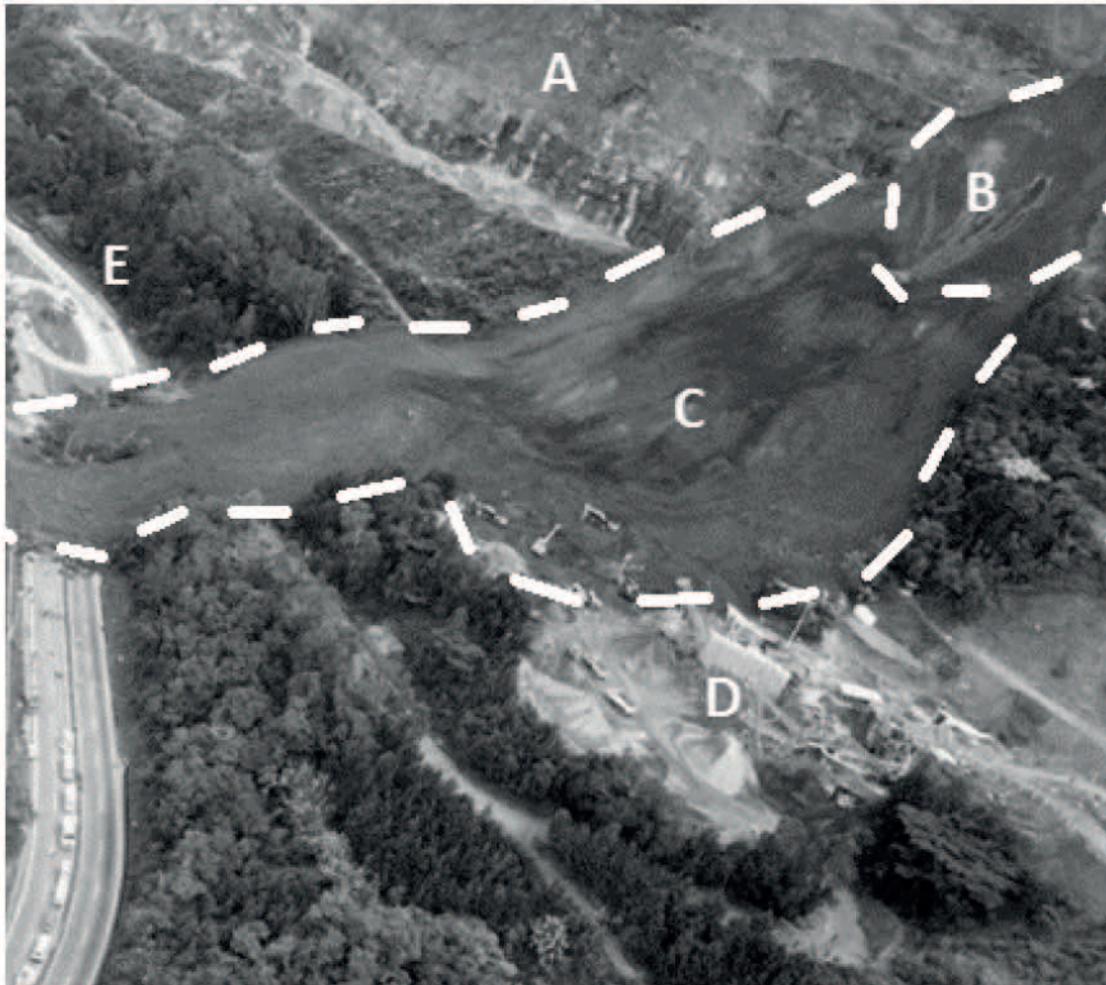


BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 48, Febrero - Julio 2020

ISSN 0120 - 3630



Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido en la Cantera
Las Nieves, municipio de Copacabana
Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez & María Fernanda Aristizábal-Arboleda

TARIFA POSTAL REDUCIDA No. 2015-456 . 4-72
La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2020



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

**BOLETIN
DE
CIENCIAS DE LA TIERRA**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

CONTENT

Editorial - The new stage of the Boletín de Ciencias de la Tierra Antonio Romero-Hernández	i
Quality assessment in the supply chain of copper mining in Chile Orlando Gahona-Flores	5
Technical analysis on the causes of the mass movement occurred in "Las Nieves" Quarry, city of Copacabana Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez & María Fernanda Aristizábal-Arboleda	12
Sequential stratigraphy of the Guajira Lower Sub-basin Luis Antonio Castillo-López & Thais de Souza Kazmierczak	23
Site characterization using geophysical and geotechnical Prospecting. Case study main road North Central Trunk (National Route 55) at Km 68 + 500 in the Municipality of Pamplona, North of Santander, Colombia Anyelo José Moya-Gutiérrez, Jairo Alberto Torres-Peña & Manuel Contreras-Martínez	30

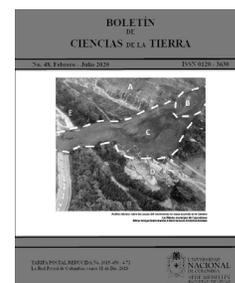
Our cover

Image alluding to Article:

Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido en la Cantera Las Nieves, municipio de Copacabana

Authors:

Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez & María Fernanda Aristizábal-Arboleda



CONTENIDO

Editorial

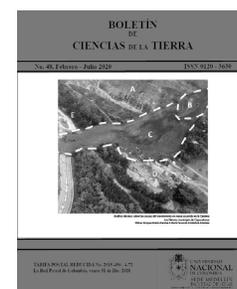
Antonio Romero-Hernández	i
Valoración de la calidad en la cadena de suministro de la minería del cobre en Chile Orlando Gahona-Flores	5
Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido en la Cantera Las Nieves, municipio de Copacabana Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez & María Fernanda Aristizábal-Arboleda	12
Estratigrafía secuencial de la Sub-cuenca de la Baja Guajira Luis Antonio Castillo-López & Thais de Souza Kazmierczack	23
Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica. Caso de estudio vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia Anyelo José Moya-Gutiérrez, Jairo Alberto Torres-Peña & Manuel Contreras-Martínez	30

Nuestra carátula

Imagen alusiva al artículo:
Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido en la Cantera Las Nieves, municipio de Copacabana

Autores:

Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez & María Fernanda Aristizábal-Arboleda



Editorial

La nueva etapa del Boletín de Ciencias de la Tierra

En el marco de la celebración de las relaciones Francia/ Colombia del año 2017, se realizaron varios procesos y eventos en ambos países, en diferentes actividades académicas, culturales y políticas; algunas de ellas ocurrieron en Medellín. Igualmente, en el marco del PREFALC, Programa de apoyo a la formación e investigación en cooperación internacional de nivel de maestría, mediante el cual el gobierno francés financia las universidades francesas y sus pares en América Latina y el Caribe, se construyeron lazos de cooperación y trabajo entre las universidades de Toulouse Jean Jaurès y la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

La cooperación universitaria en el nuevo contexto de cooperación internacional, plantea a las universidades, poner en acción un enfoque flexible y colaborativo para intercambiar, cruzar y desarrollar conocimientos y experiencias, centrar la atención en problemas y en el diseño de soluciones. En esta dirección con la asesoría y orientación de investigadores del Cieu de Toulouse, se creará en la Facultad de Minas un **“Laboratorio de Nuevas Ciencias y Tecnologías de Territorios y Ciudades Inteligentes”**, con las tecnologías digitales, en un marco de cooperación entre la Universidad Nacional de Colombia, sus pares internacionales, instituciones educativas nacionales, gobiernos locales y departamentales, ONG y comunidades, en los siguientes temas:

Hábitat, conectividad y energía. *Las nuevas tecnologías y en especial el internet de las cosas, IoT, aplicadas a la calidad de vida, el urbanismo, la salud, la cultura y la educación; el aprovechamiento y disfrute de los espacios y bienes comunes por parte de la población y grupos sociales; la gestión de residuos, materiales y movilidad. En especial el apoyo a la co-construcción de escenarios, estrategias y diseño de obras de interés común, el aprovechamiento de energías sostenibles, y los nuevos materiales de la industria y energía.*

La transformación tecnológica de las PyMES: *La introducción de las nuevas tecnologías en las PyMES de las cadenas agroalimentarias, materiales de construcción, transporte y servicios. En especial el apoyo a la remotización, la automatización, la robótica, la digitalización, el Internet de las Cosas y la interoperabilidad, en los diferentes procesos y áreas relacionadas.*

La innovación debe ir acompañada de la generación de valor, la cual apunta a producir una serie de transformaciones en la industria, por medio de un sistema de innovación abierta.

