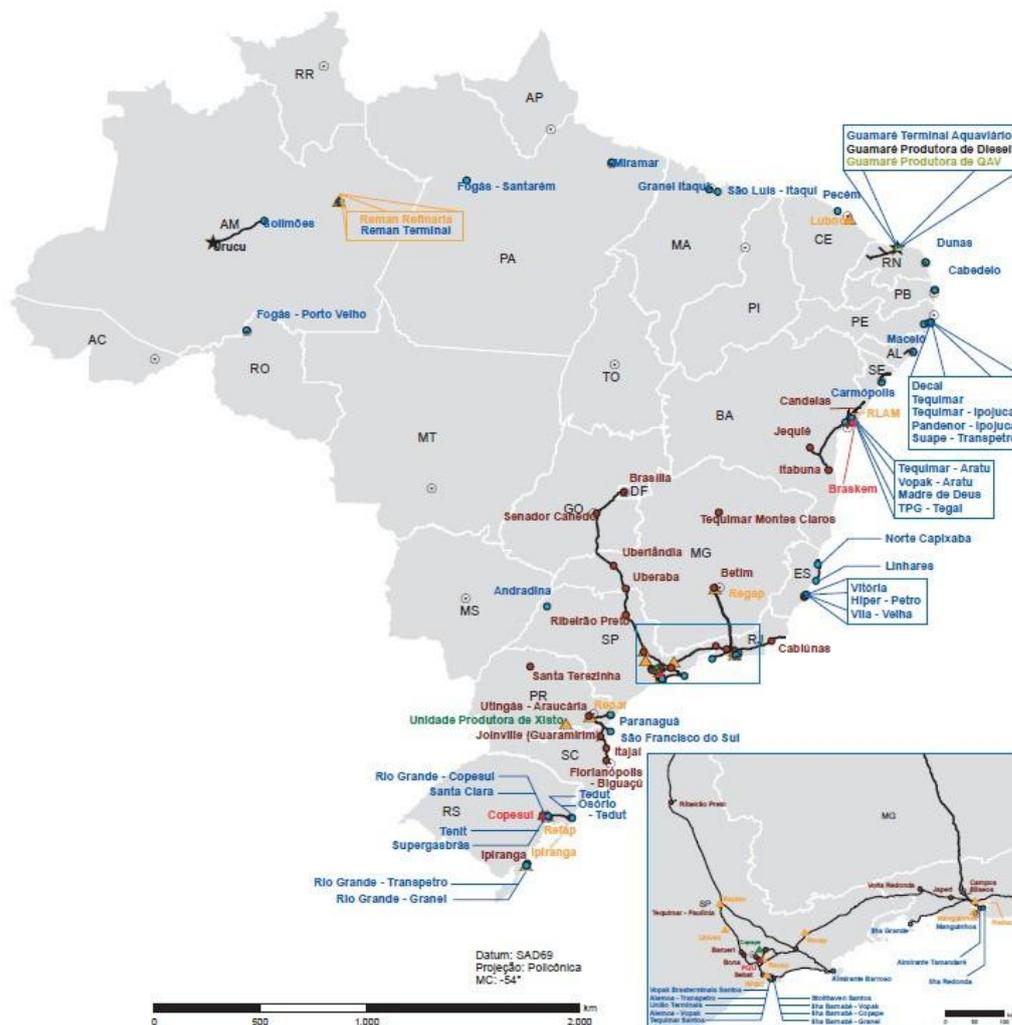
El caso de estudio presenta situaciones en las cuales se pudieron medir los desplazamientos asociados a aumentos del nivel freático con motivo de la ocurrencia de lluvias de gran intensidad, con la instalación de inclinómetros y piezómetros.

En el caso presentado en el Km 57+200 del ducto OLAPA se detalla cómo se pudo ajustar la construcción de la solución de estabilización geotécnica (drenes profundos) mediante la verificación de los abatimientos del nivel freático sensados por los piezómetros, y fue posible establecer físicamente la relación entre las lluvias intensas y los movimientos del terreno y del ducto.

10.3.2. Introducción

Según la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles de Brasil (ANP), la infraestructura nacional de transporte de hidrocarburos y sus derivados consta de 547 ductos, con una longitud total de 17.000 kilómetros, diseñados para el transporte y distribución de petróleo, derivados, gas natural y otros productos.

En la Figura 10.29 se muestra la distribución de ductos en Brasil, en donde se observa una concentración en las regiones sur y sureste del país. Este trabajo se enfoca en dos ductos: ORBIG y OLAPA, ambos en Serra do Mar.



Fuente: Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP), Brasil.

Figura 10.29 Distribución geográfica de ductos en Brasil

Los ductos ORBIG y OLAPA están enterrados a una profundidad de aproximadamente 3 m, siguiendo la elevación del terreno en largos tramos y en laderas con masas coluviales inestables.

El movimiento del coluvión no solo afecta el alineamiento, sino también genera tensiones internas en el ducto, que pueden deberse a su ubicación relativa en forma paralela o transversal al movimiento del coluvión.

10.3.3. GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA DE SERRA DO MAR

La costa sureste de Brasil presenta una cadena montañosa casi continua que pasa por los estados de Río Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Sao Paulo, Río de Janeiro y Espírito Santo, a lo largo de unos 1500 km, como se indica en la Figura 10.30. En esa zona, la población alcanza su mayor densidad y es una de las áreas más importantes del país desde el punto de vista económico. La mayor elevación de esta cadena montañosa es de más de 2000 m, y la distancia desde la cima de las montañas hasta el mar varía de 1 a 40 km aproximadamente.



Esta cadena se compone esencialmente de rocas graníticas y gnéissicas precámbricas, y forma parte del escudo atlántico. También hay muchas intrusiones de rocas básicas, en forma de diques o láminas. Los flancos orientales de las montañas presentan mantos de suelos residuales profundos que alcanzan hasta 100 metros debido al clima cálido y húmedo. Los complejos patrones de aguas subterráneas, sumados a la humedad de la superficie del suelo a lo largo de taludes escarpados cerca de las cimas de las montañas, provocan innumerables deslizamientos del suelo residual. Los depósitos de estos deslizamientos a lo largo de los taludes consisten en una acumulación de bloques de suelo y gruesa acumulación de bloques de roca. Se han realizado mediciones de espesores del suelo coluvial que rellena depresiones del terreno original a lo largo de carreteras, con profundidades de 30 metros o más.

En los estados del sur también son frecuentes los taludes en coluvión de flujos de lava basáltica, de los cuales se muestran algunos ejemplos a continuación.

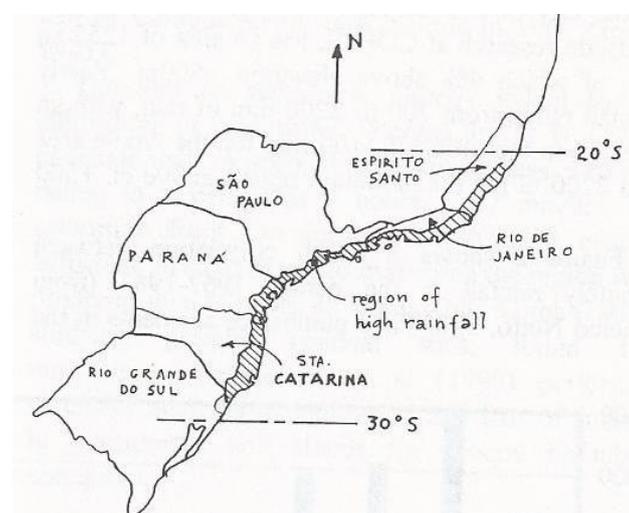


Figura 10.30 Ubicación de Serra Do Mar, al sur de Brasil

Durante la temporada de lluvias, de enero a marzo, ocurren numerosos deslizamientos principalmente por las lluvias intensas, precedidas o no por precipitaciones¹¹⁰. Sin embargo, una semana o más después de la finalización de la temporada de lluvias, ocurre un pequeño número de deslizamientos causados por ciclos de humedecimiento y secado.

Desde 1974, la COPPE (Universidad Federal de Río de Janeiro) estudia el mecanismo de estos tipos de deslizamientos y su interacción con las precipitaciones; adicionalmente se realizan estudios sobre los efectos de las medidas de estabilización, tales como los drenajes horizontales profundos.

Lacerda, W. A.¹¹¹ describe los mecanismos para la reactivación de movimientos de las laderas en suelos coluviales, tales como: reactivación debido a la elevación del nivel freático, aumento de las tasas de deformación de movimientos lentos tipo reptación (creep), reactivación debido a presiones de poros artesianas, infiltración de aguas de escorrentía directamente en el talud, manantiales ocultos, excavación en el perímetro del pie del talud coluvial e influencia de diques ígneos.

¹¹⁰ Lacerda, W. A. (1997) *Stability of Natural Slopes Along the Tropical Coast of Brazil*. En: *Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, Balkema, Rio de Janeiro, págs. 17-40.

¹¹¹ Lacerda, W. A. (1997) *Stability of Natural Slopes Along the Tropical Coast of Brazil*. En: *Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, Balkema, Rio de Janeiro, págs. 17-40.



El tipo de movimientos de masa que puede afectar a las obras de ingeniería es producto de la reactivación de viejos deslizamientos, lo que se traduce en el movimiento lento de suaves pendientes coluviales con una inclinación natural de 15 a 20 grados. Esta reactivación es estacional y depende de la distribución de las lluvias durante el año, que influye en el aumento y la disminución del nivel freático en la masa coluvial. Son difíciles de detectar sin la debida instrumentación, porque muy a menudo los ingenieros geotécnicos confunden las masas coluviales superficiales con "suelos residuales maduros", que presentan un comportamiento muy similar. Son muy parecidos, porque han desaparecido todos los remanentes de la roca original y ambos sufrieron meteorización. Sin embargo, este coluvión laterítico tiene solo 3 a 5 metros de espesor, y por debajo de esta cubierta sigue subyaciendo el coluvión, mientras que en el caso de un suelo residual maduro en general hay saprolito subyacente así como los demás horizontes del perfil de meteorización de la roca. De hecho, solo el uso de inclinómetros puede revelar el verdadero espesor de la masa en movimiento y el del coluvión.

El ducto ORBIG está instalado en la Serra do Mar, en el estado de Río de Janeiro. El lecho de roca de la ladera es gneis. En la superficie del terreno hay un gran número de bloques de roca, algunos de alrededor de 18 m de diámetro sobre suelo coluvial. El suelo coluvial es arena fina limosa, muy micácea. El agua subterránea está relativamente cerca de la superficie.

El ducto OLAPA está instalado en la cadena montañosa de la Serra do Mar, en el estado de Paraná, donde predominan gneises y granitos con diversos grados de resistencia a la meteorización, atravesada por sistemas de fallas y fracturas regionales que cortan las formaciones y crean un perfil de alteración caracterizado por una capa de saprolito bajo gruesos depósitos de suelo transportado.

10.3.4. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE ORBIG

El ducto ORBIG fue construido en Serra do Mar, estado de Río de Janeiro, en 1976, y los datos proporcionados por la instrumentación del km 48+300 al km 48+500 revelaron movimientos de hasta 4 metros para el año 2000, cuando se comenzaron las obras de relocalización del ducto.

En este tramo, el ducto ORBIG de TRANSPETRO se encuentra cerca de la ciudad de Itacuruçá, a unos 70 km de Río de Janeiro. El ducto está enterrado unos 3 metros bajo la superficie y cruza un coluvión. Las mediciones con inclinómetros y localizador de ductos identificaron dos lengüetas coluviales, como se muestra en la Figura 10.31, en la que se pueden identificar los límites inferidos del movimiento. En 20 años, el ducto se ha desplazado cuesta abajo unos 4 metros formando un arco en ambos lugares. En la misma figura también se puede observar la localización de piezómetros e inclinómetros.

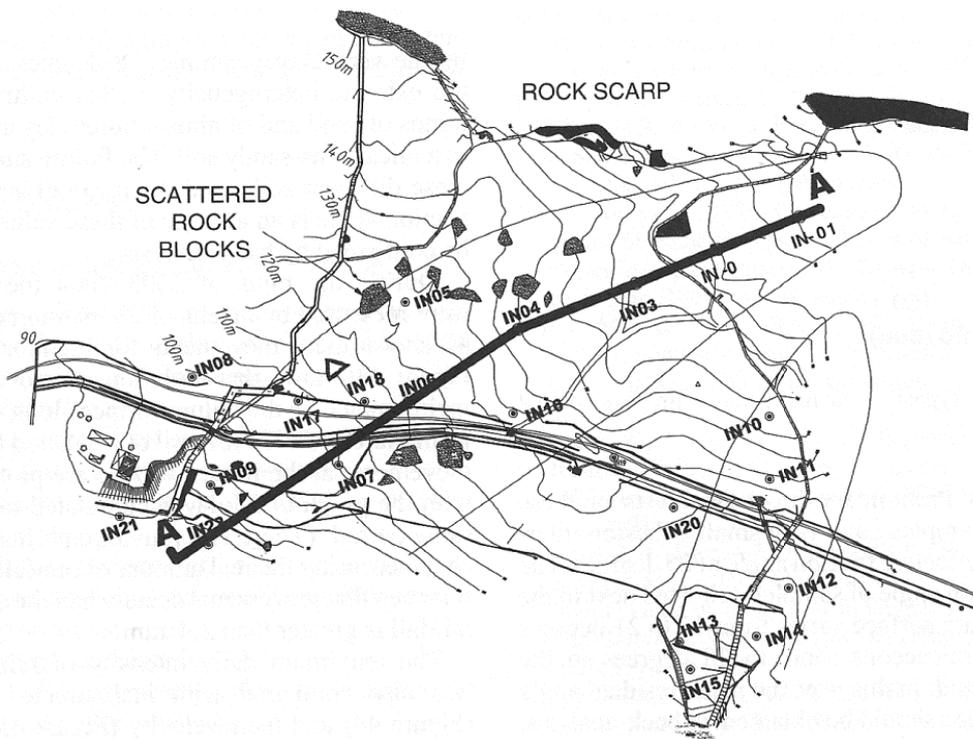


Figura 10.31 Plano del talud de Itacuruçá

La Figura 10.32 muestra la sección del coluvión principal y las lecturas inclinométricas más recientes (desde 2000). En ella se logra identificar una superficie de deslizamiento en el contacto entre el coluvión y el sustrato rocoso. La roca base es gnéssica. Durante los sondeos en la parte superior del talud (IN-5 e IN-20) se encontraron diques de diabasa encapsulados. Un gran número de bloques de roca, algunos de ellos de unos 10 metros de diámetro quedan en la superficie y también en medio del suelo coluvial. Estos bloques de rocas y peñascos son producto de la desintegración del escarpe de la roca (casi vertical, con una altura de unos 50 metros).

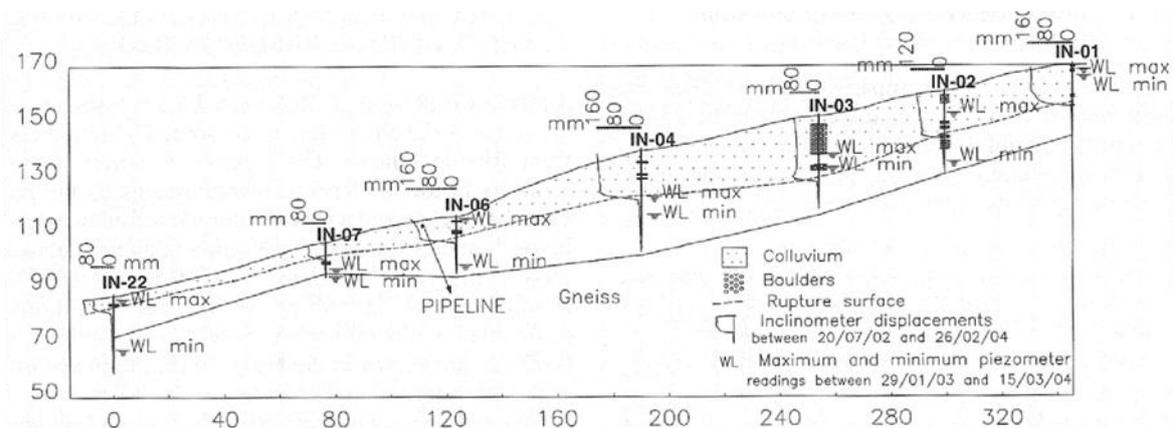


Figura 10.32 Sección A-A' del talud de Itacuruçá (dimensiones en metros)

Durante las lluvias de 2003-2004 se midieron los movimientos utilizando 28 inclinómetros. La Figura 10.33 muestra estos movimientos para el inclinómetro IN-04. La Figura 10.34 muestra el comportamiento de los movimientos de siete inclinómetros en la superficie de la falla a lo largo de la

sección A-A' desde marzo de 2003 hasta abril de 2004. Un pluviógrafo instalado en el sitio con el que se midió la cantidad real de precipitaciones, permitió realizar un gráfico en donde se pueden comparar las precipitaciones acumuladas de 25 días con los movimientos en la superficie de la falla. Se observan movimientos que ocurren cuando las precipitaciones acumuladas son superiores a 250 mm.

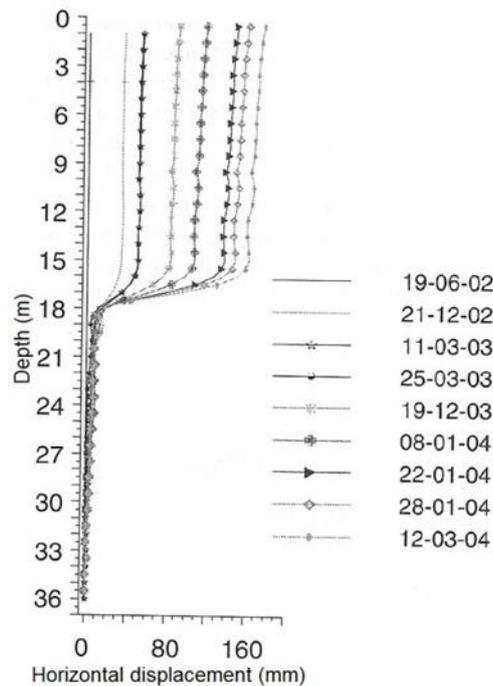


Figura 10.33 Gráfico típico de inclinómetro: IN-04

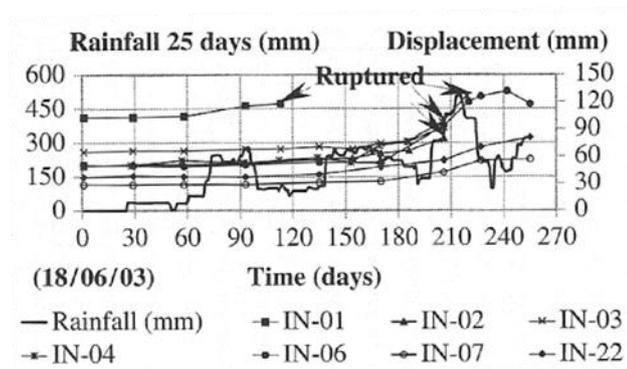


Figura 10.34 Movimientos de 7 inclinómetros a lo largo de la sección A-A'

También se comparó la intensidad máxima diaria de precipitaciones, en mm/h, con los movimientos del inclinómetro (Figura 10.35) y su velocidad (Figura 10.36).