Las nuevas competencias: *Otra necesidad, que impone el actual escenario, es la calificación y adquisición de nuevas competencias por parte del capital humano. Es decir, aumentar las habilidades asociadas a las capacidades relacionadas con la automatización, la teleoperación y la implementación de las innovaciones tecnológicas,*

Gestión de riesgos: *Preparar el territorio para realizar la gestión de riesgos, como área integradora del Laboratorio. Significa usar las tecnologías digitales y las ciencias del territorio, para hacer gestión de amenazas y disminuir la vulnerabilidad en la salud y el hábitat, la infraestructura, los ecosistemas y en especial la atención del sistema del río Atrato como sujeto de derecho.*

En Revista Boletín de Ciencias de la Tierra. Se pondrá en marcha un proceso para fortalecer el actual Boletín de ciencias de la Tierra, cuyo contenido temático sea el desarrollo del *Laboratorio de nuevas ciencias y tecnologías de territorios y ciudades inteligentes*.

Plataformas y Revista

El Laboratorio se sustenta en que todas las ciencias confluyen en el territorio; las tecnologías digitales y las ciencias de la complejidad se articularán con la geografía, las ciencias de la tierra y ambientales, la economía y las ciencias sociales entre otras, para formar un nuevo sistema de conocimiento y aprovechamiento territorial, innovación y creación de valor de las oportunidades que allí se generan.

Plataforma de ciencias y técnicas del Territorio

El territorio es un concepto utilizado por la ciencia geográfica para definir el espacio organizado por la sociedad. Es el espacio en el que se desenvuelven los grupos humanos en su interrelación con el medio ambiente, por consiguiente, es una construcción social. El laboratorio desarrollará especialmente la cartografía inteligente como disciplina que integra ciencia, técnica y arte, que trata de la representación del Territorio, su ordenamiento y aprovechamiento.

Esta Plataforma se cimentará en el SIGET, Sistema de Innovación y Gestión Económica del Territorio, como un *Sistema de Información Geográfica* referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. El SIGET articula la Economía, con la Geomática, en el uso de tecnologías geospaciales usadas en la cartografía y la topografía, como la teledetección, la fotogrametría, la hidrografía, la climatología y la hidrología; apoyadas con el uso de técnicas informáticas, como los SIG, los sistemas de posicionamiento global, bases de datos espaciales o herramientas CASE, *Computer Aided Software Engineering*, entre otros.

Con la expansión de las tecnologías de posicionamiento satelital o georreferenciación, se presentarán avances en los negocios del territorio en especial en la construcción y agricultura.

Mediante el desarrollo de herramientas de gestión dirigidas a un monitoreo automático y continuo, y en tiempo real de las producciones, se aplican principios de la ingeniería para optimizar los procesos de producción y gestión, reproducción, salud animal y bienestar e impacto en el medioambiente.

Ecosistema de innovación ciudad – territorio

El desarrollo de un ecosistema de innovación permitirá entre otros beneficios, la generación, transferencia y adopción de las nuevas tecnologías digitales (TD). Estas TD, a su vez, están permitiendo la transformación y la revolución productiva en todos los sectores de la economía. En particular es necesario asegurar sus cadenas de alimentos, la movilidad y la gobernanza. Así mismo que en los sectores productivos agropecuario y de materiales de construcción, en la gestión de riesgos, los avances tecnológicos del internet de las cosas “*Internet of Things*” (IoT) buscarán dos tipos de intervenciones: a) Utilizar los sistemas de posicionamiento satelital (GPS), para la organización de la información y agregar valor a los datos; y b) Transferir la información entre los diferentes componentes mediante el uso de nuevas tecnologías digitales y el desarrollo de aplicaciones, *BID, 2018. Apoyo al financiamiento de Internet de las cosas y nuevas tecnologías para la mejora de la productividad en América Latina y el Caribe*.

Esta plataforma se propone la aplicación de las TD en el estudio, gestión, diseño, aprovechamiento y usos del Territorio. Partirá de una metodología de diagnóstico de la demanda y la oferta, de desarrollo y adopción de TD. Se diagnosticarán los requerimientos de TD para la mejora de la innovación, las competencias y la productividad de las

actividades económicas, el desarrollo de la infraestructura y la gestión del riesgo. Las cadenas productivas también pueden beneficiarse de la generación de mayor y mejor conocimiento sobre sus demandas y ofertas tecnológicas, así como sus requerimientos financieros. Esta plataforma permitirá integrar en un ecosistema de innovación de las TD a los diferentes actores de la ciudad y el territorio, para la solución de conflictos y creación de valor.

El laboratorio será una oportunidad para que las universidades, el gobierno, las instituciones, los ciudadanos y las empresas interactúen con los proveedores de tecnología y desarrollen procesos de apropiación para optimizar los procesos productivos, gestión, comunicacionales, marketing, ventas y transformación digital de la ciudad y sus territorios. La conectividad entre equipos profesionales del Laboratorio y del contexto institucional externo, configura una red operante que produce y asimila procesos de circulación, auto/organización y materialización de las informaciones y de los conocimientos.

Emprendimiento spin off

El Laboratorio se proyecta como un espacio de creación de spin off, empresas de origen universitario, con base en la gestión del conocimiento, centradas en la innovación, la creación, el cambio y la apropiación tecnológica de los conocimientos, de las prácticas y de los saberes capaces de actuar propositivamente sobre ambientes, estructuras, ecosistemas y escenarios paisajísticos, geográficos, sociales, que caracterizan los sistemas territoriales.

Los espacios de cocreación, son ambiente de aprendizaje y producción interactiva de conocimiento, donde se desarrolla un principio organizacional flexible que ubicará a todos los actores en un plano de funcionamiento horizontal, donde las jerarquías de conocimiento se distribuirán contando con igual posibilidad de participación, pero con actuaciones y responsabilidades distintas en el momento en que entran en contacto con el laboratorio.

Para garantizar el movimiento generador de iniciativas y de operaciones del Laboratorio, se concibe un sistema técnico y administrativo concordante. Este documento, propone un rediseño de la oficina de proyectos en un Laboratorio, perfilado con criterios que permiten la oportunidad y la eficiencia de las respuestas a las propuestas; la evaluación y ajuste de los procesos y de los procedimientos académicos; la implementación de un sistema de gestión de la calidad acordados con el propósito de la certificación de calidad ISO 9001.

El Boletín de Ciencias de la Tierra

Será el instrumento para el diálogo entre los diferentes grupos de la nueva red que se está gestando, tiene una historia asociada a la Facultad de Minas de La Universidad Nacional de Colombia. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>

En esta nueva etapa se propone mantener el Editorial, con trabajos escritos por encargo del Comité Editorial, o bien, redactados por alguno de sus miembros. Igualmente, los tradicionales Artículos de Investigación y Ensayos, como trabajos que versen sobre resultados de investigaciones o ensayos en las áreas de las ciencias de la Tierra y el Territorio. Por último, se mantendrán los Artículos de Reflexión, documentos que presentan resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre temas específicos de las ciencias de la Tierra y el Territorio; recurriendo a las fuentes originales.

Antonio Romero Hernández

Profesor Titular - Editor, Revista Boletín Ciencias de la Tierra
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín
E-mail: aromero@unal.edu.co

Quality assessment in the supply chain of copper mining in Chile

Orlando Gahona-Flores

Facultad de Ingeniería, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile. orlando.gahona@uantof.cl

Received: June 28th, 2020. Received in revised form: July 23th, 2020. Accepted: July 25th, 2020.

Abstract

The objective of this research is to generate new knowledge on the assessment of quality in the supply chain of copper mining located in the Antofagasta region in Chile, through the information obtained in the application of a survey to managers of the mining companies in 2018 and deliver recommendations that allow obtaining higher levels of productivity and efficiency in said industry. The results of the investigation show a high assessment of quality by mining companies. Notwithstanding the foregoing, there is also evidence of a lower assessment of the certification of quality standards, such as ISO 9001 and 14001, which generates a discussion on the contribution and validity of quality standards in the development and growth of the mining business.

Keywords: supply chain; quality; ISO standards; copper; Chile.

Valoración de la calidad en la cadena de suministro de la minería del cobre en Chile

Resumen

El objetivo de esta investigación es generar nuevo conocimiento sobre la valoración de la calidad en la cadena de suministro de la minería del Cobre localizada en la región de Antofagasta en Chile, a través de la información obtenida en la aplicación de una encuesta a directivos de las compañías mineras en el año 2018 y entregar recomendaciones que permitan obtener mayores niveles de productividad y eficiencia en dicha industria. Los resultados de la investigación evidencian una alta valoración de la calidad por parte de las compañías mineras. No obstante lo anterior, también se evidencia una menor valoración a la certificación de normas de calidad, tales como la ISO 9001 y 14001, lo cual genera una discusión sobre el aporte y validez de las normas de calidad en el desarrollo y crecimiento del negocio minero.

Palabras clave: cadena de suministros; calidad; normas ISO; cobre; Chile.

1. Introduction

La minería del cobre, es la actividad económica más relevante para Chile. De manera directa, representa más del 10% del PIB, más del 50% de las exportaciones, y es el principal receptor de inversión extranjera directa, representando uno de cada tres dólares que entran al país [8]. La presencia de nuevos capitales foráneos ha impulsado fuertemente el desarrollo de la industria minera, transformando a la región de Antofagasta en la capital mundial de la minería del Cobre [2]. Por ello, no es de

extrañar la incidencia que esta actividad tiene en todo el quehacer de esta zona. Según cifras de COCHILCO [7], en 2016 la región aportó cerca de 3,2 millones de toneladas de cobre a la producción nacional, es decir cerca del 57%. La cadena de suministro en la minería del Cobre en Chile, ha sido identificada como crítico debido a que afecta aproximadamente el 50% de los costos operacionales de las empresas mineras, siendo entonces de alta importancia su entendimiento y optimización [26]. La calidad ha evolucionado rápidamente desde un enfoque centrado en la empresa hasta sistemas complejos de cadenas de suministro.

How to cite: Gahona-Flores, O. Quality assessment in the supply chain of copper mining in Chile. Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 48, pp. 5-11, Febrero-Julio, 2020.

Este cambio de enfoque ha provocado un giro en las prioridades competitivas de muchas empresas, desde sólo la calidad del producto hasta la calidad global de la cadena de suministro [24]. Por otro lado, la investigación en Gestión de Cadenas de Suministro se ha transformado desde un nivel operativo y táctico enfocado en el costo, la entrega y los riesgos, hasta un nivel estratégico más complejo y demandante [27]. El estudio de la teoría y las prácticas de calidad en empresas individuales es usual, pero hay pocas investigaciones sobre cómo incorporar los requerimientos de calidad en el diseño y planeación de cadenas de suministro globales [6,11,31] y cómo vincular estas prácticas y sistemas de gestión con todos los socios de la cadena [4,18,39]. Otros autores como [5] consideran que la calidad es un aspecto poco abordado de la gestión de cadenas de suministro. El objetivo de esta investigación fue generar nuevo conocimiento sobre la valoración de la calidad en la cadena de suministro de la minería del Cobre localizada en la región de Antofagasta en Chile, a través de la información obtenida en la aplicación de una encuesta a directivos de las compañías mineras en el año 2018 y entregar recomendaciones que permitan obtener mayores niveles de productividad y eficiencia en dicha industria. Los resultados de la investigación evidencian una alta valoración de la calidad por parte de las compañías mineras. No obstante lo anterior, también se evidencia una menor valoración a la certificación de normas de calidad, tales como la ISO 9001 y 14001, lo cual genera una discusión sobre el aporte y validez de las normas de calidad en el desarrollo y crecimiento del negocio minero. En la actualidad, en general no hay estudios o investigaciones científicas sobre la valoración de la calidad en las cadenas de suministros, y muy especialmente en la industria minera del cobre. El estudio se divide en cuatro partes: en la primera se presenta la importancia de esta investigación en el contexto de la literatura existente; en segundo lugar, se presenta la metodología que se sustenta como un caso de estudio; en el tercer apartado se muestran los resultados obtenidos y su discusión; y finalmente se presentan las conclusiones que incluyen las recomendaciones, limitaciones del estudio y futuras líneas de investigación.

2. Revisión de la literatura

Según [9] “el concepto de cadena de suministro ha adquirido importancia en el medio empresarial, ya que permite desarrollar un enfoque que incluye a los proveedores, productores y distribuidores que conforman la cadena, permitiendo la satisfacción de las necesidades del cliente a través de la transformación de la materia prima en productos terminados, los cuales son distribuidos a los mismos”. [3], respalda dicha definición, describiendo que la cadena de suministro es “un conjunto de actividades funcionales que se repiten a lo largo del canal de flujo del producto, mediante los cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor al consumidor”. El concepto de cadena de suministro ha adquirido importancia en los últimos

Tabla 1.
Definiciones de cadena de suministro

Autor	Definición
Ganeshan y Harrinson (1995)	“La cadena de suministros es una red de instalaciones y redes de distribución que permiten el aprovisionamiento de materiales, su transformación en productos semiterminados y/o finales que son distribuidos para satisfacer las necesidades de los clientes”.
Ballou (2004)	“Un conjunto de actividades funcionales que se repiten a lo largo del canal de flujo del producto, mediante los cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor al consumidor”.
Mentzer (2004)	“Un conjunto de tres o más empresas conectadas o relacionadas con flujos de productos, servicios, finanzas e/o información desde el suministro hasta el cliente final”.
Correa y Gómez (2009a)	“La cadena de suministros busca añadir valor al cliente, mejorar las relaciones con proveedores, fabricantes, clientes y aumentar las ganancias a los accionistas”.

Fuente: Correa y Gómez (2009)

tiempos como medio para que las empresas aumenten su productividad y competitividad en diversos sectores, dentro del cual se encuentra el minero (ver Tabla 1).