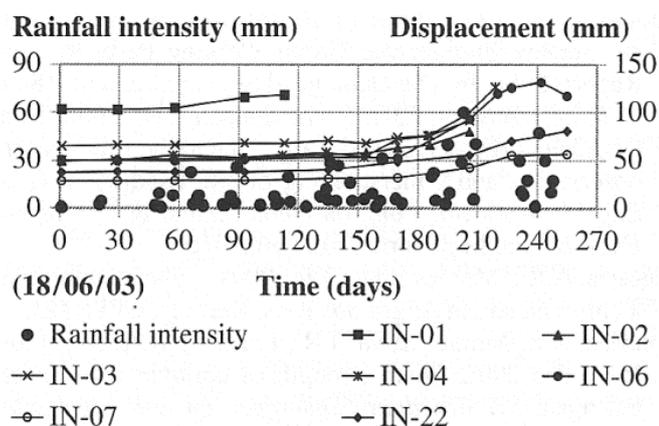


Figura 10.35 Intensidad de la lluvia y movimientos de inclinómetros en relación con el tiempo a lo largo de la sección A-A'

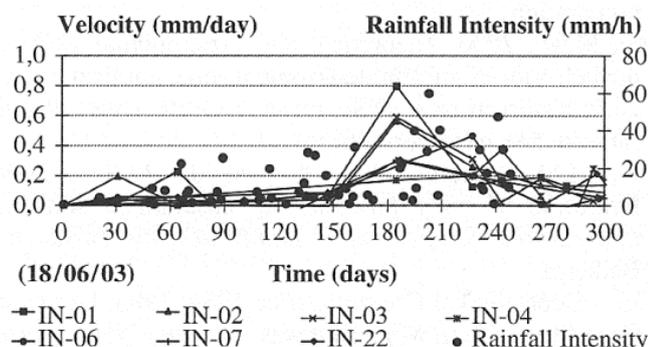


Figura 10.36 Velocidad de movimiento e intensidad de la lluvia en relación con el tiempo

Es posible determinar que el movimiento se aceleró en enero de 2004, momento en que se dio un pico de velocidades e intensidad de lluvia que alcanzó 60 mm/h, un valor de umbral de lluvias muy fuertes para Río de Janeiro. Asimismo, ha sido posible comprobar que cuando la intensidad de la lluvia es inferior a 30 mm/h los movimientos no son perceptibles.

Como resultado de los movimientos observados se han realizado varias obras en el sitio a lo largo del tiempo, tales como drenajes sub-horizontales profundos (DHP) en diferentes puntos de la ladera, construcción de canaletas para el escurrimiento de agua superficial desde el acantilado rocoso, construcción de muros de anclaje, etc.

10.3.5. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE OLAPA

El ducto OLAPA comenzó a operar en 1977. Tiene una longitud de 94 km y está instalado entre el km 45 y el km 63 en Serra do Mar, en el estado de Paraná. OLAPA conecta la refinería REPAR con la terminal de la hidrovía (TEPAR).

En marzo de 1999 se determinó que había reptación en la ladera de la colina, en el km 57+200 del ducto. La presencia de grietas longitudinales y transversales cerca del tramo del ducto fue la indicación de los límites aproximados de la masa en movimiento.

Se implementó un programa de investigación geotécnica para dar apoyo a los estudios de estabilización de la ladera. Se realizaron perforaciones para el reconocimiento del subsuelo y la instalación de la instrumentación, que comprendió piezómetros. Los datos obtenidos fueron analizados por Suzuki, S. (2004).

Además, para la estabilización de la ladera se realizaron trabajos de drenaje superficial mediante cunetas y de instalación de drenajes sub-horizontales profundos (DHP).

En mayo de 2000 se instalaron inclinómetros. Las primeras lecturas que indicaron los movimientos de la ladera fueron tomadas en octubre de 2000. El trabajo de estabilización de la ladera aún no había concluido cuando en febrero de 2001, tras un período de fuertes lluvias, el movimiento de la misma se aceleró, provocando tensiones adicionales sobre el ducto, con la consecuente falla.

En la Figura 10.37 se muestra el plano topográfico de la ladera, identificando el tramo y el eje del ducto, el sistema de drenaje y la posición de la instrumentación (piezómetros e inclinómetros).

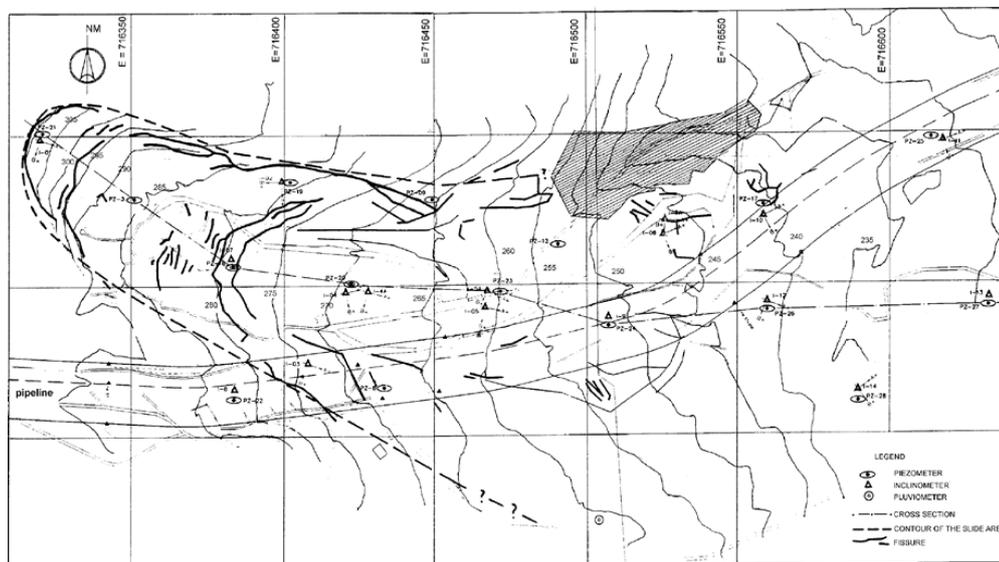


Figura 10.37 Mapa topográfico de OLAPA

El sistema de drenaje, que consiste en drenes sub-horizontales profundos, fue instalado en ocho series para un total de 56 drenajes. Como resultado de los caudales evacuados desde los drenajes y su relación con las lecturas de los piezómetros se fue mejorando el diseño con la instalación de nuevos drenajes para abatir los niveles piezométricos remanentes.

Las precipitaciones en la zona son las típicas de las regiones tropicales, con lluvias intensas en los meses de verano (diciembre a marzo).



En la Figura 10.38 se muestra una sección de la ladera. En el gráfico se presentan el NSPT, las grietas, la posición relativa del ducto y la probable superficie del deslizamiento. La superficie del deslizamiento fue estimada sobre la base de los perfiles de desplazamiento de los inclinómetros, en la posición de las grietas y en el valor NSPT, que disminuye en la superficie probable de deslizamiento.

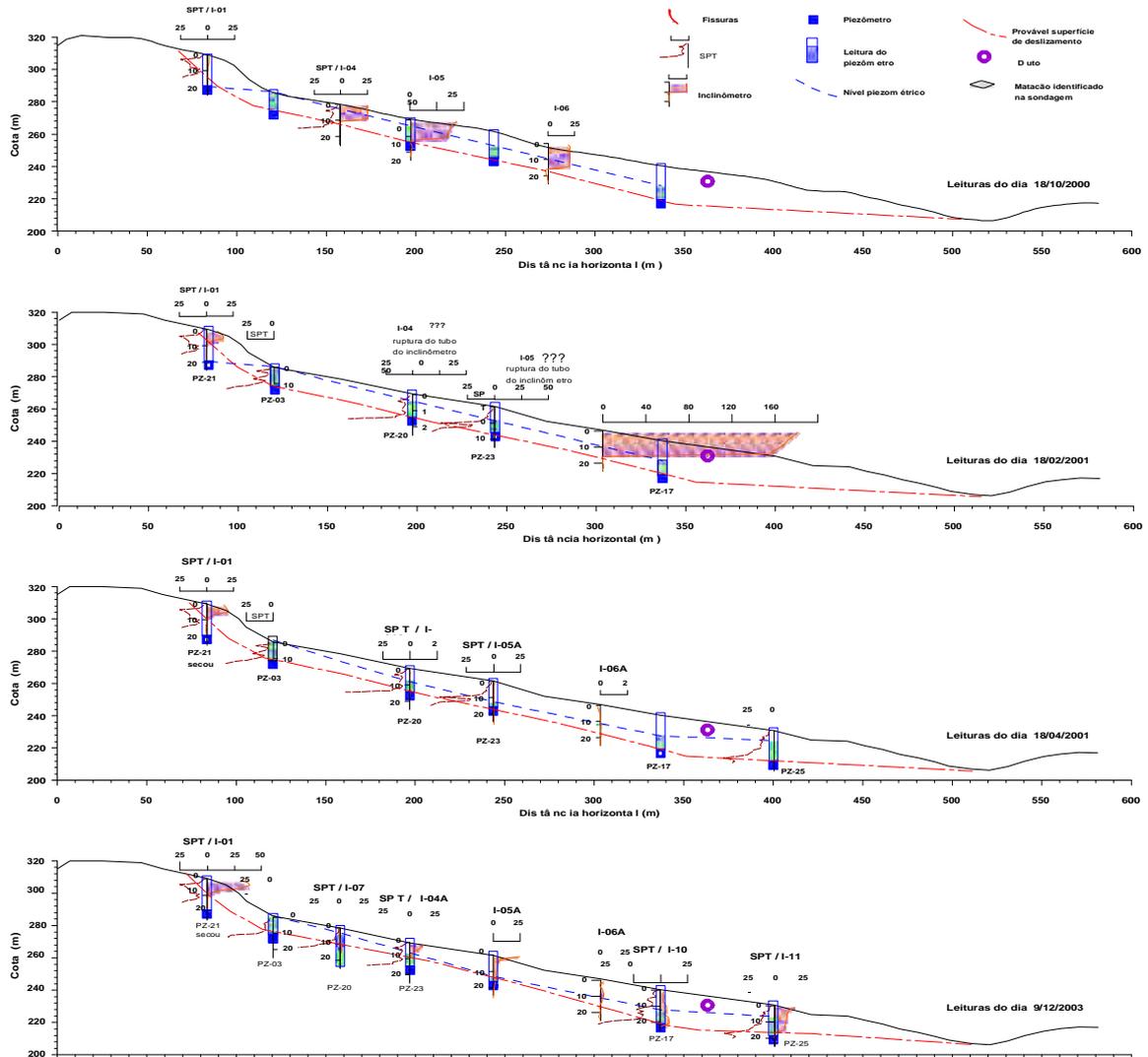


Figura 10.38 Sección A-A' del talud de OLAPA

La Figura 10.38 ilustra dos situaciones:

- Antes de la rotura del ducto (18/10/2000): nivel piezométrico (PZ-21, PZ-03, PZD-20 A y PZ-17) y la primera lectura de los inclinómetros I-01, I-04, I-05 e I-06.
- Después de la rotura del ducto (18/02/2001): niveles piezométricos (ídem anterior) y segunda lectura de los inclinómetros I-01 e I-06.



El 18 de octubre de 2000, el nivel piezométrico estaba cerca de la superficie del suelo en PZ-03 y 13 m por debajo de la superficie del suelo en PZ-17. Los inclinómetros I-04, I-05 e I-06 mostraron movimiento en este tramo de la ladera de la colina. El inclinómetro I-01, en la parte superior de la ladera, no mostró desplazamientos significativos.

Después de la rotura del ducto el 18 de febrero de 2001, el nivel piezométrico alcanzó un promedio de 0,50 m por encima del registrado el 18 de octubre de 2000. Sin embargo, los desplazamientos que provocaron la ruptura del ducto, no fueron registrados en los inclinómetros I-04 e I-05, ya que estos también experimentaron fallas. El inclinómetro I-06 registró los desplazamientos, pero sufrió deformaciones excesivas (más de 200 mm) y fue sustituido en marzo de 2001 por el I-06 A.

El 2 de marzo de 2001 se instalaron los drenajes sub-horizontales profundos (DHP). El piezómetro PZ-21 no tenía lecturas registradas el 27 de marzo de 2001, por lo que la superficie de un deslizamiento cercano al inclinómetro I-01 está por encima del nivel piezométrico. Los desplazamientos en esta zona pueden estar asociados a la reducción en la succión relacionada con la lluvia y no con la generación de presión de poros.

En la Figura 10.39 se presentan los perfiles de desplazamiento de los inclinómetros I-06 e I-06A. El 10 de octubre de 2000, el I-06 registró un desplazamiento de 20 mm en la dirección A y 10 mm en la dirección B a 15,5 m de profundidad. Cuatro meses más tarde, el 18 de febrero de 2001 (después de la ruptura del ducto), el desplazamiento era de 180 mm en la dirección A (Figura 10.39a) y 76 mm en la dirección B (Figura 10.39b). Fue necesario reemplazar el inclinómetro I-06, dado que alcanzó su límite de deformación.

Con la instalación de los drenajes sub-horizontales profundos, la ladera fue estabilizada en marzo de 2001. El efecto de esta medida puede verse en la primera lectura de I-06A el 5 de marzo de 2001, que no mostró desplazamiento considerable. Tampoco lo hicieron las lecturas efectuadas durante los tres años posteriores (Figura 10.39).

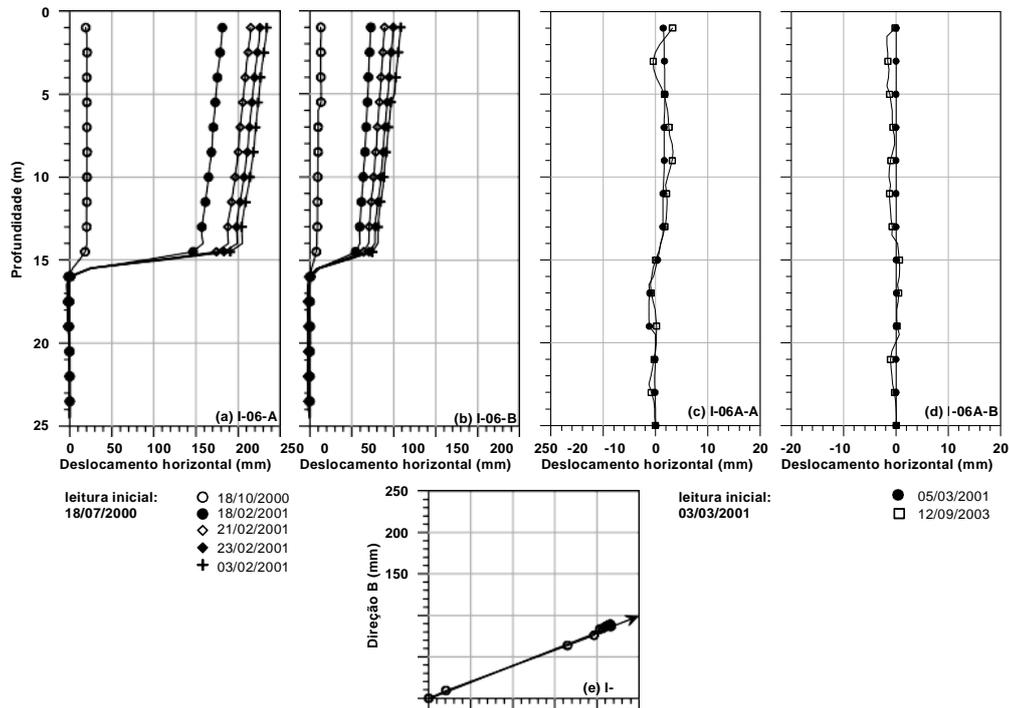


Figura 10.39 Mediciones de los inclinómetros I-06 e I-06

Todos los datos de instrumentación se correlacionaron: el desplazamiento horizontal en las direcciones A y B de cada inclinómetro y su correspondiente velocidad, las mediciones del piezómetro instalado cerca de cada inclinómetro, la precipitación acumulada durante 25 días y el flujo promedio de los drenajes.

En la Figura 10.40 se muestran las correlaciones entre las lecturas del inclinómetro I-02, ubicado en la parte superior de la ladera, y el piezómetro PZ-19. Después de instalar el sistema de drenaje, no se registró un aumento significativo de los desplazamientos. Los picos en el gráfico de precipitaciones acumuladas, indicados por i e ii en la Figura 10.40, tienen valores correspondientes tanto en el gráfico del caudal promedio de los drenajes como en el gráfico de elevación piezométrica. El pico indicado por iii es mayor que ii en el gráfico de precipitaciones acumuladas, pero no en la misma proporción en el gráfico de elevación piezométrica. Esto se debe probablemente al sistema de drenaje instalado en la ladera.