El concepto de cadena de suministro es aplicable a la minería debido a que ésta se compone de un conjunto de empresas las cuales poseen instalaciones, actividades funcionales y sistemas de distribución que buscan entregar minerales a diferentes clientes. Adicionalmente, se debe indicar que en el caso chileno, las cadenas productivas, se asemejan al concepto de cadena de suministro debido a que éstas se conforman por empresas de suministros, exploración, explotación, beneficio, comercialización y consumidores, los cuales generan diferentes relaciones entre ellos, tales como: encadenamientos productivos o aglomeraciones de empresas entre otros, los cuales se enfocan en aumentar la productividad y el aprovechamiento de los recursos minerales [2].

La minería del Cobre, es la actividad económica más relevante para Chile ya que representa más del 10% del PIB, más del 50% de las exportaciones, es el principal receptor de inversión extranjera directa, con un 30% del total de la producción y mantiene un tercio de las reservas conocidas, la mayor a nivel global [8]. En el caso de la minería chilena la importancia de la cadena de suministros es fundamental, pues las empresas mineras han externalizado gran cantidad de funciones a sus proveedores, concentrando sus esfuerzos en el núcleo del negocio, es decir; la propiedad, la operación y gestión de los yacimientos. Por tanto, parte importante del éxito pasado y futuro de la minería chilena depende directamente de la productividad y competitividad de los proveedores [22]. La región de Antofagasta está estrechamente vinculada a la historia y desarrollo de la minería del cobre de Chile. Por ello, no es de extrañar la incidencia que esta actividad tiene en todo el quehacer de esta zona. Según cifras de COCHILCO [7], en 2016 esta región

Tabla 2.
Definiciones de calidad

Autor	Definición
Crosby (1979)	“Ajustarse a las especificaciones o conformidad de unos requisitos”
Deming (1982)	“El grado perceptible de uniformidad y fiabilidad a bajo costo y de acuerdo a las necesidades del cliente”
Feigenbaum (1990)	“Todas las características del producto y servicio provenientes de mercadeo, ingeniería, manufactura y mantenimiento que estén relacionadas directamente con las necesidades del cliente, son consideradas calidad”
Jurán (1993)	“Adecuado para el uso, satisfaciendo las necesidades del cliente”
Real Academia Española (1993)	“Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa que permite apreciarla como igual, peor o mejor que las restantes de su especie”
Sociedad Americana para el Control de Calidad (1997)	“Conjunto de características de un producto, servicio o proceso que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades del usuario o cliente”

Fuente: El Autor

aportó 3,2 millones de toneladas de cobre a la producción nacional, es decir cerca del 57%.

La calidad se concibe como un atributo, una característica o una propiedad que constituye el distintivo de una persona, un bien o un servicio, lo que refleja un acercamiento al concepto de calidad usado por las organizaciones (ver Tabla 2).

Según lo define la norma ISO 9000 versión 2000 la calidad es “el grado en que un conjunto de características inherentes cumple con ciertos requisitos”. Por “conjunto de características inherentes” se entiende todos aquellos rasgos que son propios de un producto o servicio y que lo diferencian del resto, tales como: tamaño, color, peso, material de fabricación, duración, forma, etc. El segundo término de la definición es la expresión “requisitos”, que según la misma norma se define como “la necesidad o expectativa establecida generalmente implícita u obligatoria”. Estos requisitos a diferencia de las características inherentes del producto o servicio, dependen principalmente del cliente o el consumidor final, el cual desea la satisfacción de sus necesidades o expectativas a través del consumo del producto o servicio.

Por lo que respecta a los atributos más evaluados en los proveedores, [21] reportan que la calidad es una de las propiedades más buscadas en los productos que éstos ofertan y es citada en 68 artículos, entre los que se encuentran los trabajos de [25,33,35,36,40,41,1,13,14,20,29,28,32,38]. [19] señala que tanto la calidad y la capacidad técnica y tecnológica usada son los atributos más evaluados, seguidos de la situación financiera y la capacidad de producción que tiene en sus instalaciones.

Las empresas están hoy más conscientes de que la calidad no es un gasto sino más bien una inversión que ciertamente traerá múltiples beneficios, se esfuerzan por obtener altos niveles de calidad para situarse por sobre sus competidores que no lo hacen [23].

3. Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en la región de Antofagasta en Chile, donde se localizan los principales distritos mineros que concentran cerca del 57% de la producción de Cobre en Chile [7]. El enfoque se sustenta como un caso de estudio, el cual se enmarca como una investigación descriptiva, basada en la búsqueda de información, con el propósito de obtener un diagnóstico sobre la valoración de la calidad en la cadena de suministros de la minería del Cobre en Chile y fue realizada durante el año 2018. Para tal efecto se elaboró una encuesta que fue aplicada a 41 directivos de las empresas mineras productoras de Cobre de la región de Antofagasta, según la base de datos suministrada por Corporación Chilena del Cobre (COCHILCO). Se elaboró un cuestionario basado en investigaciones anteriores, en especial en el realizado por [33], con el objetivo de determinar la valoración de la calidad en la cadena de suministro de las empresas mineras a través de preguntas semiestructuradas. El cuestionario está dividido en cuatro secciones: la primera sección es sobre la localización de las compañías mineras y el objetivo es conocer su distribución espacial en la región de Antofagasta. La segunda sección es sobre la caracterización de los directivos que respondieron la encuesta con el objetivo de conocer a que área organizacional pertenecen, antigüedad en la empresa y en el cargo. La tercera sección es sobre la valoración de la calidad y tiene como objetivo conocer la opinión de los directivos sobre la importancia de la calidad en su empresa con respecto a la sustentabilidad, competitividad, productividad, eficiencia, valores y cultura organizacional; y por último si la calidad es considerada en la evaluación y selección de proveedores. La cuarta y última sección es la valoración de las normas de calidad cuyo objetivo es conocer la opinión de los directivos sobre la importancia de las normas de calidad en su empresa con respecto a la sustentabilidad, competitividad, productividad y eficiencia en un primer aspecto. En un segundo aspecto, conocer si las empresas están certificadas en normas de calidad, y si es así en cuales normas, fechas de certificación y el motivo que los llevó a certificarse.

4. Resultados y discusión

4.1. Localización de las compañías mineras.

Las compañías mineras de la región de Antofagasta, se encuentran concentradas en las comunas de Calama, Antofagasta y Sierra Gorda con un 83% del total de la población (ver Tabla 3). Esto se debe a que en esos territorios se concentran los mayores yacimientos de mineral de cobre, y esas comunas son conocidas como distritos mineros.

4.2. Caracterización de los directivos de las empresas mineras que respondieron la encuesta

Esta información fue muy relevante, ya que permitió concluir qué quienes respondieron la encuesta conocen bien como funciona la organización interna de la compañía minera, poseen los conocimientos necesarios y tienen la

Tabla 3.

Localización de las compañías mineras

Comuna	Concentración
Antofagasta	24%
Mejillones	6%
Sierra Gorda	24%
Taltal	6%
Calama	35%
Tocopilla	6%

Fuente: El Autor

Tabla 4.

Caracterización de los directivos

¿Cuánto tiempo hace que trabaja en la Empresa?			
1 a 3 años	4 a 5 años	6 a 10 años	Más 10 años
7%	27%	27%	39%
¿A qué área organizacional pertenece su cargo?			
Abastecimiento y contratos	Recursos humanos	Seguridad y medio ambiente	Operaciones y mantenimiento
51%	3%	7%	39%
¿Cuál es su cargo?			
Superintendente	Jefe Departamento	Ingeniero y Analista	Otro
46%	27%	27%	0%
¿Cuánto tiempo hace que ocupa dicho cargo?			
1 a 3 años	4 a 5 años	6 a 10 años	Más 10 años
19%	54%	27%	0%

Fuente: El Autor

experiencia suficiente tanto en la empresa como en el cargo, para ser considerados como informantes válidos en calidad, pertinencia y relevancia (Tabla 4).

4.3. Valoración de la calidad

Las compañías mineras de la región de Antofagasta en Chile muestran una alta valoración por la calidad, lo cual queda evidenciado en sus respuesta en las preguntas sobre; la calidad como factor de sustentabilidad, la calidad como factor de competitividad y productividad, la calidad como garantía de eficiencia del negocio, la presencia de la calidad en los valores y cultura organizacional; y por último, la calidad como variable en la evaluación y selección de proveedores (ver Tabla 5). Estos resultados son concordantes con los obtenidos en las investigaciones de [21] donde reportan que la calidad es una de las propiedades más buscadas en los productos que éstos ofertan y es citada en 68 artículos, entre los que se encuentran los trabajos de [25,34,36,37,41,42,1,13,14,20,29,28,32,39].

4.4. Valoración de las normas de calidad

El 87% de los encuestados declaran estar “De acuerdo”, seguido por un 17% que responden estar “Totalmente de acuerdo” con la afirmación de que las normas de calidad son importantes para el negocio minero (ver Tabla 6). Estas respuestas corroboran la información obtenida en la sección de valoración de la calidad. Con respecto a la afirmación que las normas de calidad son un factor de competitividad y productividad en el negocio

Tabla 5.

Valoración de la calidad

La Calidad es muy importante en la sustentabilidad de nuestra empresa				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	0%	0%	100%
La Calidad es un factor de competitividad y productividad en nuestra empresa				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	0%	0%	100%
La Calidad garantiza la eficiencia de nuestro negocio				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	0%	0%	100%
La Calidad es parte de los valores organizacionales de nuestra empresa				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	0%	0%	100%
La Calidad está presente en la cultura organizacional de nuestra empresa				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	0%	0%	100%
¿La Calidad es una variable considerada en la evaluación y selección de proveedores de su empresa?				
Sí			No	
100%			0%	

Fuente: El Autor

minero, el 58% de los encuestados declaran estar “De acuerdo”, seguido por 26% que responden estar “Completamente de acuerdo”. Hay un 16% de encuestados que declaran estar “Indiferente” con esta afirmación, lo cual se contrapone con las respuestas obtenidas anteriormente (ver Tabla 6). En la afirmación sobre que las normas de calidad garantizan la eficiencia del negocio minero, el 56% de los encuestados declaran estar “En desacuerdo”, seguido por un 24% que responden estar “De acuerdo”. Nuevamente, hay un 20% de encuestados que declaran estar “Indiferente”, lo cual también se contrapone con las respuestas obtenidas anteriormente (ver Tabla 6).

El 71% de las empresas mineras encuestadas tiene certificación de normas de calidad y el 29% no está certificada a la fecha (ver Tabla 6). Esta información es un hallazgo muy importante, ya que representa una oportunidad de abrir una discusión sobre la pertinencia y contribución de las normas de calidad en la cadena de suministros de la minería del Cobre en la región de Antofagasta de Chile. El 71% de las empresas mineras están certificadas en la ISO 9001 sobre sistemas de gestión de calidad, el 35% están certificadas en la ISO 14001 sobre sistemas de gestión medioambiental, el 18% están certificadas en las OHSAS 18001 sobre sistemas de salud y seguridad ocupacional, y sólo un 12% están certificadas en la ISO 17025 que fue diseñada para que la utilicen los laboratorios de ensayo y calibración (ver Tabla 6). Las normas ISO 9001 se certificaron a partir de Octubre del año 2000 hasta Julio del año 2015 y las normas ISO 14001 comenzaron a certificarse a partir de Noviembre del año 1999 hasta Marzo del año 2010.

Tabla 6.
Valoración de las normas de calidad

Las normas de calidad son importantes en la sustentabilidad del negocio minero				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	0%	83%	17%
Las normas de calidad son un factor de competitividad y productividad en el negocio minero				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	0%	16%	58%	26%
Las normas de calidad garantizan la eficiencia del negocio minero				
Completamente en Desacuerdo	En Desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de Acuerdo
0%	56%	20%	24%	0%
¿Su empresa está certificada en normas de calidad?				
Si		No		
71%		29%		
¿Cuáles normas de calidad tiene certificadas en su empresa?				
ISO 9001	ISO 14001	ISO 17025	OHSAS 18001	Otra
71%	35%	12%	18%	0%
Indicar mes y año de la primera certificación de las normas de calidad				
ISO 9001	ISO 14001	ISO 17025	OHSAS 18001	Otra
Desde (período inicial)				
Octubre 2000	Noviembre 1999	Junio 2007	Junio 1999	
Hasta (período final)				
Julio 2015	Marzo 2010	Noviembre 2007	Abril 2009	Julio 2015
¿Por qué motivo su empresa se certificó en normas de calidad?				
Mantener la ventaja competitiva de la empresa	Exigencia de la industria minera	Aseguramiento de la calidad de la gestión de la empresa	Aseguramiento de la calidad de los productos de la empresa	Evitar problemas judiciales con la legislación vigente
0%	42%	58%	0%	0%

Fuente: El Autor.

En cambio las OHSAS 18001, se certificaron a contar de Junio del año 1999 hasta Abril del año 2009. En lo que respecta a las ISO 17025 se han certificado en dos empresas mineras en Junio y Noviembre del año 2007 (ver Tabla 6). Al respecto, es importante señalar que las empresas mineras productoras de cobre en la Región de Antofagasta y la industria minera mundial en general, privilegia y fomenta la certificación de las ISO 14001 y OHSAS 18001, ya que estas normas están asociadas a dos factores claves de éxito que son la gestión medioambiental y la gestión en salud y seguridad ocupacional.

El 58% de las compañías mineras declaran haberse certificado para asegurar la calidad de la gestión de la empresa y, el 42% por ser una exigencia de la industria minera (ver Tabla 6). Es importante señalar que la legislación minera en Chile, no obliga a las compañías mineras a certificarse en las normas ISO u OHSAS. No obstante lo anterior, la industria minera mundial se autoimpone altos

estándares de desempeño en materia de gestión de la calidad, gestión medioambiental, gestión de salud y seguridad ocupacional, y últimamente en gestión de comunidades; todo esto con la finalidad de mantener la licencia social para operar en los territorios y distritos mineros de Chile y el mundo. Además de lo anterior, es importante señalar que el cobre es un recurso natural no renovable el cual participa en una industria con baja diferenciación y una alta incidencia en la gestión de costos, ya que tiene poca o nula capacidad de influenciar en el precio de venta. Debido a lo anterior, las empresas mineras recurren a los sistemas de gestión de calidad para asegurar la productividad en sus procesos industriales y mantener su posición competitiva en el mercado mundial.