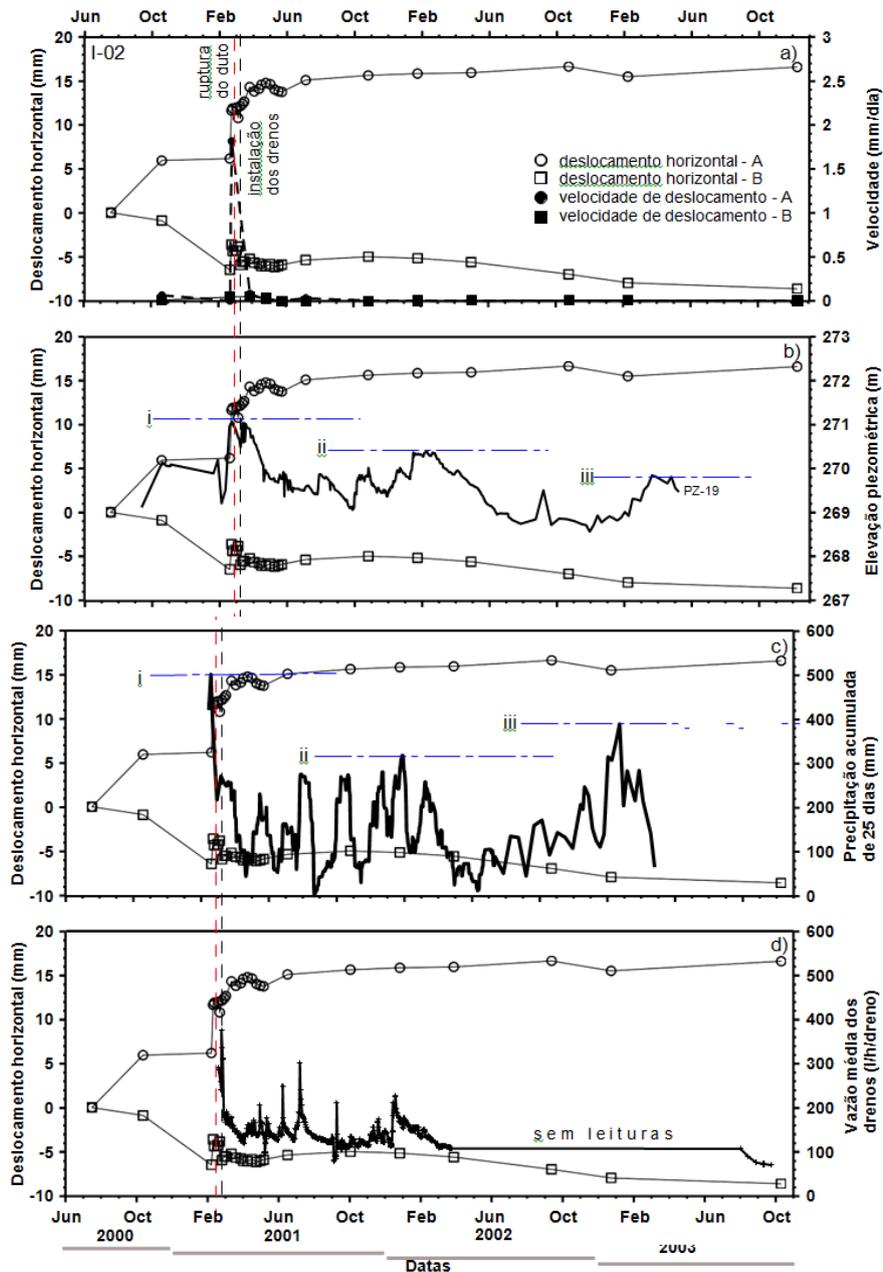


Figura 10.40 Correlación entre el inclinómetro I-02, el piezómetro PZ-19, la precipitación acumulada durante 25 días y la velocidad de drenaje de flujo

10.3.6. CONCLUSIONES

Éste resumen del artículo IPG2013-1949 se centró en la reptación de masas coluviales inestables en dos puntos de interés geotécnico de líneas de transporte por ductos. Localizados en la Serra do mar, la cordillera de la costa, en donde el clima de los estados brasileños es típicamente tropical. Los suelos en esta región se denominan suelos tropicales.

Cuando los ductos cruzan estas masas coluviales sufren deformaciones inducidas por el movimiento del talud. En los dos casos presentados aquí, el ducto cruza la masa inestable en forma oblicua.



La resistencia al corte de los suelos sobre la superficie del deslizamiento es la resistencia residual. Sin embargo, los valores de resistencia residual no son bajos (ORBIG - 19° y OLAPA - 21°), aun cuando se trata de suelos finos. Esta es una característica de las arcillas lateríticas. El gradiente de los taludes es bajo (ORBIG - 16° y OLAPA - 13°). El movimiento es causado por el aumento del nivel freático. Debido a las condiciones del talud y el suelo, el movimiento se produce cuando el aumento del agua subterránea es más de la mitad del espesor inestable.

Dado que el agente desestabilizante es el agua subterránea, la experiencia obtenida en ambos casos de estudio indica que es posible estabilizar las masas coluviales inestables mediante drenaje horizontal profundo. Es importante destacar que un programa de instrumentación bien preparado es esencial para este tipo de movimientos del terreno. De este modo será posible correlacionar las precipitaciones, el desplazamiento y la piezometría para verificar la estabilidad del talud y evaluar el rendimiento del sistema de estabilización, como en los casos de Orbig y Olapa.

10.3.7. RECONOCIMIENTOS

Corresponde brindar un especial reconocimiento al Consejo Nacional de Investigación (CNPq) y a la fundación CAPES por las becas concedidas a los investigadores, y al proyecto CT-Petro, que resultó esencial para la obtención de datos de campo. También cabe mencionar un reconocimiento a Petrobras/CENPES por la colaboración con la investigación de deslizamientos en COPPE.



10.4. PK 258+950 de OCENSA - monitoreo por lluvias

10.4.1. Resumen ejecutivo

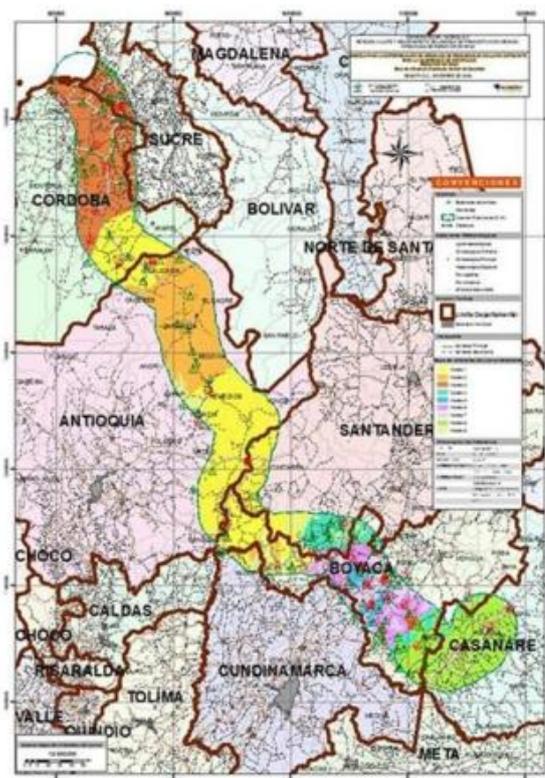
El sistema del Oleoducto Central (OCENSA) de 30" y 36" de diámetro, fue construido en el año 1997 para el transporte de crudo desde el piedemonte llanero en el oriente colombiano hasta la costa atlántica, atravesando a lo largo de sus 830 Km de longitud la cordillera oriental y las estribaciones de la cordillera central de Colombia, lo que constituye un reto para garantizar la integridad del oleoducto ante eventos naturales.

Como parte del Programa de Mantenimiento del Oleoducto, OCENSA ha implementado un sistema de gestión de integridad, desarrollando una serie de acciones planeadas, para prevenir posibles daños en la integridad del ducto, con base en un análisis de riesgos. Entre las actividades planeadas se destacan recorridos aéreos y terrestres, estudios especializados, monitoreo topográfico y geotécnico, entre otros. Se ha implementado el monitoreo de agentes detonantes que generen deslizamiento como las lluvias y los sismos, y se han estimado umbrales de alarma por medios estadísticos.

En el caso de estudio se observa la metodología empleada para realizar la zonificación climática, y la relación entre lluvias antecedentes e inmediatas en la generación de deslizamientos en el corredor del oleoducto. Al final se detalla un caso en el que fue posible detectar acertadamente un deslizamiento detonado por lluvias en el PK 258+950 del oleoducto.

10.4.2. Caso de estudio

Desde el año 2011, OCENSA en convenio con el IDEAM, Institución Estatal para Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, desarrolla el proyecto de umbrales de lluvia. El cual como primera etapa establece una zonificación climática usando la metodología de *Holdridge*, que clasifica la tipología del clima de acuerdo con la precipitación y la temperatura. Se utilizó en el proyecto la información proveniente de las estaciones meteorológicas pertenecientes al IDEAM a las cuales se les realizó un análisis para determinar sus regímenes climáticos con el fin de poder determinar su agrupación para estudio y luego mediante su asociación con los deslizamientos, se determinó su radio de representatividad; posteriormente, se efectuó una revisión de la zonificación con las zonas geológicas para la elaboración del mapa de zonificación definitiva, el cual cuenta con nueve zonas (Figura 10.41), para cada una de las cuales se calcularon los umbrales de lluvia detonante de deslizamientos.



Fuente: OCENSA & IDEAM. “Servicio de pronóstico de la amenaza por deslizamiento de tierra para el corredor del Oleoducto Central de Colombia”. Informe final de actividades, 2010.

Figura 10.41 Sectorización climática del Oleoducto OCENSA

Por último dentro de la etapa de zonificación climática, se realizó el análisis de si cada evento, tenía una estación cercana dentro de la misma zona climática y si la estación tenía la información pluviométrica que coincidiera con la fecha de ocurrencia del mismo. De esta manera los eventos analizados con validez estadística se redujeron a 50 y están relacionados con 27 estaciones del IDEAM, lo cual corrobora los resultados obtenidos anteriormente.

Como segunda etapa se hallaron los rangos de probabilidad para estimar un modelo que determine la probabilidad de ocurrencia del evento en un día determinado, tomando como insumo variables independientes que proporcionan información sobre la precipitación de los últimos días. Las variables del modelo son las siguientes:

La variable respuesta está dada por la información que se tiene de si ocurrió o no un evento.

Las variables independientes del modelo están dadas por la precipitación en los días anteriores al día en que se quiere calcular la probabilidad de un evento, y pueden estar dadas por valores acumulativos o por valores simples de la precipitación.

Para la precipitación puntual de los días anteriores al evento, se consideraron los dos días anteriores y el día en el que ocurrió el evento. Los rangos de lluvia evento y lluvia acumulada son los que se observan en la Tabla 10.9.



| | Notación | Descripción |
|------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Acumulados | Acum. 3 | De los últimos 3 días |
| | Acum. 5 | De los últimos 5 días |
| | Acum. 10 | De los últimos 10 días |
| | Acum. 15 | De los últimos 15 días |
| Precipitación puntual | P0 | El día del evento |
| | P1 | El día anterior al evento |
| | P2 | En el día -2 |

Fuente: OCENSA & IDEAM. “Servicio de pronóstico de la amenaza por deslizamiento de tierra para el corredor del Oleoducto Central de Colombia”. Informe final de actividades, 2010.

Tabla 10.9 Variables independientes consideradas para los modelos

Para cada grupo de estaciones se construyó un modelo que permitiera determinar los días propicios para la ocurrencia de un evento y estimar su probabilidad de ocurrencia. Para ello se usó el análisis discriminante.

De esta manera se establecen las ecuaciones de las rectas que dividen diferentes rangos de probabilidad de ocurrencia del evento. Los diferentes rangos se categorizaron en “umbrales” que definen la probabilidad de ocurrencia como Bajo, Medio, Alto, etc.

Una vez la lluvia detonante o lluvia acumulada supera el umbral que genera deslizamientos, se reporta una alarma en el área de influencia de la estación pluviométrica que desemboca en un recorrido aéreo o en inspecciones puntuales. Semanalmente se generan reportes de amenaza de deslizamientos debidos a las lluvias instantáneas y acumuladas ocurridas en los últimos días (Figura 10.42).

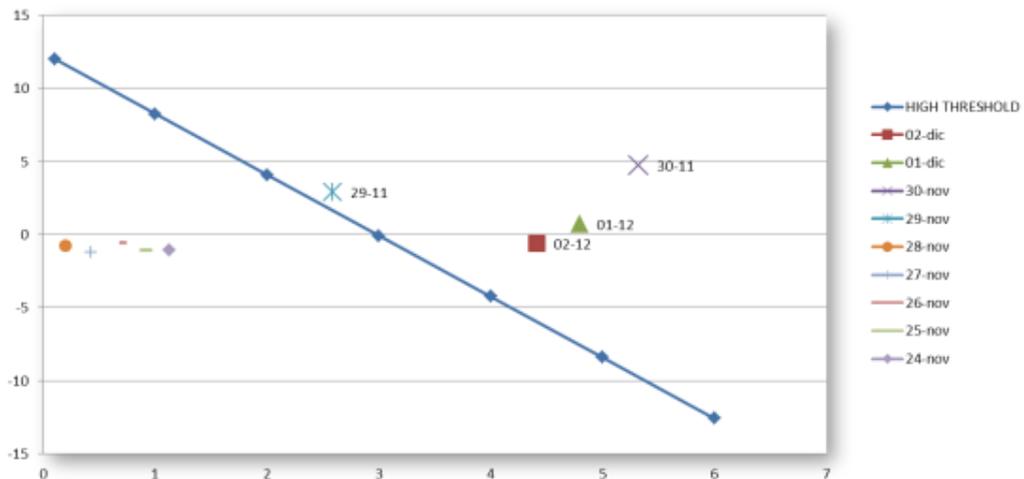


Fuente: Informe semanal de geotecnia de OCENSA.

Figura 10.42 Informe semanal de amenaza de deslizamientos debido a las lluvias



Durante el año 2012, en la estación Betania se observa un aumento en las precipitaciones de la estación Betania, cercana al Km 258+950 de acuerdo a la Figura 10.43, el cual generó una alerta en el recorrido aéreo.



Fuente: García H. et. al. "Technological Platform for the monitoring of natural hazards in the OCENSA pipeline System". Rio Pipeline, 2013.

Figura 10.43 Evolución de llluvias estación Betania año 2012

En el recorrido aéreo se encontró un flujo de lodos, en un área de afectación de aproximadamente 2800 m² en el margen izquierdo del DDV, cuya corona tenía una longitud aproximada de 30 m a una distancia de 7 m de la tubería de OCENSA, afectando el DDV del ducto como se observa en la Figura 10.44.



Fuente: García H. et. al. "Technological Platform for the monitoring of natural hazards in the OCENSA pipeline System". Rio Pipeline, 2013.

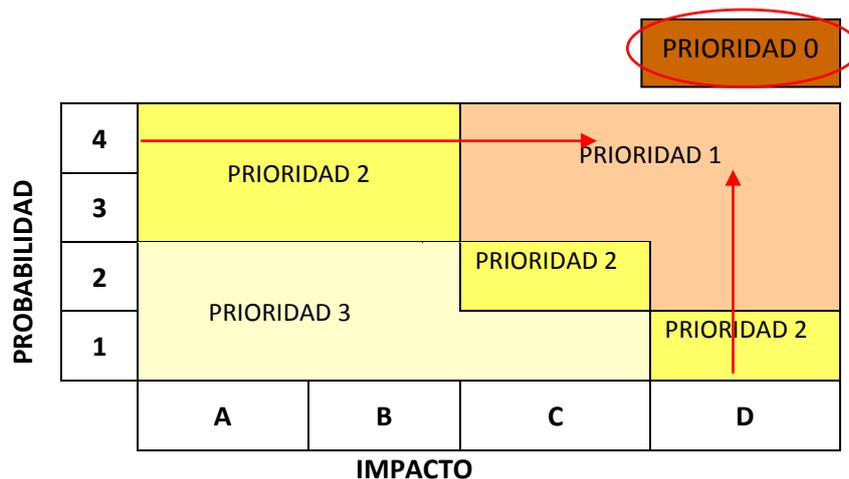
Figura 10.44 Deslizamiento PK 258+950 OCENSA de tipo traslacional (margen izquierdo del DDV)



Fuente: García H. et. al. "Technological Platform for the monitoring of natural hazards in the OCENSA pipeline System". Rio Pipeline, 2013.

Figura 10.45 Deslizamiento PK 258+950 OCENSA (vista desde la pata del deslizamiento)

Este deslizamiento se catalogó como de tipo emergencia de acuerdo con la clasificación del riesgo del sistema de gestión de integridad OCENSA (Figura 10.46), debido a que tenía una acción retrogresiva sobre el DDV, que en conjunto con las lluvias en la zona y la saturación del terreno podía ocasionar que el ducto estuviera sometido a esfuerzos de flexión y torsión, por la pérdida de soporte del ducto en una longitud de hasta 30 m, que así mismo podía producir la falla del ducto.



Fuente: García H. et al. "Integrity management program for geohazards in the Ocensa pipeline system". IPC, 2010.

Figura 10.46 Clasificación: prioridad 0 o de emergencia para el deslizamiento PK 258+950



De acuerdo con esta clasificación se realizaron obras de mitigación y estabilización del deslizamiento, las cuales consistieron, en obras de manejo de aguas superficiales, tales como canales y cortacorrientes sobre el DDV, obras de estabilización como la construcción de terrazas piloteadas de 4" y 2", y la construcción de un muro de gaviones sobre la pata del talud, cimentado sobre terreno estable, construido con el sistema de trincheras de un ancho de 4 m.



Fuente: García H. et. al. "Technological Platform for the monitoring of natural hazards in the OCENSA pipeline System". Rio Pipeline, 2013.

Figura 10.47 PK 258+950 OCENSA Construcción de obras de mitigación del deslizamiento



Fuente: García H. et. al. "Technological Platform for the monitoring of natural hazards in the OCENSA pipeline System". Rio Pipeline, 2013.

Figura 10.48 PK 258+950 OCENSA Construcción obras de mitigación deslizamiento

10.4.3. Conclusiones

- El sistema de umbrales y zonificación climática, le permitió a OCENSA actuar rápidamente frente a un evento de tipo natural.
- Un sistema de umbrales debe ser complementado con un sistema de monitoreo ágil, que permita en un corto tiempo inspeccionar la zona afectada principalmente por lluvias. OCENSA responde a éstos eventos registrados con un monitoreo aéreo, el cual activa los grupos en tierra frente a cualquier hallazgo.
- Es necesario estar atentos a los comportamientos climáticos anuales del tipo Niño o Niña; en este caso el año 2012 fue un año clasificado como de Niña, que en Colombia produce un aumento en las lluvias, lo cual incrementa la probabilidad de presentarse un deslizamiento.



10.5. Oleoducto Puesto Hernández – Lujan de Cuyo, Argentina, Pk 62.500

10.5.1. Resumen ejecutivo

YPF opera en Argentina 2900 km de ductos, que se encuentran dispersos por gran parte de la geografía del país. Esto implica convivir con una importante diversidad de situaciones derivadas de los distintos tipos de terrenos que son atravesados por estas instalaciones.

Una de ellas es el oleoducto de alta presión que se extiende entre la localidad de Puesto Hernández (provincia del Neuquén) y la de Lujan de Cuyo (provincia de Mendoza), el cual posee un extensión de 526 km, un \varnothing de 16" y abastece de crudo a la segunda refinera en importancia del país, detrás de la Refinería de La Plata. Este se desarrolla en su totalidad en forma paralela a la pre cordillera de los Andes, presentándose cauces perpendiculares a la traza, como así también paralelos a la misma. El común denominador de la mayoría de ellos, es que son cauces temporales, que parecen inofensivos, pero que llevan un enorme caudal en épocas de lluvias o deshielos. Este crecimiento, súbito en muchos casos, sumado a la geografía reinante y al suelo arenoso predominante, causa erosiones de grandes proporciones que afectan la traza, provocando situaciones extremas como la que se presenta a continuación, con un ducto operando a 80 kg de presión y descalzado por más de 35 m. Esto ameritó una intervención en dos etapas, siendo la primera mitigatoria (inmediata) para luego poder trabajar con mayor tranquilidad en la obra definitiva.

10.5.2. Caso de estudio

Se presenta a continuación la situación acontecida en la progresiva kilométrica 62,500 del oleoducto de 16" operado por YPF, el cual se extiende entre Puesto Hernández en la provincia del Neuquén y Lujan de Cuyo, en la provincia de Mendoza, Argentina.

El acontecimiento ocurrido en el mes de junio de 2013, en cercanías de la estación de bombeo de Aguas del Carrizo, se desencadenó debido a que el caudal del río que se encuentra al pie del talud allí presente, aumentó considerablemente debido a las intensas lluvias caídas.

El gran caudal de agua, impactando durante varias horas el pie del talud, provocó su desmoronamiento, dejando expuesto unos 35 metros del oleoducto, como se muestra en las siguientes imágenes:



Fuente: YPF.

Figura 10.49 Oleoducto expuesto



Fuente: YPF.

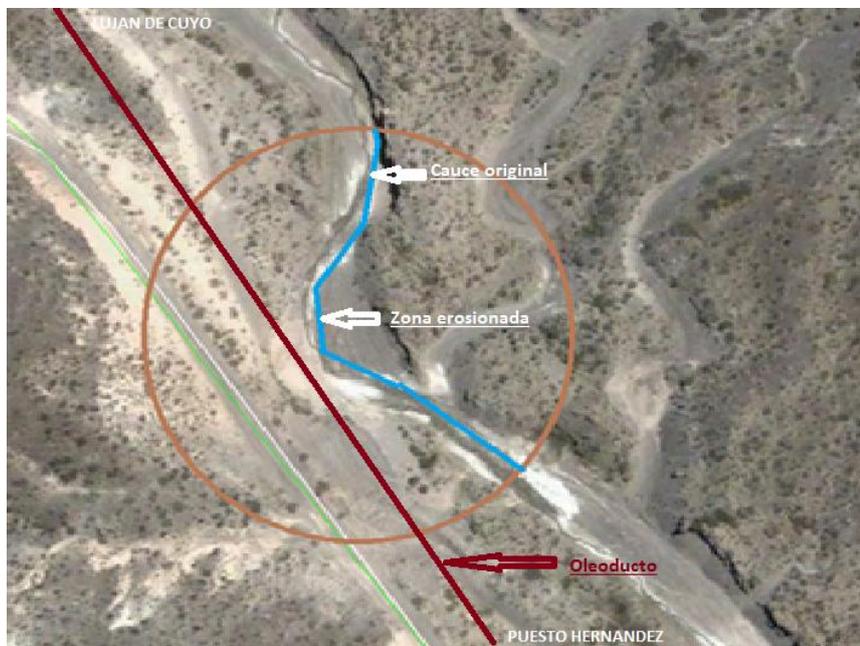
Figura 10.50 Oleoducto expuesto



Fuente: YPF.

Figura 10.51 Oleoducto expuesto

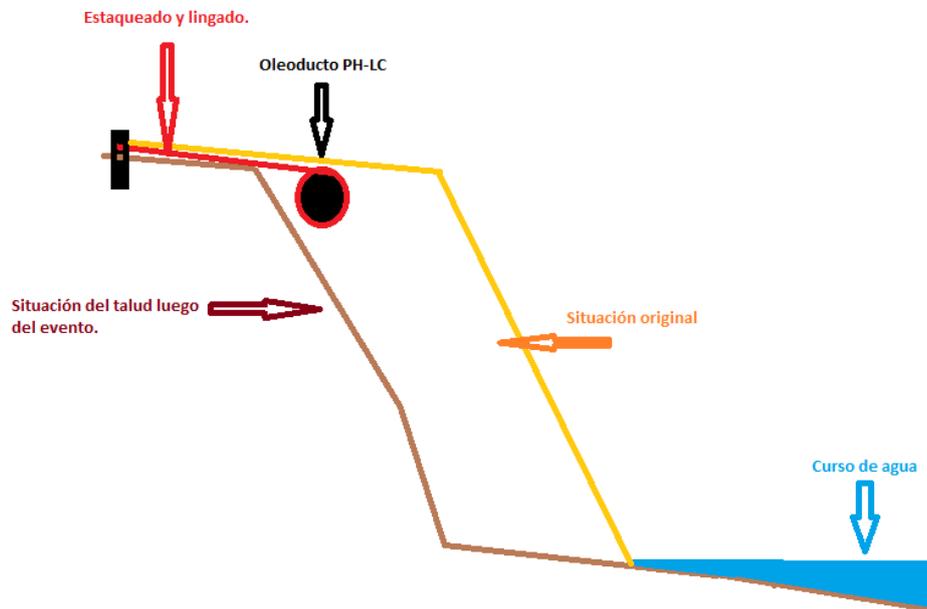
A continuación, se muestran imágenes satelitales del curso de agua y como se desarrolló su cauce para erosionar el talud.



Fuente: YPF.

Figura 10.52 Situación original del cauce.

La primera medida que se tomó ante la emergencia fue colocar estacas y lingar el oleoducto de manera de evitar su colapso, según se muestra en el esquema (ver la Figura 10.53).

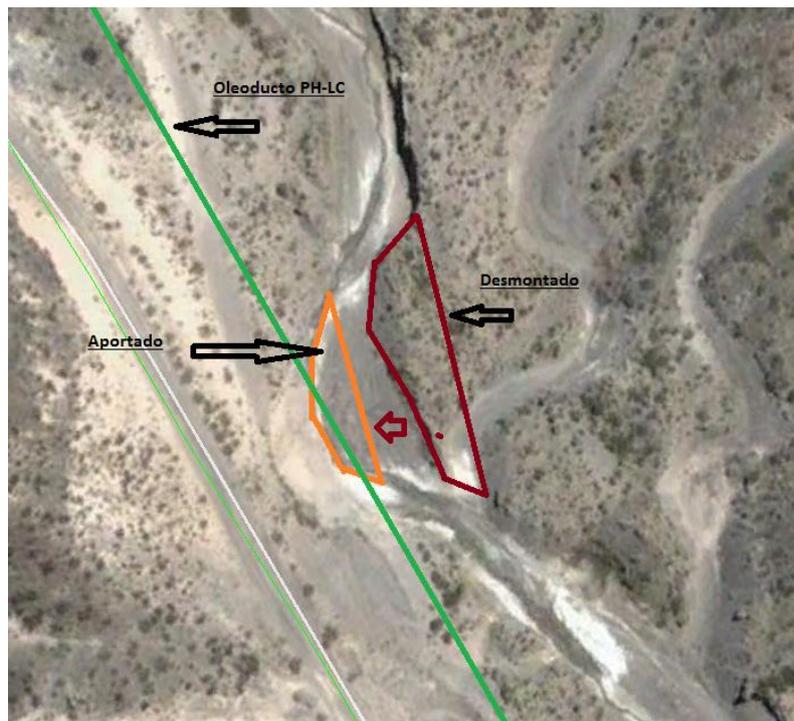


Fuente: YPF.

Figura 10.53 Esquema de lingado de la línea

Inmediatamente, se realizaron cálculos por elementos finitos, para determinar la deformación máxima que admitiría el oleoducto. Los cálculos arrojaron que -si bien los 35 metros de luz eran una situación a resolver en forma inmediata- el oleoducto no corría riesgo inminente de colapso, con lo que siguió operando con normalidad.

En la Figura 10.54 se muestra el esquema de las tareas realizadas. Para generar un importante ahorro en flete, se decidió utilizar suelo del lugar. Solicitando autorización a las autoridades competentes, se resolvió cambiar el curso del cauce. El volumen delimitado en rojo fue desmontado y aportado a la zona delimitada en naranja. En esta última locación, se realizó un aterrazamiento con un enrocado inferior para evitar una nueva socavación, siendo ésta la obra en sí de protección (ver las Figuras 10.45 y 10.46).



Fuente: Google Earth/YPF.

Figura 10.54 Movimiento de suelo realizado (desmonte y aporte)



Fuente: Google Earth/YPF.

Figura 10.55 Perfil topográfico de la zona



Situaciones comparativas:



Fuente: YPF.

Figura 10.56 Situación original del río



Fuente: YPF.

Figura 10.57 Situación actual



Nuevo encausamiento con la obra terminada. En la zona media de la Figura 10.58, nótese el enrocado de protección.



Fuente: YPF.

Figura 10.58 Ubicación de enrocado inferior

10.5.3. Conclusiones

- Más allá de las situaciones geotécnicas que se puedan presentar, es fundamental conocer la capacidad resistente de las cañerías, ya que esto nos permite darle la verdadera dimensión al evento. En el caso presentado, si bien se actuó de inmediato, se hizo con la tranquilidad de que el ducto no corría riesgos de colapso.
- Por lo expuesto anteriormente, el geotecnista no debe clausurar su espectro a lo relativo al suelo, sino que debe trabajar en un equipo multidisciplinario y absorber los conocimientos básicos de sus colegas para darle la verdadera entidad a cada evento.
- En lo relativo al caso presentado, sucesivas visitas a la zona por parte del personal de Integridad y de los patrullajes aéreo y terrestre, monitorean continuamente el estado del lugar, como rutina permanente.
- En la actualidad la obra lleva más de dos años de concluida y no se han presentado alteraciones significativas, operando el oleoducto con total normalidad.



10.6. Influencia del tectonismo y la sismicidad en la evolución de la dinámica fluvial de un río principal en el piedemonte llanero colombiano

10.6.1. Resumen ejecutivo

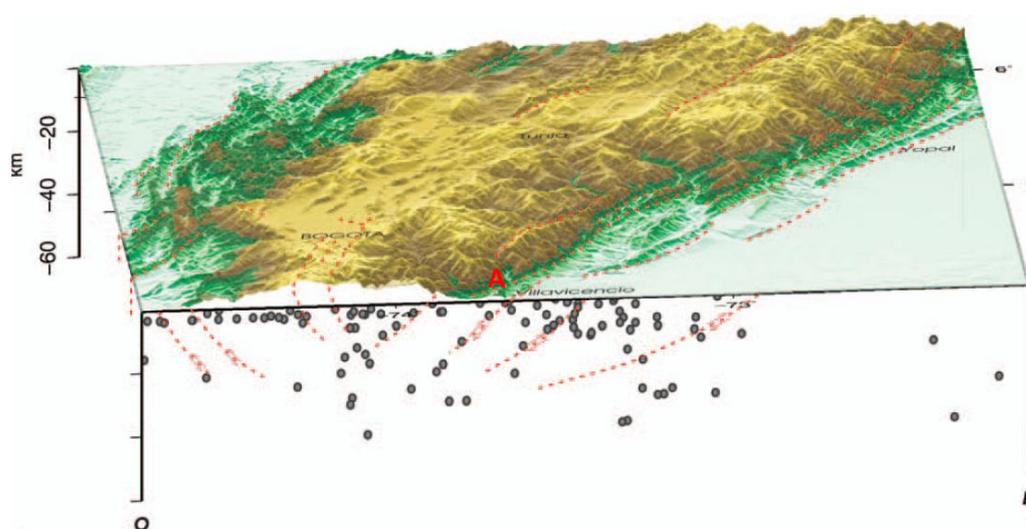
Las empresas operadoras de transporte de hidrocarburos realizan de manera periódica inspecciones visuales al derecho de vía con el fin de reconocer de manera preventiva manifestaciones del terreno asociadas a geoamenazas o a su potencial desencadenamiento. En algunas ocasiones, estas evidencias no se presentan en sus cercanías o incluso en los alrededores al DDV, y en cambio, se observan los efectos de procesos de inestabilidad que se originan alejados de los corredores. En este caso se presenta el avance de un inmenso proceso de inestabilidad asociado al tectonismo y sismicidad de la región del Piedemonte Llanero Colombiano, que produjo cambios en la dinámica fluvial de un río principal y efectos en la estabilidad de las márgenes en el sitio de cruce de tres sistemas de conducción de hidrocarburos. Se hace especial énfasis en la posibilidad de contar con el monitoreo de agentes detonantes y recorridos aéreos para tener una mejor comprensión de la influencia de los factores detonantes de la amenaza (como lo son las lluvias, sismos, cambios apreciables de uso del suelo) y la dinámica del evento geotécnico (avance del tipo, actividad y magnitud) en la estabilidad del DDV y en la integridad de los sistemas de transporte de hidrocarburos.

10.6.2. Caso de estudio

El sistema de fallas geológicas del Piedemonte Llanero¹¹² en el segmento central de la Cordillera Oriental colombiana, se ha caracterizado en términos geomorfológicos por su incidencia notable en la conformación de los relieves y modelados que han venido evolucionando desde tiempos geológicos hasta lograr las particularidades que exhiben hoy en día.

En la Figura 10.59 se presenta el relieve en el segmento central de la cordillera oriental, en el cual se interpretan las principales fallas activas y, en la sección Oeste-Este, la geometría de las fallas y la sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia, adscrita al Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS).

¹¹² Piedemonte: hoy en día la geomorfología define al piedemonte como una geoforma estructural que se ubica entre las cordilleras o serranías como bloques levantados y las depresiones laterales o internas menos levantadas y separadas tectónicamente por fallas generalmente de cabalgamiento (inversas) (Flórez, 2003).



Fuente: Dimaté, C. & Arcila, M. (2006).

Figura 10.59. Diagrama esquemático del relieve de la Cordillera Oriental y su relación con sistemas de fallas geológicas activas y eventos sísmicos

La conjunción de estas condiciones geológicas con zonas de pendiente moderada a alta (y los cambios apreciables de uso del suelo) es un indicativo de la susceptibilidad del terreno a geoamenazas, en especial cuando los materiales se encuentren meteorizados por el efecto de agentes detonantes como la actividad sismo-tectónica y las lluvias. En la Figura 10.60 se indica con la letra A la ubicación de un proceso de inestabilidad generado bajo estas condiciones, y sobre el cual se comentará su efecto en la dinámica fluvial de un río principal en el sitio del cruce subfluvial de varios sistemas de transporte de hidrocarburos.

En cercanías a la zona de Piedemonte Llanero, en terrazas aluviales producto de la sedimentación de los ríos provenientes de la parte de alta de la cordillera, se emplazan tres ductos de transporte de hidrocarburos que opera ECOPEPETROL. Uno de estos cruces principales de corrientes de agua corresponde al del Río Guacavía, que nace en la Serranía de Los Farallones de la Cordillera Oriental, a una altura de 3400 msnm; desciende por la vertiente oriental de la cordillera en régimen torrencial hasta la cota 600 msnm, luego de un recorrido de 25 km (B en la Figura 10.60). En su paso entalla en rocas sedimentarias que se encuentran plegadas y fracturadas por efecto del sistema de fallas geológicas, lo que genera un aporte permanente de materiales en el transporte de la corriente hídrica.

Después transcurre en zona de inclinación suave hacia el oriente. Sus principales corrientes tributarias son los ríos Nipore, Piri, Guajaray y Caño Grande (1 a 4 en la Figura 10.60). El Río Guacavía pasa de la cordillera al llano, con una considerable carga de sedimentos y en el cambio de pendiente su cauce se torna trezado, lo cual hace muy móviles las posiciones de los distintos brazos o caños individuales¹¹³.

¹¹³ IGL, 1992



Fuente: Google Earth, 2016.

Referencias: en línea magenta el corredor donde se emplazan los ductos; en líneas blancas se indican las trazas de fallas geológicas activas; en líneas amarillas la vía nacional “Marginal de la Selva”.

Figura 10.60. Vista general del Río Guacavía y de sus afluentes principales

En los años 90 se comenzó a distinguir la formación de un deslizamiento¹¹⁴ y en la Figura 10.61 se presenta una vista panorámica del proceso de inestabilidad. Con el tiempo este cambio generó una nueva dinámica fluvial al Río Piri y a sus afluentes principales, por el aporte continuo de materiales al cauce, y este efecto también empezó a observarse en el Río Guacavía.



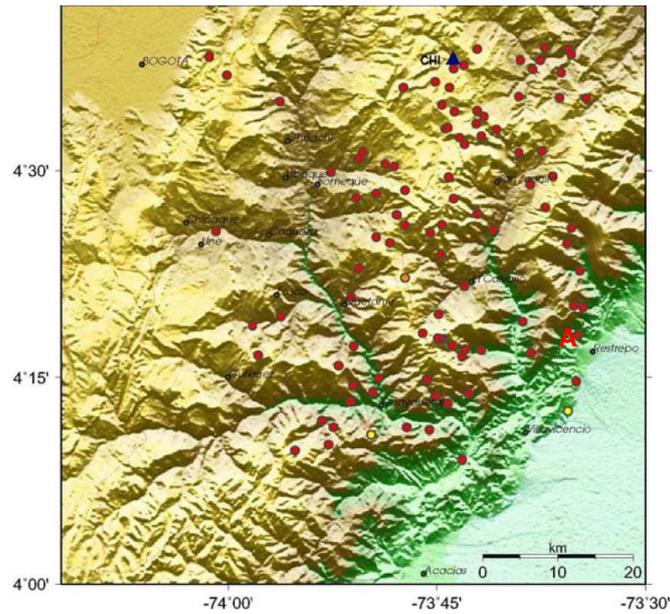
Fuente: modificado de INGEOMINAS (2003).

Figura 10.61 Panorámica del deslizamiento que se originó en la transición topográfica cordillera - llano

Aunque no se tiene certeza de la fecha de ocurrencia del evento, es evidente la influencia del neotectonismo en la zona - con tasa de deformación promedio de 2 cm/año¹¹⁵ - y de las condiciones sísmicas en la estabilidad de las laderas (ver la Figura 10.62).

¹¹⁴ INGEOMINAS, 2003

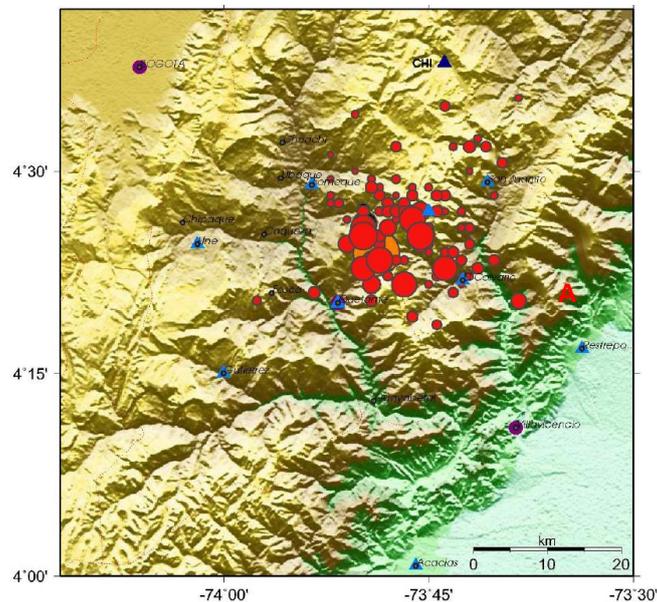
¹¹⁵ Amórtégui, 2013



Fuente: modificado de INGEOMINAS, 2008.