5. Conclusiones

Los resultados de la investigación evidencian una alta valoración de la calidad por parte de la cadena de suministro de las compañías mineras productoras de Cobre en la región de Antofagasta. No obstante lo anterior, también se evidencia una menor valoración a las normas de calidad, tales como la ISO 9001 y 14001, lo cual genera una discusión sobre el aporte y validez de las normas de calidad en el desarrollo y crecimiento del negocio minero. La recomendación desde el punto de vista de la sustentabilidad del negocio minero es que las empresas certifiquen la norma de gestión de calidad ISO 9001. También, dadas las características de alto impacto en el medioambiente y alto riesgo de accidentabilidad de la operación minera, también se hace imprescindible certificar la norma ISO 14001 y la norma OHSAS 18001. El aumento del grado de certificación de las normas de gestión en las empresas mineras, será una señal positiva para los inversionistas, accionistas, comunidad y gobierno porque demuestra una gestión empresarial de clase mundial garantizando la entrega a tiempo de productos de calidad a precios competitivos, en forma sustentable cuidando el medioambiente y protegiendo la integridad y salud de sus trabajadores. En definitiva, las normas de gestión permiten mantener la licencia social para operar en los territorios y distritos mineros a través de una minería virtuosa, inclusiva y sustentable. Las limitaciones enfrentadas fueron en el ámbito metodológico, donde cabe destacar la utilización de una única fuente de información basada en la opinión de los directivos encuestados de las empresas mineras productoras de cobre de la región de Antofagasta en Chile. Y por último, las dificultades para obtener información estadística de fuentes secundarias y, sobre todo, una base de datos con la población en estudio, la cual fue muy laboriosa de construir debido a las deficiencias que presenta el sistema estadístico chileno, tanto a nivel nacional como regional.

Referencias

- [1] Amid, A., Ghodsypour, S. and O'Brien, C., Fuzzy multiobjective linear model for supplier selection in a supply chain. *International Journal of Production Economics*, 14(2), pp. 394-407, 2006. DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.04.012

- [2] Arias, M., Atienza, M. and Cademartori, J., Large mining enterprises and regional development in Chile: between the enclave and cluster. *Journal of Economic Geography*, 14(1), pp. 73-95, 2014. DOI: 10.1093/jeg/lbt007
- [3] Ballou, R., *Business logistics management*. Prentice Hall, USA, 2004, 252 P.
- [4] Bayo-Moriones, A., Bello-Pintado, A. and Merino-Díaz-de-Cerio, J., Quality assurance practices in the global supply chain: the effect of supplier localisation. *International Journal of Production Research*, 49(1), pp. 255-268, 2011. DOI: 10.1080/00207543.2010.508953
- [5] Batson, R.G. and Megough, K.D., New direction in quality engineering: supply chain quality modelling. *International Journal of Production Research*, 45(23), pp. 5455-5464, 2007. DOI: 10.1080/00207540701325140
- [6] Carmignani, G., Supply chain and quality management: the definition of a standard to implement a process management system in a supply chain. *Business Process Management Journal*, 15(3), pp. 395-407, 2009. DOI: 10.1108/09574090910954864
- [7] COCHILCO. Caracterización de los costos de la gran minería del Cobre, COCHILCO, Chile, 2017
- [8] Comisión Nacional de Productividad de Chile. Informe de productividad de la gran minería del cobre. Comisión Nacional de Productividad, Editorial Universitaria. [en línea]. 2017. Disponible en: <https://www.comisiondeproductividad.cl/wp-content/uploads/2020/02/Productividad-en-la-gran-mineria-del-cobre-resumen-ejecutivo.pdf>
- [9] Correa, A. y Gómez, R., Tecnologías de información en la cadena de suministro. *Revista DYNA*, 76(157), pp. 37-48, 2009.
- [10] Crosby P.B., *Quality is free: the art of making quality certain*. New American Library, Google Scholar, New York, USA, 1979.
- [11] Dellana, S. and Kros, J., An exploration of quality management practices, perceptions and program maturity in the supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(6), pp. 786-806, 2014. DOI: 10.1108/09574090910954864
- [12] Deming, W.E., *Quality, productivity, and competitive position*. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Business & Economics, USA, 1982, 373, P.
- [13] Demirtas, E.A. and Üstün, O., An integrated multi-objective decision making process for supplier selection and order allocation. *Omega International Journal of Management Science*, 36(1), pp. 76-90, 2008. DOI: 10.1016/j.omega.2006.12.004
- [14] Demirtas, E.A. and Üstün, O., Analytic network process and multi-period goal programming integration in purchasing decision. *Computer and Industrial Engineering*, 56(2), pp. 677-690, 2009. DOI: 10.1016/j.cie.2006.12.006
- [15] Feigenbaum, A.V., *Control total de la calidad*. CECSA, Mexico, 1990.
- [16] Jurán, J.M., *Manual de control de calidad*. Mc Graw-Hill, Madrid, 1993.
- [17] Ganeshan, R. and Harrinson, T., *Introduction to supply chain management*. Penn State University, USA, 1995, 130 P.
- [18] Gylling, M., Heikkilä, J., Jussila, K. and Saarinen, M., Making decisions on offshore outsourcing and backshoring: a case study in the bicycle industry. *International Journal of Production Economics*, 162, pp. 92-100, 2015. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.01.006
- [19] Güneri, A.F., Ertay, T. and Yücel, A., An approach based on ANFIS input selection and modeling for supplier selection problem. *Expert Systems with Applications*, 38(12), pp. 14907-14917, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.05.056
- [20] Ha, S.H. and Krishnan, R., A hybrid approach to supplier selection for the maintenance of a competitive supply chain. *Expert Systems with Applications*, 34(2), pp. 1303-1311, 2008. DOI: 10.1016/j.eswa.2006.12.008
- [21] Ho, W., Xu, X. and Dey, P.K., Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: a literature review. *European Journal of Operational Research*, 202(1), pp. 16-24, 2010. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.05.009
- [22] Korinek, J., Mineral resource trade in Chile: contribution to development and policy implications. *OECD Trade Policy Papers*, 145, OECD Publishing, Paris, 2013. DOI: 10.1787/18166873
- [23] Kuei, C., Winch, J.K.J. and Madu, C.C.N., Supply chain quality management: a simulation study. *Information and Management Sciences*, 19(1), pp. 131-151, 2008.
- [24] Kuei, C.-H. and Madu, C.N., Identifying critical success factors for supply chain quality management (SCQM). *Asia Pacific Management Review*, 6(4), pp. 409-423, 2001, DOI: 10.4018/jsds.20100701004
- [25] Liao, Z. and Rittscher, J., A multi-objective supplier selection model under stochastic demand conditions. *International Journal of Production Economics*, 97(3), pp. 308-317, 2005. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.03.001
- [26] Lima, M. y Meller, P., *Análisis y evaluación de un clúster minero en Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2003, 156 P.
- [27] Melnyk, S., Lummus, R.R., Vokurka, R.J., Burns, L.J. and Sandor, J., Mapping the future of supply chain management: a Delphi study. *International Journal of Production Research*, 47(16), pp. 4629-4653, 2009. DOI: 10.1080/00207540802014700
- [28] Mendoza, A., Santiago, E. and Ravindram, A.R., A three-phase multi-criteria method to the supplier selection problem. *International Journal of Industrial Engineering*, 15(2), pp. 195-210, 2008a.
- [29] Mendoza, A. and Ventura, J.A., An effective method to supplier selection and order quantity allocation. *International Journal of Business and Systems Research*, 2(1), pp. 1-15, 2008b. DOI: 10.1504/IJBSR.2008.018117
- [30] Mentzer, J., *Fundamentals of supply chain management: twelve drivers of competitive advantage*. SAGE, USA, 2004, 235 P.
- [31] Mota, B., Gomes, M.I., Carvalho, A. and Barbosa-Povoa, A.P., Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, pp. 14-27, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.052
- [32] Ng, W.L., An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem. *European Journal of Operational Research*, 186(3), pp. 1059-1067, 2008. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.01.018
- [33] Pezoa, C., *Elementos competitivos en base a la eficiencia colectiva de las empresas pertenecientes a un clúster emergente: el clúster minero de Antofagasta*. Tesis Dr., Universitat Rovira i Virgil, Cataluña, España, [en línea]. 2010. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/8823>
- [34] Ramanathan, R., Supplier selection problema: integrating DEA with the approaches of total cost of ownership and AHP. *Supply Chain Management*, 12(4), pp. 258-261, 2007. DOI: 10.1108/13598540710759772
- [35] Real Academia Española, [en línea]. 1993. Disponible en: <https://dle.rae.es/calidad#6nVpk8P>
- [36] Saen, R.F., Supplier selection in the presence of both cardinal and ordinal data. *European Journal of Operational Research*, 183(2), pp. 741-747, 2007a. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.022
- [37] Sevkli, M., Koh, S.C.L., Zaim, S., Demirbag, M. and Tatoglu, E., An application of data envelopment analytic hierarchy process for supplier selection: a case study of BEKO in Turkey. *International Journal of Production Research*, 45(9), pp. 1973-2003, 2007. DOI: 10.1080/00207540600957399
- [38] Sociedad Americana para el Control de Calidad, ISO 9000-3:1997, *Gestión de la calidad y aseguramiento de la calidad*. [en línea]. 1997. Disponible en: <http://www.iso.ch>
- [39] Talluri, S., Vickery, S.K. and Narayanan, S., Optimization models for buyer-supplier negotiations. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 38(7), pp. 551-561, 2008. DOI: 10.1108/09600030810900950
- [40] Truong, H.Q., Sampaio, P., Sameiro, M. and Fernandez, A., An extensive structural model of supply chain quality management and firm performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(4), pp. 444-464, 2016. DOI: 10.1108/IJQR-11-2014-0188
- [41] Wadhwa, V. y Ravindran, A.R., Vendor selection in outsourcing. *Computer and Operations Research*, 34(12), pp. 3725-3737, 2007. DOI: 10.1016/j.cor.2006.01.009
- [42] Xia, W. and Wu, Z., Supplier selection with multiple criteria in volumen discount environments. *OMEGA. International Journal of Management Science*, 35(5), pp. 494-504, 2007. DOI: 10.1016/j.omega.2005.09.002