Figura 10.62 Localización de eventos sísmicos entre julio de 1993 y agosto de 2007¹¹⁶

El 24 de mayo de 2008 ocurrió un sismo con magnitud local $M_L=5,7$, 8,9 km de profundidad y a 28 km del occidente del deslizamiento con varias réplicas con $M_L>4,0$. Este sismo, que tuvo impactos en ciudades principales de Colombia, como Villavicencio y Bogotá, es conocido como el Sismo de Quetame (Figura 10.63).



Fuente: modificado de INGEOMINAS, 2008.

Figura 10.63 Sismo principal (círculo naranja) y réplicas registradas por las estaciones permanentes de la red sismológica Nacional de Colombia hasta el 8 de junio de 2008

¹¹⁶ En el gráfico no se han diferenciado las magnitudes para cada evento.

Producto de este movimiento telúrico, de las réplicas posteriores y del efecto tectónico (solevantamiento); la inestabilidad del sitio aumentó hasta desarrollar en el sitio del deslizamiento un movimiento complejo con flujos de detritos superficiales y generalizados, y con mayor frecuencia flujos de detritos generalizados, con algunos flujos de lodo locales, en los cuales se aprecia el arrastre de suelos laterizados de la parte superior del escarpe principal. La cara libre del deslizamiento alcanzó una altura de 600 m, y el volumen promedio movilizado fue de alrededor de un (1) millón de m³ (largo 1000 m, ancho promedio 700 m y espesor estimado de 200 m).

Los materiales del movimiento, correspondientes a rocas y detritos principalmente, generaron el taponamiento de los afluentes del Río Piri, su migración lateral, y posteriormente su proceso de avulsión¹¹⁷. Algunos aspectos de este proceso pueden observarse en las imágenes siguientes:



Fuente: ECOPETROL, 2009.

Figura 10.64 Arriba: vista de la garganta de flujo canalizado de los detritos y rocas y del ápice del abanico. En primer plano se observan depósitos recientes por la ampliación del deslizamiento. Abajo: nuevo cauce del Río Piri entallando en terrazas aluviales

Como se aprecia en la Figura 10.65, el material movilizado alcanzó a depositarse hasta 5,0 km ladera abajo del sitio de inestabilidad. Bajo estas circunstancias, en los meses posteriores evolucionó la dinámica fluvial del Río Guacavía socavando su cauce lateralmente y en profundidad, proceso que también se ha manifestado en la margen derecha del sitio del cruce subfluvial de los ductos (Figura 10.66), el cual está a más de 10 km de la confluencia del Río Piri con el Río Guacavía.

¹¹⁷ La avulsión en geomorfología fluvial, es el abandono de un cauce de un río y la formación de uno nuevo. Las avulsiones ocurren como resultado de que las pendientes del cauce son mucho menores que la pendiente que el río podría adquirir si tomara un nuevo rumbo (Slingerland & Smith, 1998).



Fuente: ECOPETROL (2012).

Figura 10.65 Arriba: vista aérea lateral y desde la cabecera del movimiento (en línea azul cauce antiguo del Río Piri). Abajo: sector distal del cuerpo del movimiento; en C alcanza a apreciarse la desembocadura del Río Piri en el Guacavía



Fuente: ECOPETROL, 2012.

Figura 10.66 Vista aguas arriba desde el sitio de cruce subfluvial del Río Guacavía¹¹⁸

¹¹⁸ Nótese la divagación lateral del río en ambas márgenes y la profundización del cauce en la margen derecha afectando una plantación de palma africana. El ancho de río en el sitio de cruce es de aproximadamente 500 m. En A se distingue el movimiento complejo descrito.

En la Figura 10.67 se presenta el estado de las obras de protección en la margen derecha, construidas por los propietarios de la plantación y por ECOPEPETROL en 2009; corresponden a muros y espolones de gaviones proyectados para mitigar el efecto de divagación del río que comenzó hacia el año 2003 las cuales fueron poco efectivos debido a la ampliación del cauce desde varios kilómetros aguas arriba.



Fuente: ECOPEPETROL (2012).

Figura 10.67 Arriba - vista aguas arriba de las obras de protección marginales localizadas aguas arriba del sitio de cruce por la margen derecha del Río Guacavía. Abajo: vista aguas arriba y aguas abajo del río desde la margen izquierda. En esta margen no se han presentado mayores problemas de socavación y divagación

Como ejemplo de un diseño de ingeniería para el cruce de ductos por corrientes principales, ECOPEPETROL realizó el análisis para uno de sus ductos. En este diseño se efectuó, tanto el estudio de dinámica fluvial histórica del Río Guacavía, como los análisis hidrológicos de la cuenca tributaria, y los estudios hidráulicos. A su vez, se efectuaron estudios geotécnicos de investigación del subsuelo, y en especial de la presencia potencial de niveles piezométricos altos (agua artesiana). Todo lo anterior con el fin de definir la profundidad y longitud del cruce subfluvial con factores de seguridad adecuados.

Los elementos principales de este análisis tuvieron en cuenta:

- La definición del ancho de la zona de divagación del río, con base en el análisis morfodinámico y las condiciones recientes.
- El cálculo de los caudales de creciente para diferentes periodos de retorno, con base en el análisis hidrológico y la verificación del área vertiente.
- La estimación de los espesores de los materiales presentes y su clasificación.



- El cálculo de la socavación de fondo, con base en la nueva geometría y granulometría.

Con base en estos análisis, se estableció que, debido a que los cruces se inician y terminan por fuera de la zona de divagación actual y potencial, y a que se construyeron a una profundidad superior a la de socavación activa y potencialmente activa, los ductos no han sido afectados por la evolución de la dinámica fluvial del Río Guacavía por el proceso de inestabilidad descrito.

Este caso demuestra la importancia de comprender el comportamiento histórico de los sistemas físicos, en el entendido de que la evolución geomorfológica está en función de la variación de su energía interna, y que en el caso descrito se asocia a la influencia del efecto tectónico y sísmico en la inestabilidad de movimientos en masa que afectan la carga de sedimentos de una corriente de agua.



10.7. Implementación de ARCGIS online en RECOPE - Costa Rica

10.7.1. Resumen ejecutivo

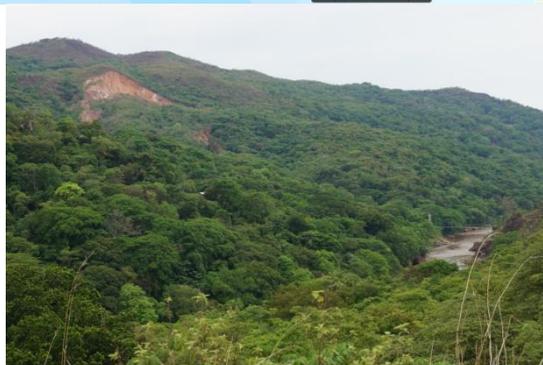
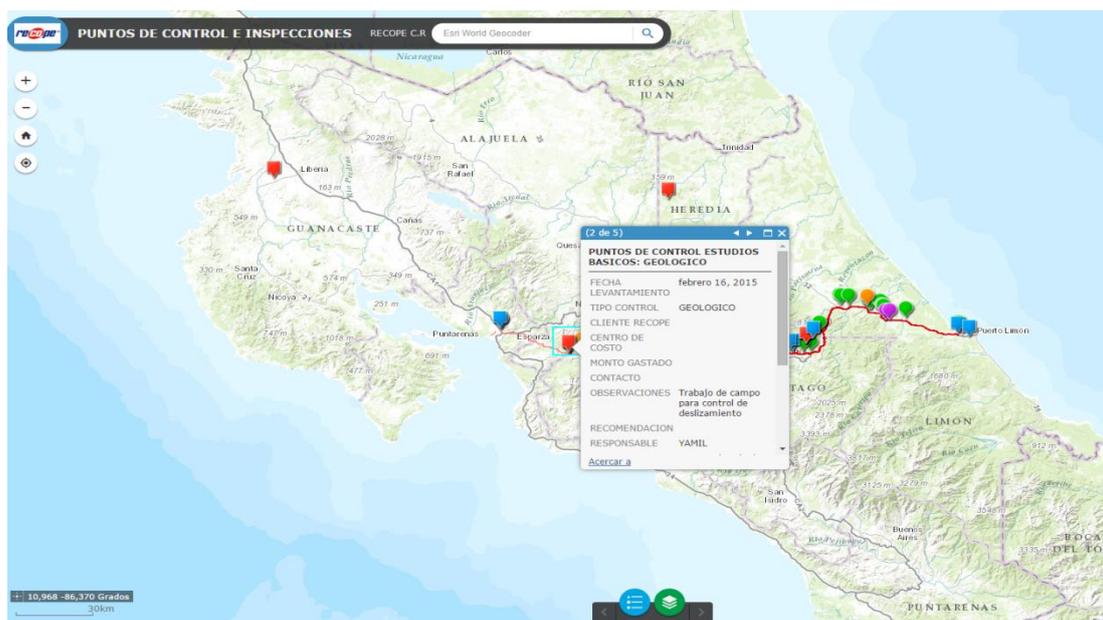
Este caso busca introducir al lector en la utilización de una herramienta Geomática que ha tenido varios casos exitosos en diferentes lugares del mundo.

La herramienta tiene la capacidad de utilizar mapas digitales en equipos móviles, en computadores de escritorio o portátiles, y utilizar datos geospaciales para representar la información de interés que se esté monitoreando. En RECOPE, ésta se aplica para el levantamiento de datos relacionados con:

- Puntos de inspección (preventivos, correctivos, invasiones, robos) y puntos de control (geológicos y estructurales).
- Gestión de datos de servidumbres (derechos de vía) y propiedades
- Control de donaciones y avances de obras de infraestructura

La herramienta permite el registro de datos de campo y su almacenamiento inmediato en la nube de internet, los cuales pueden ser consultados y gestionados en tiempo real por los grupos de toma de decisiones.

Una de las aplicaciones que se monitorean, para poner un ejemplo, está relacionado con la geoamenaza por deslizamiento. En la zona pacífica de Costa Rica, éste deslizamiento amenaza un paso aéreo-fluvial del poliducto; lo que conlleva a la inspección periódica del comportamiento del deslizamiento mediante mediciones topográficas y geodésicas de puntos de control ubicados estrambóticamente. Esta información es gestionada en la aplicación en tiempo real mediante el registro de datos utilizando un formulario electrónico; las gestiones y recomendaciones a aplicar y el seguimiento que deben darle las diferentes unidades se realiza en forma independiente pero orquestada, desde la misma aplicación. El registro de datos incluye fotografías y videos los cuales también se almacenan en la nube.



Fuente: RECOPE.

Figura 10.68 Ubicación en SIG online. Deslizamiento Bajo Alumbre, Costa Rica. Geoamenaza Poliducto RECOPE

Los puntos de control tomados con instrumentos topográficos son registrados en los equipos móviles, utilizando para ello, escenarios de datos con mapas digitales temáticos o imágenes de fotos aéreas o satelitales. Estos puntos de control permiten identificar movimientos de terreno, los cuales se registran en línea en conjunto con fotos que permiten ilustrar lo que está sucediendo en el sitio. Las mediciones topográficas de movimientos en puntos de control, ubicados estratégicamente sobre el cuerpo de roca frontal denominado “contrafuerte”, donde se cimenta la torre del paso 2 del oleoducto en el margen izquierdo del Río Tárcoles; el fin es documentar el diagnóstico y tener una base de conocimiento adecuada si las bases del puente del oleoducto están siendo amenazadas por movimientos relativos del sustrato a raíz de la presión ejercida por el deslizamiento.

En la figura siguiente (Figura 10.69) se muestra la capacidad de la herramienta de tener visibilidad de imágenes de sensores remotos, y los detalles en zonas específicas.



Fuente: SIG en línea – RECOPE.

Figura 10.69 Detalle fotografía aérea zona Deslizamiento Bajo Alumbre, Costa Rica. Geoamenaza

10.7.2. Caso de estudio

El caso está compuesto por dos temas, el primero la presentación del monitoreo de líneas de tubería en campo utilizando SIG online, aplicado al deslizamiento de Bajo Alumbre, y el segundo relacionado con una guía básica práctica que servirá al usuario final de esta guía en la implementación de una herramienta de apoyo como lo es SIG ONLINE.

10.7.2.1. Monitoreo mediante SIG online - deslizamiento Bajo Alumbre - zona pacífica

La herramienta, permite el registro de datos de campo y su almacenamiento inmediato en la nube de internet, los cuales pueden ser consultados y gestionados en tiempo real por los grupos de toma de decisiones.

Una de las geoamenazas que se monitorean está relacionada con la geomenaza por deslizamiento llamado Bajo Alumbre.

En la zona pacífica de Costa Rica, este deslizamiento amenaza un paso aéreo fluvial del poliducto; lo anterior, conlleva la inspección periódica del comportamiento del deslizamiento, mediante mediciones topográficas y geodésicas de puntos de control estratégicamente ubicados. Esta información es gestionada en la aplicación en tiempo real mediante el registro de datos utilizando un formulario electrónico; las gestiones y recomendaciones a aplicar y el seguimiento que deben darle las diferentes unidades se realiza en forma independiente pero orquestada desde la misma aplicación. El registro de datos incluye fotografías y videos los cuales también se almacenan en la nube.

Detalles del proceso de inspección

A partir de las conclusiones emanadas de los controles y mediciones periódicas desde principios de la década del 2010 y las observaciones y conclusiones obtenidas de las inspecciones y sobrevuelo desde el 14 de mayo del 2014 sobre el deslizamiento Bajo Alumbre en Turrubares, mediante los recursos de la Unidad de Estudios Básicos del Departamento de Ingeniería de la GDV, se incrementó el programa de vigilancia topográfica y geológica del mismo.

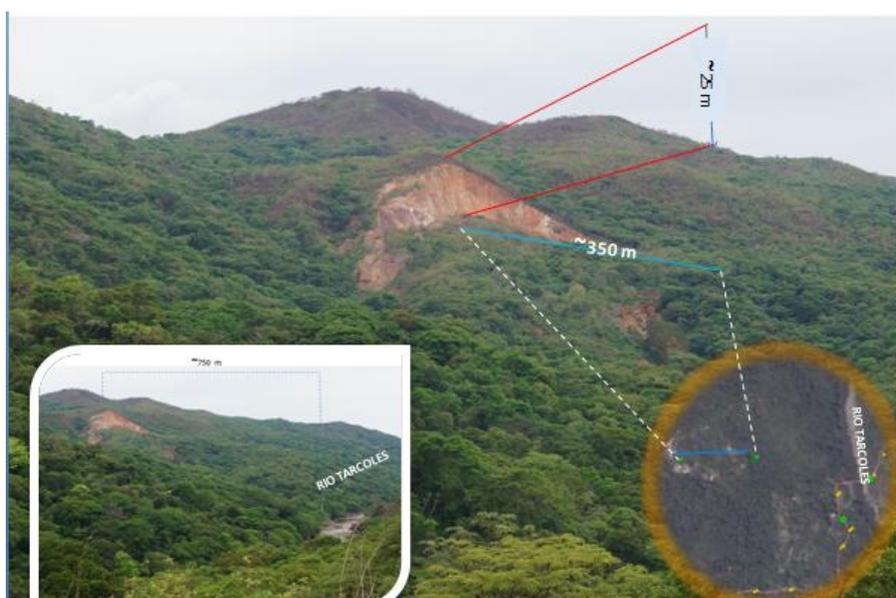
La vigilancia del fenómeno se centralizó en 2 sentidos a partir de 4 observaciones periódicas en un lapso de 3 meses:



1. Medición de la cicatriz de despegue de la falla en la corona del deslizamiento, acumulación del material en la base y comportamiento de la quebrada que delimita el frente deslizante. Lo anterior con el fin de monitorear el movimiento de las masas, tanto vertical como horizontalmente y así evaluar si los movimientos relativos y volúmenes se compensan dentro de los rasgos topográficos e hídricos del cuerpo principal (Acumulación de material al pie y retrabajo de escombros por parte del sistema de drenaje).
2. Medición topográfica de movimientos en puntos de control ubicados estratégicamente sobre el cuerpo de roca frontal denominado “contrafuerte” donde se cimenta la torre del paso 2 del oleoducto en el margen izquierdo del Río Tárcoles y separa el área de influencia directa del deslizamiento del puente sobre el río. Esto con el fin de diagnosticar si las bases del puente del oleoducto están siendo amenazadas por movimientos relativos del sustrato a raíz de la presión ejercida por el deslizamiento.

OBSERVACIONES

En el primer sentido se observa, durante el periodo establecido, un movimiento absoluto o rechazo vertical de la falla de 25 metros de manera oscilante. O sea:

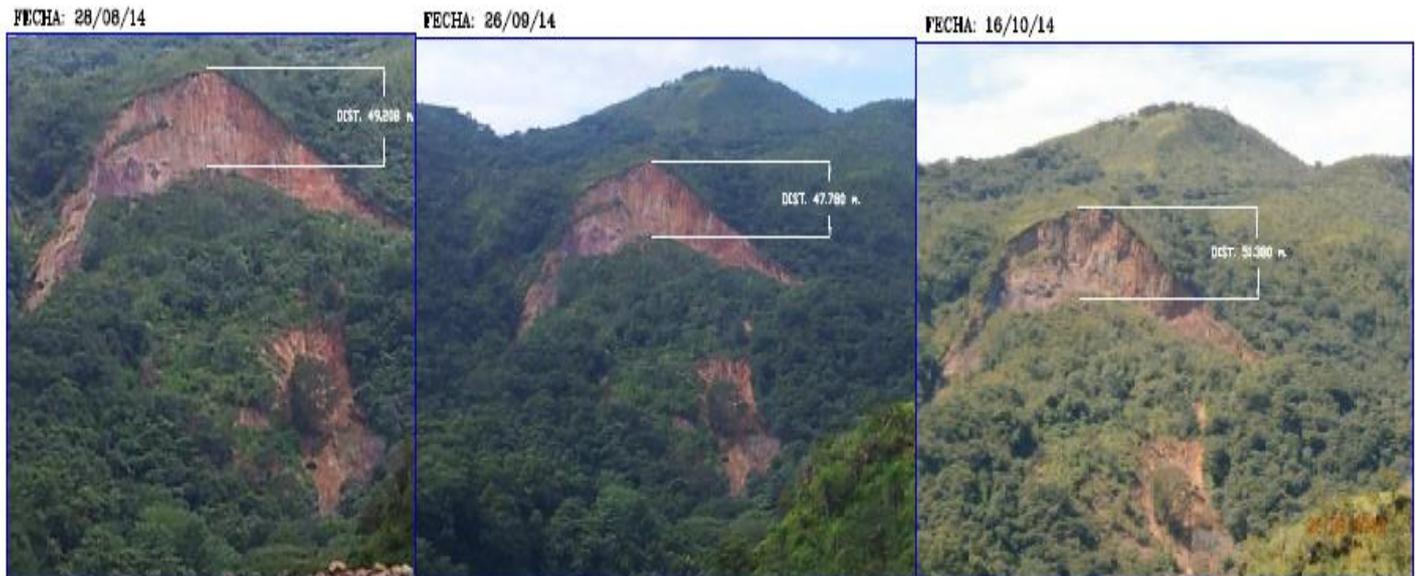


Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.70 Foto digital para control

1. En una primera medición, entre mayo y julio de 2014, el rechazo fue de 25 metros.

En los controles subsiguientes, en agosto, setiembre y octubre, se evidenció un rechazo vertical de 49,2, 47,7, y 51,3 m respectivamente; por lo que -en general- se puede afirmar un incremento de 25 metros en 4 meses. La disminución intermedia obedece a la acumulación momentánea de escombros en la base de la falla.