O. Gahona-Flores, es profesor adjunto en el Departamento de Ingeniería Comercial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antofagasta, Chile y profesor invitado en la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Obtuvo su título de Ingeniero Comercial (1995) en la Universidad Católica del Norte, Chile y los grados académicos de MSc. en Administración (2002) y MSc. en Finanzas (2007) en la Universidad de Chile. Posteriormente, obtuvo el MSc. en Dirección y Organización de Empresas (2009) en la Universitat de Lleida, España.
ORCID: 0000-0002-6749-4522



Technical analysis on the causes of the mass movement occurred in "Las Nieves" Quarry, city of Copacabana

Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez^a & María Fernanda Aristizábal-Arboleda^b

^a Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. wegirald@gmail.com

^b Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. mfaristizabala@unal.edu.co

Received: May 20th, 2019. Received in revised form: July 13th, 2020. Accepted: August 04th, 2020.

Abstract

On October 26, 2016, a large-scale mass movement occurred surrounding the Medellín-Bogotá highway, near the municipality of Copacabana. This paper investigates the physical and legal conditions of the place where the landslide occurred, and thus, to corroborate the causes, the possibility of avoiding or preventing the phenomenon and the influence of anthropic activities in the sector. To determine the susceptibility to mass movements and verify the physical conditions, it was carried out by means of geological mapping, geomorphology and interpretation of satellite images. The legal and bibliographic review was consulted in the reports of the event, the PBOT of the municipality of Copacabana and the mining file of the Cantera Las Nieves. The area was found to be highly susceptible to mass movements, and exploitation in the Cantera Las Nieves triggered the landslide, which could be avoided. Similar phenomena could occur in the near future in the area.

Keywords: mass movement, Medellín-Bogotá highway, Copacabana, Cantera Las Nieves.

Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido en la Cantera Las Nieves, municipio de Copacabana

Resumen

El 26 de octubre del 2016 ocurrió un movimiento en masa de gran magnitud en inmediaciones de la autopista Medellín-Bogotá, a la altura del municipio de Copacabana. El presente trabajo investiga las condiciones físicas y jurídicas del sector, buscando corroborar las causas del fenómeno, la posibilidad de evitar o prever el mismo y la influencia de las actividades antrópicas como detonantes. Las condiciones físicas se verificaron mediante cartografía geológica, geomorfológica, e interpretación de imágenes satelitales, para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa. La investigación jurídica y bibliográfica consultó los reportes del evento, el PBOT del municipio de Copacabana y el expediente minero de la Cantera Las Nieves. Se encontró que la zona presenta alta susceptibilidad a movimiento en masa y la explotación en la Cantera Las Nieves detonó el movimiento en masa, el cual pudo ser evitado. Fenómenos similares se podrían presentar en un futuro cercano en el sector.

Palabras clave: movimiento en masa; autopista Medellín-Bogotá; Copacabana; Cantera Las Nieves.

1. Introduction

El tramo "Zamora-Alto de la Virgen", de la Autopista Medellín-Bogotá, ha presentado múltiples deslizamientos de gran magnitud en los últimos años [1,2].

El 26 de octubre del 2016, ocurrió un movimiento en masa originado en predios de la "Cantera Las Nieves", en la

vereda El Cabuyál del municipio de Copacabana (Antioquia). Este movimiento dejó 16 víctimas mortales y 3 heridos, además, afectó la cantera y la autopista Medellín-Bogotá sobre el retorno "Las Margaritas", Kilómetro 12+100.

El movimiento en masa fue clasificado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) [3], como un movimiento en masa semicircular tipo

How to cite: Giraldo-Ramírez, W.E. and Aristizábal-Arboleda, M.F. Technical analysis on the causes of the mass movement occurred in "Las Nieves" Quarry, city of Copacabana. Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 48, pp. 12-22, Febrero-Julio, 2020.

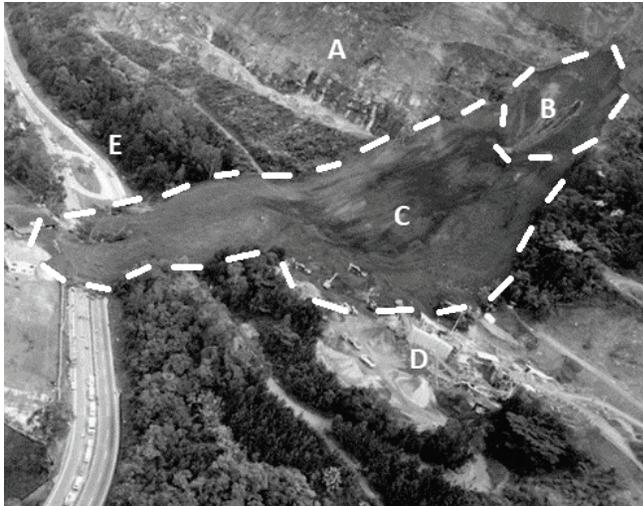


Figura 1. Fotografía aérea del deslizamiento el día 26 de octubre del 2016. A. Zona de explotación en la Cantera Las Nieves. B. Zona de desprendimiento con afloramiento de aguas subterráneas. C. Material desprendido. D. Parte de planta de procesamiento de la Cantera Las Nieves. E. Retorno Las Margaritas de la Autopista Medellín-Bogotá. Fuente: Modificado de [4].

rotacional, con un volumen de material removido estimado de 53.124 m^3 , que con un porcentaje de expansión aproximado del 15%, genera un volumen a remover de 61.093 m^3 y un área afectada de 50.376 m^2 (Fig. 1). La UNGRD consideró que el detonante del movimiento fue el flujo de agua del macizo rocoso en la interface entre la roca y el perfil de meteorización.