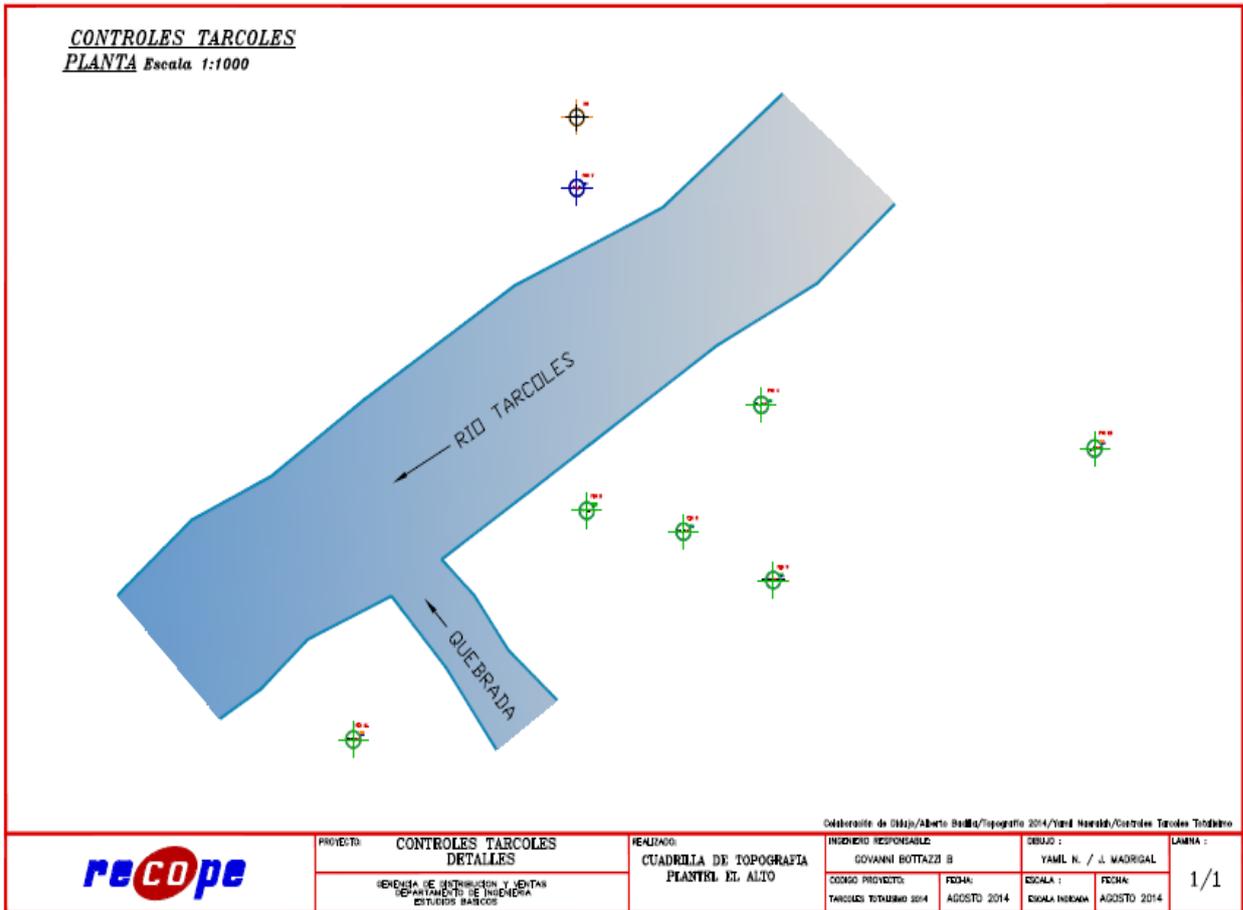


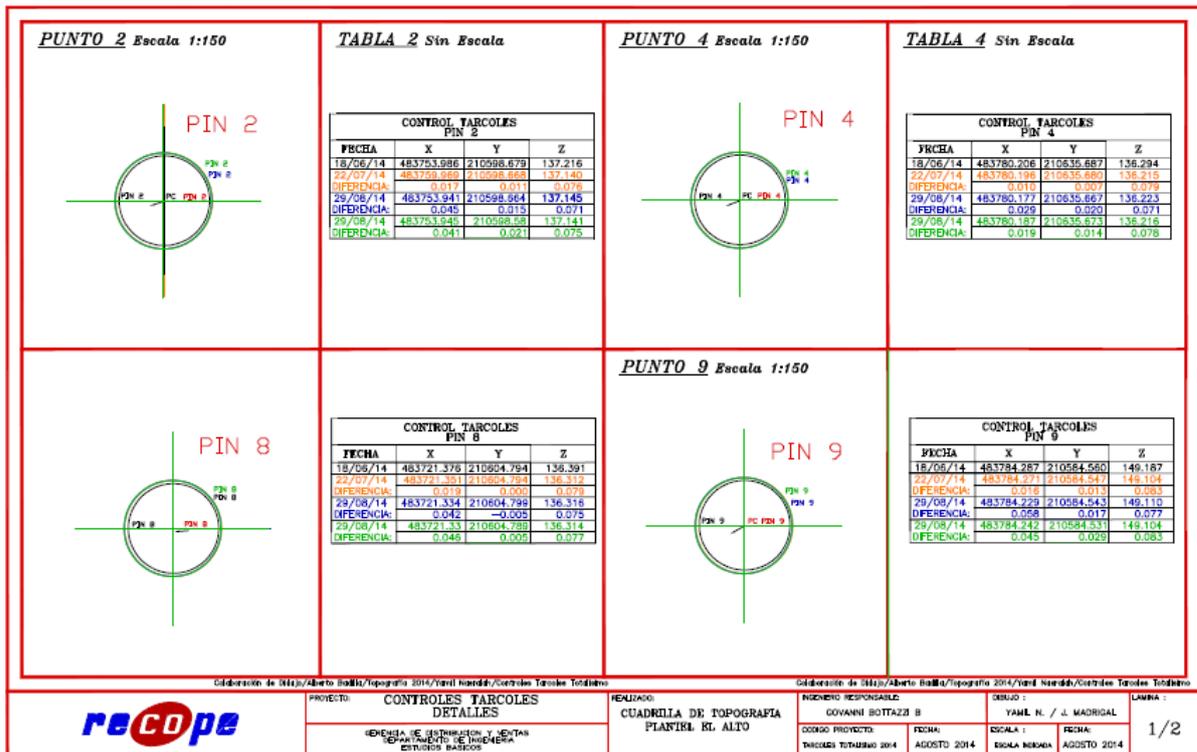
Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.71 Fotos comparativas de la zona de deslizamiento

1. Se evidencia un desarrollo erosivo y flujo de escombros en la parte frontal hacia la quebrada, que delimita la masa y separa del “contrafuerte”, lo que evidencia el funcionamiento del sistema de drenaje como agente erosivo que retrabaja y drena las masas en remoción.
2. La alta turbidez de las aguas de la quebrada frontal, en su desembocadura al Río Tarcoles, contrariamente a su apariencia aguas arriba de su intersección con la lengua del deslizamiento, refuerzan esta conclusión sobre el funcionamiento de alivio que ejerce el sistema de drenaje.
3. La geometría del cauce del Río Tarcoles no se ha alterado, lo que indica que el sistema compensa eficientemente los excesos de masa que están induciendo el fenómeno.

En el segundo aspecto, la medición periódica de puntos de control topográfico, incrementada durante los últimos 4 meses sobre la estructura rocosa donde se cimenta el puente y, como se mencionó, funciona como contrafuerte ante el movimiento de masas, evidencia la ausencia de dinámica rocosa y -por lo tanto- estabilidad geotécnica apta. En otras palabras, las presiones horizontales que ejerce el fenómeno, no están siendo transmitidas al sustrato que soporta nuestras infraestructuras o está siendo compensada, amortiguada o soportada de alguna manera.





Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.72 Ubicación de puntos de control geodésico de la zona de deslizamiento

Cada uno de estos puntos es registrado en SIG online, de manera que exista una aplicación de consulta inmediata en la cual se puedan contabilizar y detallar las inspecciones realizadas. Asimismo, se logran integrar informes específicos, fotos y videos que ilustran de manera más amplia el proceso de deslizamiento en la zona.

En la siguiente figura se muestra personal de campo realizando los procesos de control con equipos de topografía, y con una tableta se ingresa a la aplicación que permite registrar ese punto de control, llenar el formulario de datos, y agregar fotos y videos representativos del momento en que se hace este registro.

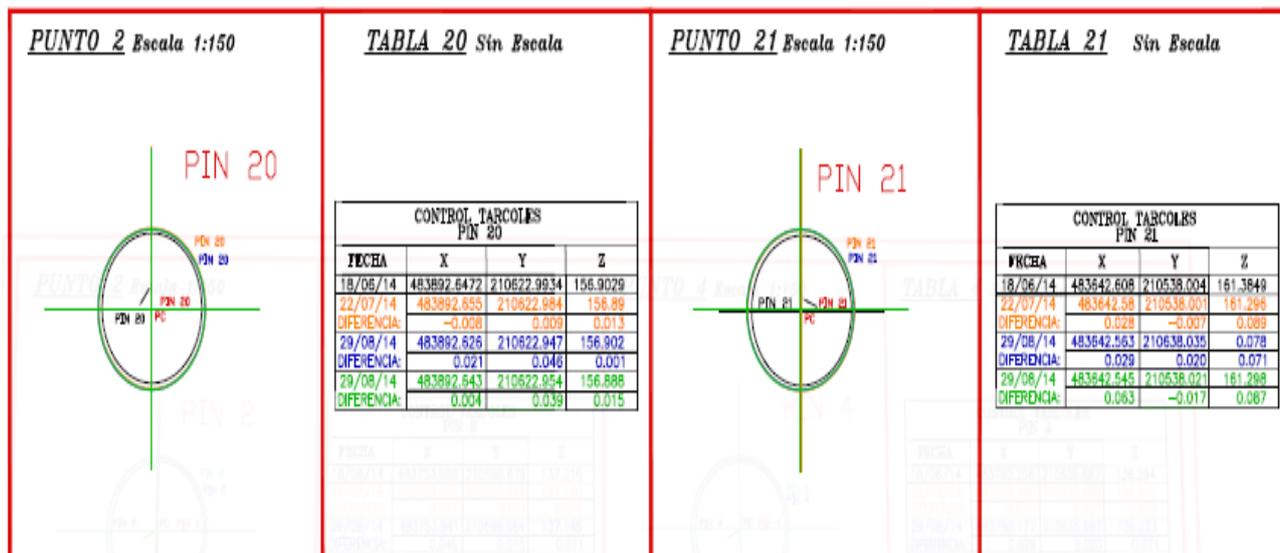


Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.73 Visita de campo para control de puntos



A marzo de 2016 se realizaron las inspecciones de campo recomendadas dando curso al programa de monitoreo establecido, e intensificados los controles de vigilancia.



Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.74 Resultados de las mediciones de posición relativa entre puntos de control, efectuados en junio, julio, agosto y octubre

Los resultados del análisis topográfico de los puntos de control reflejan la ausencia de movimientos corticales locales, por lo que no se vislumbran, por el momento, problemas en la estabilidad de la estructura del puente del oleoducto sobre el Río Tarcoles. Las variaciones milimétricas e inconsistentes en las mediciones, responden al error de instrumentación y manipulación normalmente aceptable.

En la siguiente sección se detallan el proceso y los formularios de base de datos creados para la recolección de datos de campo, así como otros servicios relacionados con el monitoreo remoto y el control de datos de campo.

10.7.2.2. Guía básica para la implementación de ArcGIS online

Ésta plataforma SIG está basada en los productos ESRI, sin embargo, cualquiera sea la solución disponible, ya sea con software libre u otro proveedor, ésta brinda -de una u otra forma- medios para poder publicar mapas y disponerlos en tiempo real.

La solución de ESRI con ArcGIS online fue seleccionada por RECOPE ya que se brinda inicialmente con el licenciamiento de forma gratuita (usuario personal), el proceso de capacitación es muy rápido y la puesta en productivo de los servicios es casi inmediata debido a la integración de las aplicaciones.

La ventaja adicional es que un usuario puede -en minutos- estar compartiendo datos, mapas y otros por medio de esta aplicación. Para el desarrollo de esta herramienta se procedió de la siguiente forma:



Paso 1. Adquisición de cuenta empresarial o crear su propia infraestructura en la nube para la gestión de servicios.



Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.75 Sitio de administración SIG en línea¹¹⁹

Paso 2. Configuración de la cuenta empresarial y creación de los usuarios y sus roles dentro del esquema.

Para convertirse en miembro de una organización de ArcGIS Online, es necesario crear (o que el administrador de la organización cree) una cuenta de organización, o que el administrador haya configurado los inicios de sesión corporativos. Después de iniciar sesión, se obtiene la vista personalizada del sitio web de la organización y se accede a los datos acreditados y a otro contenido geoespacial de la organización, que se puede utilizar para crear mapas y aplicaciones. Como miembro de una organización, también se puede compartir el trabajo con otros miembros de la organización, participar en grupos y guardar dicho trabajo.

¹¹⁹ [Ver: ¿qué puedo hacer con GIS online?](#)



Fuente: SIG RECOPE.

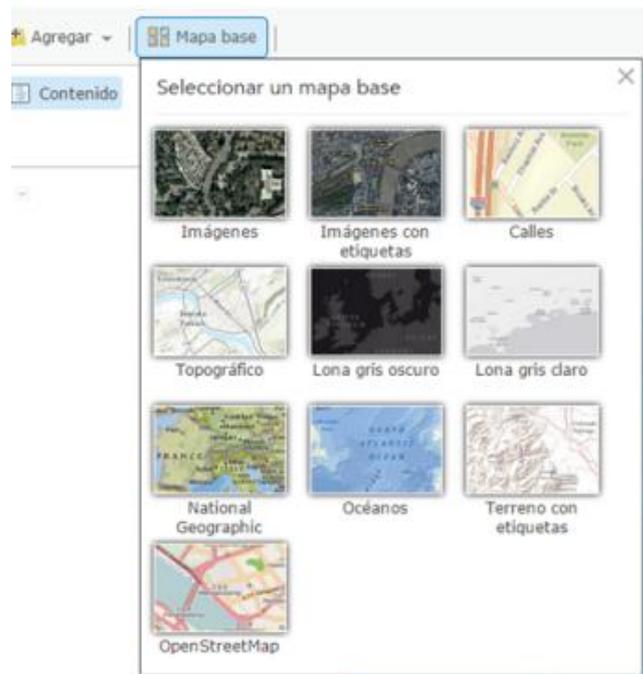
Figura 10.76 Administración de usuarios SIG en línea¹²⁰

Paso 3. Carga y publicación de los mapas digitales de interés

La creación de mapas es un proceso simple, ya que se pueden incorporar capas desde archivos *shape* utilizando un comprimido tipo zip o un archivo de texto delimitado.

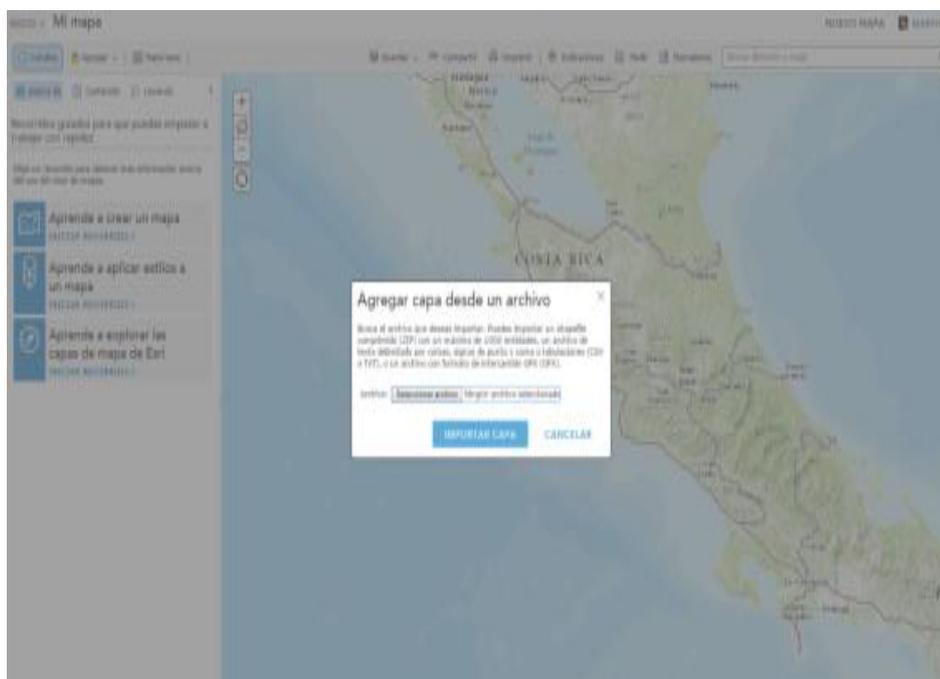
Igualmente es simple utilizar las siguientes opciones:

¹²⁰ [Ver como se puede crear una cuenta en ArcGIS online](#)



Con la posibilidad de establecer un mapa base de la biblioteca disponible:

Los archivos que se importen desde una localidad del computador o desde una publicación de un servicio de mapa que se hace directamente desde ArcGIS Desktop.



Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.77 Vista Mapa desde Sitio Administración SIG en línea¹²¹

¹²¹ [Ver ejemplo primeros pasos en ArcGIS online](#)

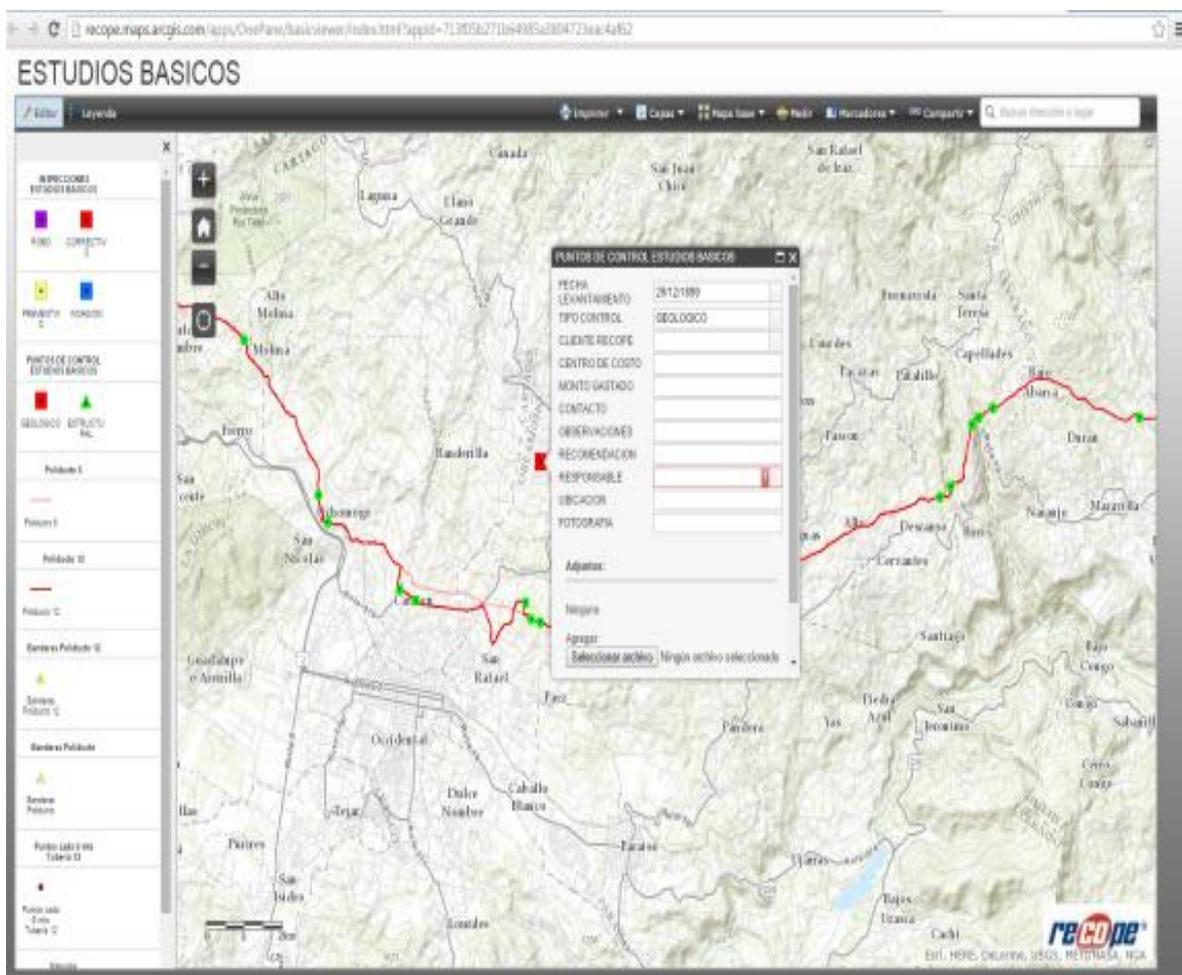


Publicaciones de servicios para RECOPE

La publicación de un servicio de mapas es simple desde ArcGIS desktop a ArcGIS online. RECOPE ha logrado publicar varios escenarios de datos para consulta y configurado tres aplicaciones para la recolección de datos de campo en tiempo real. Los servicios actuales disponibles para recolección de datos, y las aplicaciones relacionadas, son las siguientes:

1. **Estudios básicos:** brindar a los usuarios la posibilidad de cargar en una geodatabase, con un formulario de datos preestablecido, datos de campo relacionando dos temas: a) Inspecciones de campo para registro de robos, invasiones en línea de tubería, inspección correctiva e inspección preventiva; y b) puntos de control de campo geológico o estructural.

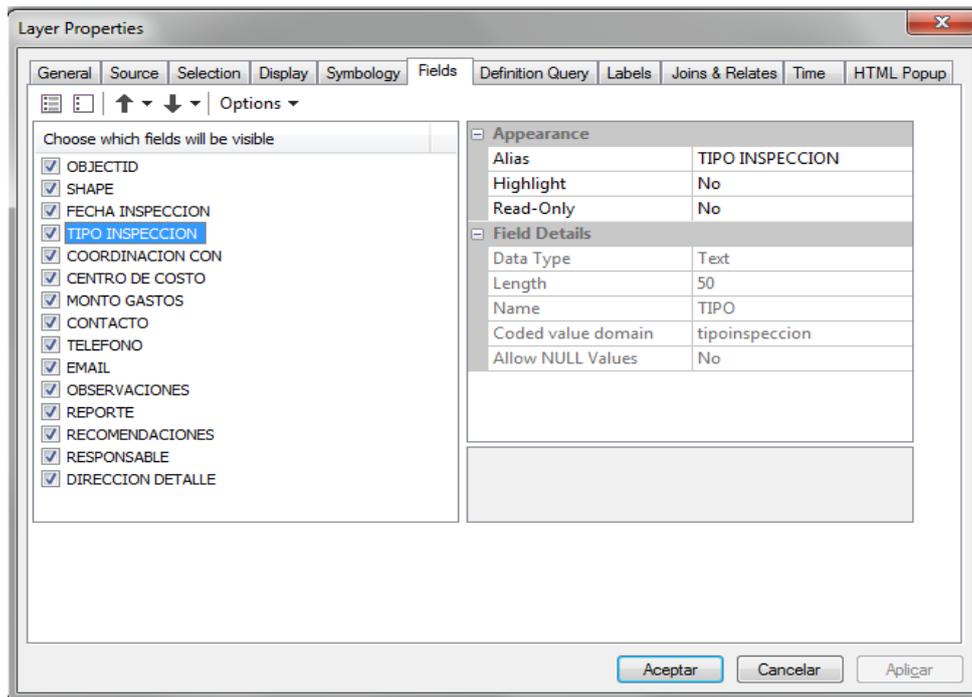
Vista de la aplicación desde el computador.



Fuente: SIG RECOPE.

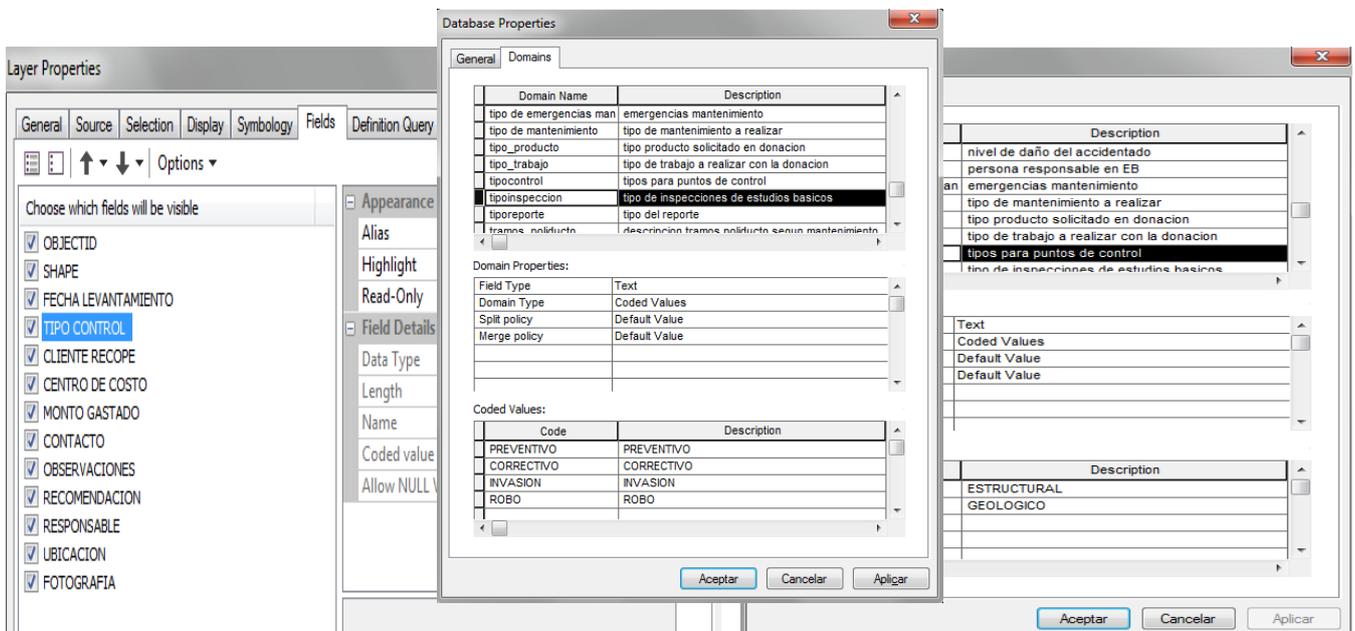
Figura 10.78 Aplicación SIG en línea. Registro de Datos. Estudios Básicos

Este servicio, carga los datos de robo, invasión, inspección correctiva e inspección preventiva y puntos de control de tipo geológico o de tipo estructural. Un ejemplo del formulario de recolección de datos es el siguiente:



En la figura anterior, los cambios son creados y se configura el dominio en la base de datos para aquellos que aplica, en el caso del campo TIPO_INSPECCION tiene un dominio que permite una lista de selección con los campos como se indicó anteriormente PREVENTIVO, CORRECTIVO, INVASION O ROBO.

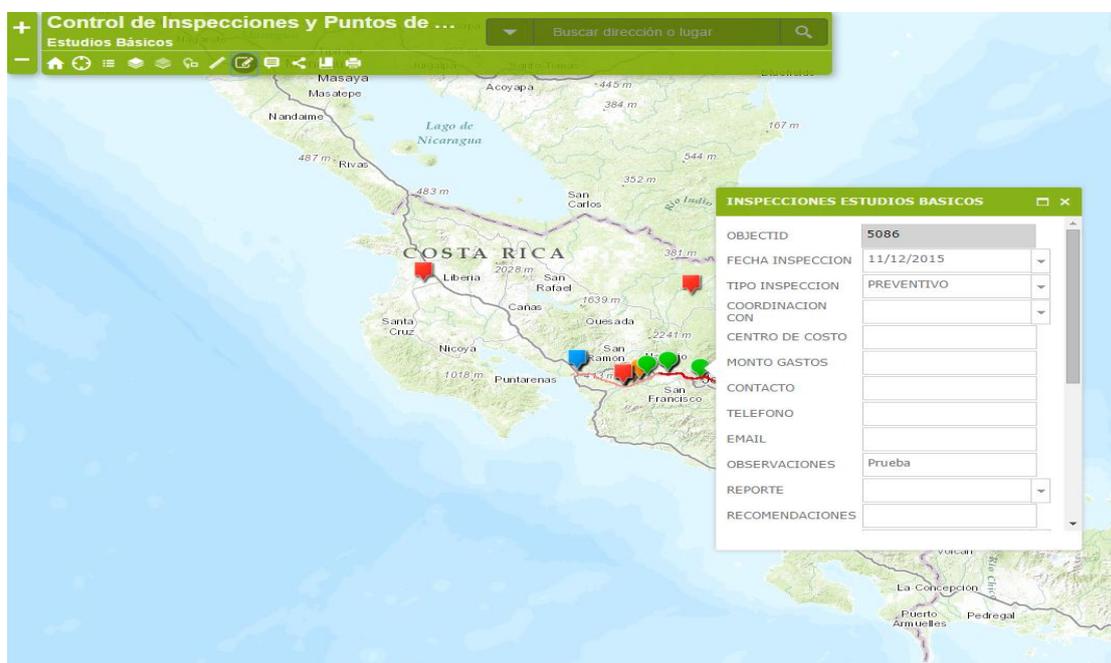
Para el tema *Puntos de Control*, los campos son los siguientes:



En la figura anterior, se crean los cambios y se configura el dominio en la base de datos para aquellos que aplica, en el caso del campo TIPO_CONTROL, tiene un dominio que permite una lista de selección con los campos ESTRUCTURAL O GEOLOGICO.



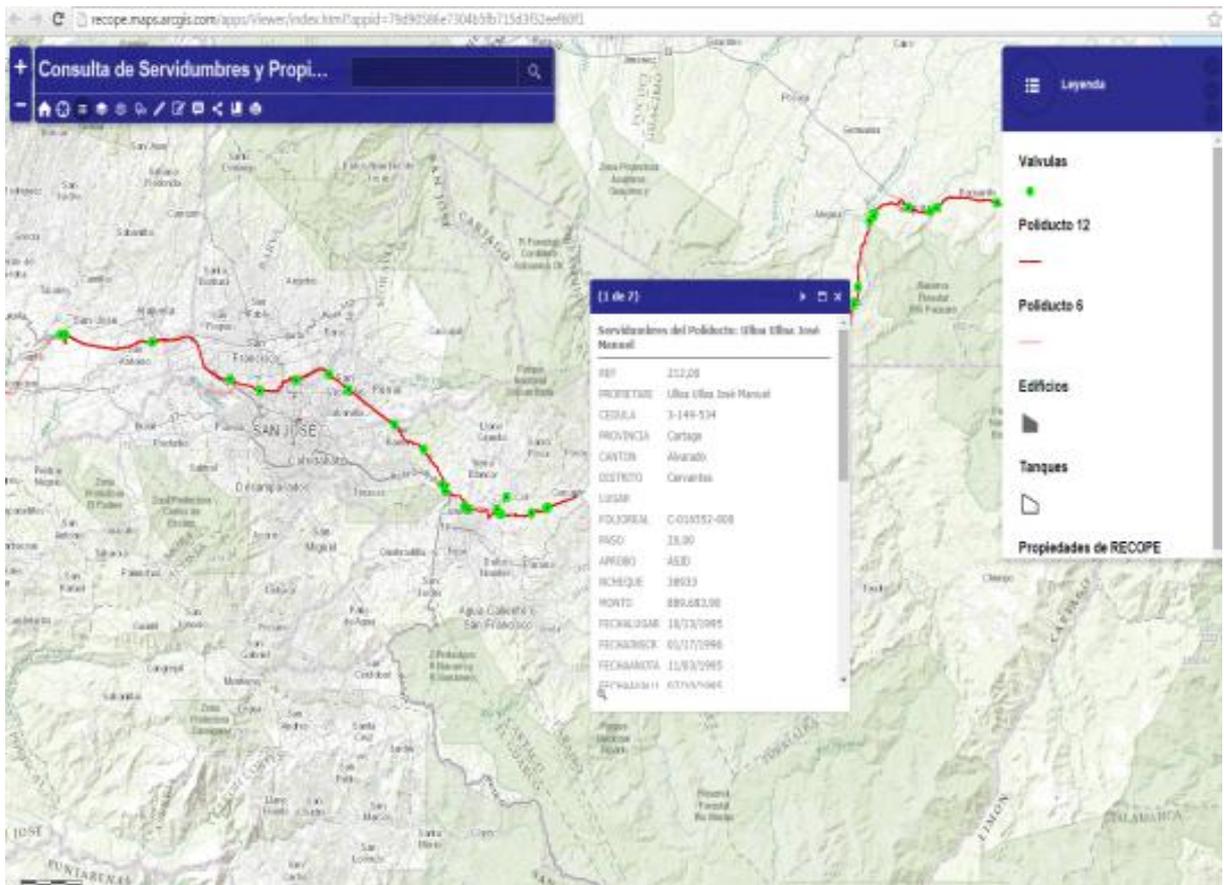
En la figura siguiente (Figura 10.79) se muestra la forma de edición desde la aplicación para acceso Web, desde un PC o una tableta.



Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.79 Aplicación SIG en línea. Control Inspecciones

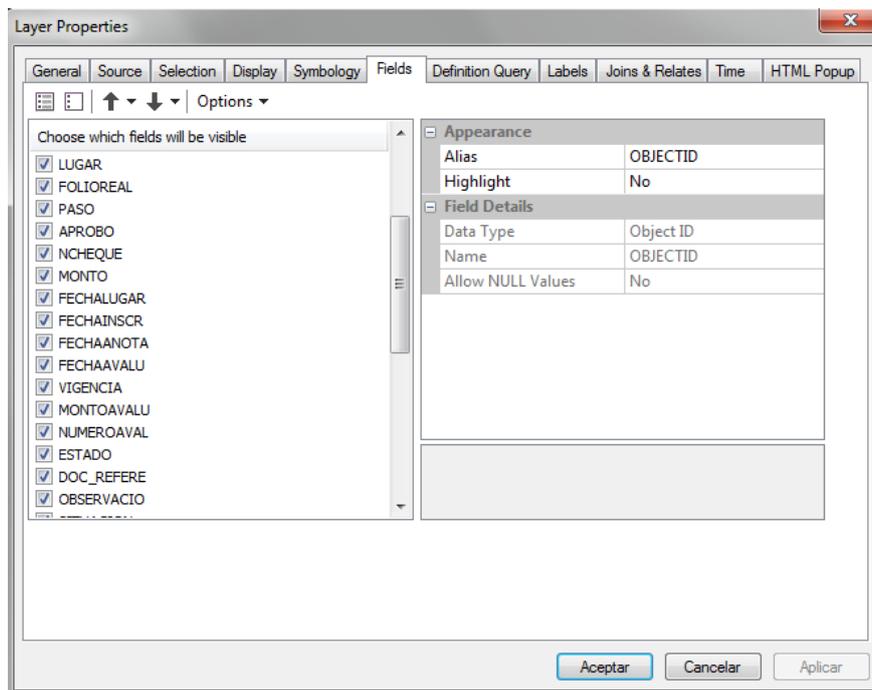
2. **Servidumbres y propiedades:** la gestión de las servidumbres y propiedades vía GIS online le permite a los usuarios que controlan y gestiona esta información, entre otra, informar rápidamente del estado de una servidumbre, actualizar el status de una servidumbre que está en proceso de registro, pago, u otro.



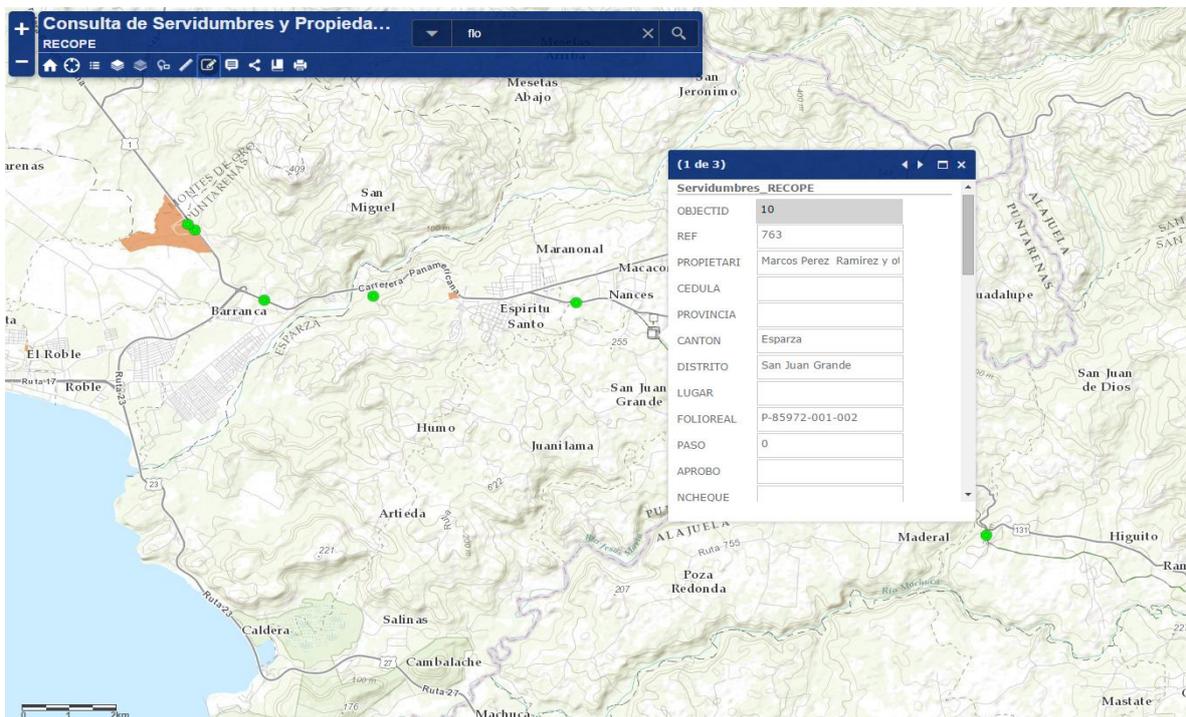
Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.80 Aplicación SIG en línea. Registro de datos de servidumbres y propiedades

La tabla de datos contiene los siguientes campos, los cuales son administrados desde el sitio en el campo o son actualizados directamente desde la tableta, haciendo uso del servicio.



En la figura siguiente se muestra la forma de edición desde la aplicación para acceso web, desde un PC o tableta.



Fuente: SIG RECOPE.

Figura 10.81 Aplicación SIG en línea. Registro de servidumbres y propiedades



Se puede acceder a todas estas aplicaciones y los escenarios de consulta, mediante tabletas, teléfonos inteligentes, GPS (con acceso a internet) y computadoras, lo que hace de esta herramienta un poderoso aliado para el trabajo.



Fuente: ESRI (www.esri.com).

Figura 10.84 Herramientas de acceso a SIG en línea¹²²

Adicionalmente, GIS online ofrece una cantidad considerable de posibilidades de publicación y desarrollo de forma simple, ofreciendo alta disponibilidad, seguridad, confiabilidad, accesibilidad, y una plataforma de consulta robusta y muy eficiente¹²³.

¹²² [Ver ¿cómo publicar un servicio de mapa web?](http://resources.arcgis.com/es/help/tutorials/01z30000007000000.htm) <http://resources.arcgis.com/es/help/tutorials/01z30000007000000.htm>

¹²³ [Ver más detalles aquí:](http://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/reference/faq.htm) <http://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/reference/faq.htm>



11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agencia Meteorológica - Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Manual de uso de términos meteorológicos. España.
http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/prediccion/comun/Manual_de_uso_de_terminos_met_2015.pdf
2. Almeida, M. S. S., Almeida, M. C. F., Lacerda W. A., Marques, M. E. S., Oliveira, J. R. M. S., Freitas, N. C. (2003) - Projeto CT-Petro – GEODUTO – Estudos Geotécnicos de Dutos Enterrados. Brasil.
3. Altaee, A., Boivin, R. (1995). Laterally Displaced Pipelines: Finite Element Analysis. ASME - OMAE Pipeline Technology. Vol. V, págs. 209-216.
4. American Society of Civil Engineers – ASCE (1996). Pipeline Crossings. Nueva York, EE.UU.
5. American Society of Civil Engineers – ASCE (1998). Pipeline Route Selection for Rural and Cross-Country Pipelines. Virginia, EE.UU.
6. American Society of Mechanical Engineers - ASME (2010). Managing System Integrity of Gas Pipelines. Nueva York, EE.UU.
7. American Petroleum Institute - API (2013). Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines. Washington, EE.UU.
8. Amórtegui, José (2013). Neotectónica en corredores de líneas de transporte de hidrocarburos – Necesidad de un estudio detallado. 1ª Conferencia ASME Internacional de Ductos IPG2013-1907. Bogotá, Colombia.
9. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2009). <http://www.anp.gov.br>.
10. ARPEL (2010). Normas para la administración ambiental del diseño, construcción, operación y mantenimiento de Oleoductos. Montevideo, Uruguay.
11. ARPEL (2014). Taller “Monitoreo e Inspección en la Gestión de Integridad de Ductos frente a las Geoamenazas”, 20-21 de octubre - Cartagena de Indias, Colombia.
12. Banco Mundial: www.bancomundial.org
13. Bruschi, R., Spinazze, M., Tomassini, D., Cuscuna, S., Venzi, S. (1995). Failure Modes for Pipelines in Landslide Areas. ASME - OMAE Pipeline Technology. Vol. V, págs. 65-78.
14. Calderón, Marvin (2006). Evaluación del Sistema de Información Geográfica como herramienta de apoyo a la toma de decisiones de la Gerencia de Comercio Internacional y Desarrollo de RECOPE. San José, Costa Rica.
15. Cappelletto, A., Tagliaferri, R. (1998). Field Full Scale Tests on Longitudinal Pipeline Soil Interaction. ASME International Pipeline Conference. Vol. II, págs. 771- 778.
16. COGA (2014). Información Técnica. Base de datos GIS y documentación de áreas de Integridad y Geotecnia. Lima, Perú.
17. Cohen, D. (2000). Sistemas de Información para los Negocios: Un enfoque para la toma de decisiones. Mc Graw-Hill. México.
18. Creiform (2013), Pipecheck, Solución de Escaneado en 3D para la Evaluación de la Integridad de Tuberías.
19. Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). “Landslide Types and Processes”. Chapter 3 of: Turner A.K., Schuster R.L. (Editors). Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., EE.UU.



20. Department of Transportation – DOT (2014). Título 49, Transportation. Parte 195.452 y Anexo C. EE.UU.
21. Diccionario de la Lengua Española (2002). Matiew Crom. España.
22. Dimaté, C., Arcila, M. (2006). Amenaza Sísmica sobre Bogotá: ¿leyenda o realidad? Revista Innovación y Tecnología, Volumen XIII N°4. Asociación Colombiana para el avance de la ciencia. Colombia.
23. Editorial Océano (1994). Enciclopedia Océano Color, tomos 1-6.
24. Elmasri, R. (1997). Sistemas de Bases de Datos: Conceptos Fundamentales, Editorial Wesley. EE.UU.
25. Encarta (2005). Enciclopedia digital, Microsoft Corporation, Biblioteca de Consulta.
26. ECOPETROL (1997). Normas de Ingeniería de Oleoductos – NIO. Bogotá, Colombia.
27. ECOPETROL (2008, 2009). Inspección visual del DDV del corredor Apiay – Porvenir. Colombia.
28. Enrique Arroyabe (2005). Monografías: Sistemas de Información Geográfica. <http://www.monografias.com/trabajos81/software-aplicado-base-datos-y-sistemas-informacion-geografica/software-aplicado-base-datos-y-sistemas-informacion-geografica2.shtml>.
29. Flórez, Antonio (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Red de estudios de Espacio y Territorio. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
30. Fookes, et al. (2000). Total geological history: A model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. Ervin, MC. Conferencia GeoEng2000. Melbourne, Australia.
31. Freitas, N. C. (2004). Estudos dos Movimentos de um Colúvio no Sudeste Brasileiro. COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil.
32. García-López, Manuel (2000). Técnicas de Estabilización. II Curso Panamericano de Movimientos de Masas, Asociación Costarricense de Geotecnia, San José, Costa Rica.
33. García-López, M. (2003). Conceptos básicos sobre la prevención y corrección de movimientos de falla de taludes. 52 págs. Bogotá, Colombia.
34. García-López, M. (2008). Relaciones entre el hombre y el medio ambiente en términos de los riesgos inducidos por deslizamientos. Adaptación de Panizza (1999) a ambientes tropicales. 5 págs. Bogotá, Colombia.
35. García-López, Manuel (2011). Evaluación del riesgo geológico-geotécnico del trazado del Loop Sur. Trabajo N° 2323 de Ingeniería y Geotecnia Ltda., realizado para TECHINT – Compañía Técnica Internacional. Bogotá, Colombia.
36. García-López, M. (2012). Sismicidad en ductos. COGA - I Encuentro de Geología y Geotecnia para Ductos. Julio - Lima, Perú.
37. García-López, M. (2014). Amenaza de los Lahares sobre la integridad de ductos. COGA - II Encuentro de Geología y Geotecnia para Ductos. Septiembre -Lima, Perú.
38. García-López, Manuel, Moya Barrios, Julio y Cañón Barriga, Julio (1998). Manual de Estabilidad de Taludes. Instituto Nacional de Vías de Colombia. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.
39. Giusti, E.V. (1984). An Overview of Hydrologic Hazards. Proceeding of the Geologic and Hydrologic Hazards Training Program – Hydrologic Hazards. United States Geological Survey, Reston, Virginia, EE.UU.
40. Gray D.H., A.T. Leiser (1982). Biotechnical Slope Protection and Erosion Control. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, EE.UU.
41. Gray, D.H., Sotir, R.B. (1996). Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. A Practical Guide for Erosion Control. John Wiley & Sons, Nueva York, EE.UU.
42. Grupo de Análisis de Integridad de ductos (2003). Curso de integridad mecánica. convenio PEP-IPN. propuesta por Subgerencia CTO, PEP RN.



43. Highland, L.M., Bobrowsky, Peter (2008). The landslide handbook — A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey (USGS), Circular 1325. Virginia, EE.UU.
44. Howell, J.H. et al (1991). Vegetation Structures for Stabilizing Highway Slopes. A Manual for Nepal. UK/Nepal Eastern Region Interim Project, Katmandú, Nepal.
45. HRB-Highway Research Board (1973). Erosion Control on Highway Construction. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice N°18. National Academy of Sciences, Washington D.C., EE.UU.
46. Inbio (2005). Catálogo de Conceptos. Unidad de Sistemas de Información Geográfica. <http://www.inbio.org>.
47. Investigaciones Topográficas (2005). <http://www.topografiajuanda.galeon.com/productos1492806.html>
48. IGAC (2009). Instituto Geográfico Agustín Codazzi, S.I.G. <http://www.igac.gov.co/igac>. Colombia.
49. Ingeniería y Geotecnia Ltda. (1991). Manual de Protección Geotécnica y Ambiental – Oleoducto de Colombia, Vasconia-Coveñas. ECOPETROL-HOCOL, Bogotá, Colombia.
50. Ingeniería y Geotecnia Ltda. (1992). Estudio geotécnico y del trazado, elaborado para CHEVRON. Oleoducto Apiay – El Porvenir - 16. Trabajo IGL-1225. Bogotá, Colombia.
51. Ingeniería y Geotecnia Ltda. (2007). Diseño geotécnico e hidráulico de los cruces de los ríos Ocoa, Guatiquia, Guacavía, Humea y Upia del oleoducto de 20” entre Apiay - Monterrey - El Porvenir. Elaborado para ECOPETROL. Trabajo IGL-2213. Bogotá, Colombia.
52. INGEOMINAS (2003). Informe técnico sobre la visita de emergencia a las inspecciones de San Pedro – Arenal y Guajaray – Municipio de Medina – Departamento de Cundinamarca. Bogotá, Colombia.
53. INGEOMINAS (2008). Informe Preliminar N°2. El sismo de Quetame del 24 de mayo de 2008. Aspectos sismológicos y evaluación preliminar de daños. Bogotá, Colombia.
54. Kiefner & Associates Inc. (2006). Recommended Strain Levels for monitoring OCENSA Pipelines.
55. Kockelman, W.J. (1984). Techniques for Reducing Landslide Hazards. Proceeding of the Geologic and Hydrologic Hazards Training Program – Landslide Hazards. United States Geological Survey. Reston, Virginia, EE.UU.
56. Krynine & Judd (1957). Principles of Engineering Geology and Geotechnics. McGraw-Hill Book Company Inc., Nueva York, EE.UU.
57. Lacerda, W. A. (2004). The Behavior of Colluvial Slopes in a Tropical Environment. Landslides Evaluation & Stabilization. Vol. 2, págs. 1315-1342.
58. Lacerda, W. A. (1997). Stability of Natural Slopes Along the Tropical Coast of Brazil. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, págs. 17-40, Balkema. Río de Janeiro, Brasil.
59. Ministerio de Energía y Minas (2007). Decreto Supremo N°081-2007-EM. Reglamento de Transporte de Hidrocarburos por Ductos. Perú.
60. Moya, M., Soares, J. P. Bonini, L. H., Sousa, A. (2008). Paralisação, desvio de Oleoduto e Construção de Cortina devido ao Movimento do Solo – OLAPA km 54 – Morretes - PR. XIV COBRAMSEG: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Río de Janeiro, Brasil.
61. Nunes, F.G. (2002). Levantamento de Áreas de Riscos a Partir da Dinâmica Geoambiental das Encostas da Serra do Mar no Paraná. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
62. Oliveira, H. R. (2005). Gerenciamento da integridade de dutos: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de Transmissão. UFSC, Santa Catarina, Brasil.
63. Panizza M. (1999). Relationships Between Environment and Man in Terms of Landslide Induced Risk. Cap. 12 de Casale R. y Margottini C. (Editores) Floods and Landslides – Integrated Risk Assessment.



64. PNUD-ECOPETROL (2014). Gestión de riesgos tecnológicos. Proyecto desarrollado por el Programa de Desarrollo de Naciones Unidas con la Vicepresidencia de Transporte y Logística de ECOPETROL. Bogotá, Colombia.
65. Popescu M. (1994). A suggested method for reporting for reporting landslide causes. Bulletin of the international association of engineering geology". N°50. 71-75.
66. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas (2007). Movimientos en masa de la región andina: Guía para la evaluación de Geoamenazas. Publicación Geológica Multinacional N°4 (PGM-4). Canadá.
67. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas (2009). Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Publicación Geológica Multinacional N°7 (PGM-7). Canadá.
68. Rajani, B.B., Robertson, P.K., Morgenstern, N.R. (1993). A Simplified Design Method for Pipelines Subject to Transverse Soil Movements. ASME - OMAE Pipeline Technology. Vol. V, págs. 157-165.
69. Reading, H.G. (1986). Desert Aeolian Systems.
70. Scarpelli, G., Sakellariadi, E., Furlani, G. (1999). Longitudinal Pipeline Soil Interaction: results from Field Full Scale and Laboratory Testing. Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Barends et al. Págs. 1-9. Rotterdam, Países Bajos.
71. Search Teach Target (2005). Diccionario de términos técnicos e informáticos <http://whatis.techtarget.com>.
72. Senn, J. (1992). Análisis y Diseño de Sistemas de Información, Mc Graw-Hill. México.
73. SIGSA. Desarrollo de proyectos S.I.G. <http://sigsa.info>. México.
74. Simkin, et. al. (2006). This dynamic planet-World map of volcanoes, earthquakes, impact craters and plate tectonics. U.S. Geological Survey (USGS), Map I-2800.
75. Slingerland, R. & N. D. Smith (1998). Necessary conditions for a meandering-river avulsion. Geology (Boulder). 26, 435-38.
76. Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. División editorial y de publicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
77. Suárez, J. (2009). Deslizamientos. División editorial y de publicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
78. Suzuki, S. (2004). Propriedades Geomecânicas de Alguns Solos Residuais e Coluviais ao longo do Oleoduto Curitiba-Paranaguá. COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil.
79. Suzuki, S., Lacerda, W. A., Amaral, C. S., Sandroni, S. S. (2005). Slide interacting with a buried pipeline in southern Brazil. 16 ICSMGE: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka. Vol. 3, págs. 2583-2586.
80. Topo Mundo (2005). Investigaciones Topográficas. <http://www.topom.org/inver1/proyec/proyec.html>.
81. Trigg, A., Rizkalla, M. (1994). Development and Application of a Closed form Technique for the Preliminary assessment of Pipeline Integrity in Unstable Slopes. ASME - OMAE Pipeline Technology. Vol. V, págs. 127-139.
82. U.S. Geological Survey (USGS). Ecosystems Mapping. <http://rmgsc.cr.usgs.gov/ecosystems/usa.shtml>. EE.UU.
83. Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster, R.J. Krizek, Eds.) TRB, National Research Council. Washington D.C., EE.UU.
84. Varnes, D.J. (1984). Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO, 63 págs. Paris, Francia.



85. Wikipedia (2005). Conceptos sobre Sistemas de Información Geográfica. https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_informaci3n_geogr3fica.
86. YPFB Transporte (2009). Gestión de Integridad de Ductos Expuestos a Geopeligros, Integridad de Ductos. Santa Cruz, Bolivia.
87. YPFB Transporte (2011). Informe de Evaluación de Geopeligros, Plan de Acción, Ducto OCC, Integridad de Ductos. Santa Cruz, Bolivia.
88. YPFB Transporte (2013). Informe de Evaluación de Obras Ducto OCC, Integridad de Ductos. Santa Cruz, Bolivia.
89. YPFB Transporte (2015). Instructivo de Trabajo de Mantenimiento ITM 118, Trabajos de Análisis de Riesgos de Ductos Expuestos a Geopeligros. Santa Cruz, Bolivia.



MEJORES PRACTICAS

Guía Monitoreo e inspección en la gestión de integridad de ductos frente a las geoamenazas



ASOCIACIÓN REGIONAL DE EMPRESAS DEL SECTOR
PETRÓLEO, GAS Y BIOCOMBUSTIBLES
EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE.

ARPEL es una asociación sin fines de lucro que nuclea a empresas e instituciones del sector petróleo, gas y biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe. Fue fundada en 1965 como un vehículo de cooperación y asistencia recíproca entre empresas del sector, con el propósito principal de contribuir activamente a la integración y crecimiento competitivo de la industria y al desarrollo energético sostenible en la región.

Actualmente sus socios representan más del 90% de las actividades del upstream y downstream en la región e incluyen a empresas operadoras nacionales, internacionales e independientes, a proveedoras de tecnología, bienes y servicios para la cadena de valor, y a instituciones nacionales e internacionales del sector.



Sede Regional:

Javier de Viana 1018. CP 11200, Montevideo, Uruguay
Tel.: +(598) 2410 6993 | info@arpel.org.uy

www.arpel.org