El presente informe corrobora las causas del fenómeno, la posibilidad de evitar o prever el mismo y la influencia de las actividades antrópicas como detonantes, mediante la verificación de las condiciones físicas del sector y las condiciones jurídicas y técnicas de la actividad minera en la “Cantera Las Nieves”.

La verificación de las condiciones físicas se realizó mediante recopilación bibliográfica, cartografía geológica y geomorfológica a escala 1:1000, recopilación las imágenes satelitales disponibles en el intervalo 2005-2018 y fotointerpretación de las mismas para determinar las coberturas de suelos y las actividades antrópicas durante este intervalo de tiempo. Dicha información fue integrada y analizada en un modelo 4D (x, y, z, t).

La verificación de las condiciones jurídicas se realizó consultando el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Copacabana y el expediente minero correspondiente a la Cantera Las Nieves. En estos se dio especial énfasis a los componentes ambientales, usos de suelo, gestión del riesgo y condiciones técnicas de la explotación minera a desarrollar en el sector.

2. Metodología

2.1. Verificación de reportes

La investigación partió de recopilar la información

disponible en el reporte post-misión de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) [3], los comunicados oficiales de la Alcaldía de Copacabana [5] y el Programa Nacional de Búsqueda y Rescate Urbano (USAR) [6], las redes oficiales del concesionario Desarrollo Vial del Oriente de Medellín (DEVIMED) [7], y los medios de comunicación [2,4]. Esta información permitió conocer las características principales del deslizamiento recopiladas por los geólogos y técnicos del UNGRD in-situ y en las horas posteriores al hecho, además de fotografías del deslizamiento en el día de los hechos y días después.

2.2. Revisión bibliográfica y jurídica

Se consultaron las publicaciones referentes a la geología y geomorfología del sector [8-11] y en general, las zonas de ladera en el valle de Aburrá, enfocado en determinar las condiciones del macizo rocoso y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Fue recopilada la información cartográfica, topográfica e hidrológica [12,13] disponible sobre el valle de Aburrá y en variadas escalas.

Se consultaron las imágenes satelitales multitemporales [14,15] del sector, desde el año 2005 y hasta el 2018, es decir, 11 años antes y 2 años después del evento. Estas imágenes fueron georreferenciadas y fotointerpretadas mediante la extensión ArcMap del software ArcGIS.

Se consultó el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Copacabana vigente en el 2016 [16], en búsqueda de los estudios básicos de amenaza por movimiento en masa. Dado que el deslizamiento se originó al interior de una licencia minera activa, se verificaron los estudios técnicos y documentos relativos a la licencia minera [17], buscando determinar las condiciones detalladas del sitio antes del deslizamiento e indicios de inestabilidad identificados en la ladera, además de los posibles efectos que pudieran causar las actividades mineras sobre la estabilidad de la ladera.

Fueron consultados revistas y periódicos en búsqueda de registros de movimientos en masa en otros sectores del tramo Zamora-Alto de La virgen de la Autopista Medellín-Bogotá [1,18].

2.3. Trabajo de campo

Fue realizada cartografía geológica y geomorfológica detallada de un área de 1 km^2 con centro en el sitio del deslizamiento. Aunque no fue posible ingresar a la cantera, fueron verificados los caminos y laderas alrededor de la misma, así como los afloramientos asociados a las carreteras de ingreso a la cantera y la autopista Medellín-Bogotá. Fueron verificados también los remanentes del material deslizado que se encontraban en el sitio y en uno de los depósitos donde se dispuso el material removido, particularmente el ubicado en el km 0+280 de la vía El Tranvía, en el municipio de Marinilla.

2.4. Integración y análisis de la información

La información espacial y temporal recopilada fue integrada en un modelo 4D (x, y, z, t) mediante la extensión ArcScene, del software ArcGIS. Dicho modelo permitió contrastar la información obtenida de las distintas fuentes con respecto a la ubicación del movimiento en masa, además de verificar las condiciones y variabilidad del terreno a lo largo del tiempo.

La secuencia de imágenes satelitales multitemporales colectadas [14,15], corresponden a imágenes de muy alta resolución con tamaño de pixel de orden centimétrico. La fotointerpretación visual de estas permite identificar las condiciones del sitio, coberturas de suelo e intervenciones antrópicas con alto grado de exactitud [19-21] y en niveles de detalle inferiores a la escala trabajada 1:1000.

Para calcular la susceptibilidad a movimiento en masa del sector se aplicó la metodología utilizada por Cornare [22], la cual utiliza el método indirecto, analizando la interrelación entre las características y condiciones que presenta el terreno para identificar la potencialidad de ocurrencia de un evento considerado, obteniendo con esto, un análisis cualitativo.

En el presente ejercicio fueron realizados dos análisis, el primero, considerando las condiciones al momento del deslizamiento y el segundo, con las condiciones del terreno antes del desarrollo de la actividad minera. Fueron consideradas las variables geología, geomorfología, pendientes y cobertura del suelo, cada variable con múltiples categorías. Se asignó un valor numérico cualitativo de 1 a 10 a cada categoría (Tabla 1). Este valor refleja la susceptibilidad para generar movimientos en masa, siendo 1 muy baja susceptibilidad y 10 muy alta susceptibilidad.

Con la extensión ArcMap del software ArcGIS y asignando un valor ponderado de 25% a cada variable, se obtuvieron los mapas de susceptibilidad a movimiento en masa en el sector donde ocurrió el deslizamiento.

Tabla 1. Variables, categorías y valoración utilizadas para el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Variable	Categoría	Valor
Geología	Depósito de vertiente	10
	Roca metamórfica	5
Geomorfología	Escarpe	10
	Ladera de pendiente media a alta	8
Coberturas	Suelo desnudo	10
	Pasto	7
	Rastrojo	4
	Bosque	1
Pendientes	0-5%	1
	>5-10%	2
	>10-15%	3
	>15-25%	4
	>25-35%	5
	>35-50%	6
	>50-75%	7
	>75-100%	8
>100-150%	9	
>150%	10	

Fuente: Los Autores.

3 Resultados

3.1. Condiciones físicas

La zona donde se originó el movimiento en masa del 26 de octubre del 2016, Figs. 2-5, presenta condiciones físicas que permiten definirla como una zona de alta susceptibilidad a movimiento en masa. Adicionalmente, se encontraron registros de movimientos en masa en el sector, los cuales causaron daños, cierres temporales y pérdida de vidas [1-7]. Los principales y de mayor magnitud ocurrieron en el km 6 [1] y km 14 [2] de la Autopista Medellín-Bogotá.

3.1.1. Geología

Las inmediaciones del sitio del movimiento en masa se encuentran cartografiadas regionalmente como anfibolitas y migmatitas del Terreno Bocaná [8]. Localmente, la zona donde se originó el deslizamiento corresponde a una zona de contacto entre las unidades de rocas metamórficas que conforman los escarpes de la zona alta de las laderas del Valle de Aburrá y los depósitos de vertiente ubicados a media ladera [9] (Fig. 2), escarpes y depósitos asociados a los movimientos en masa ocurridos en el Valle de Aburrá [10].

El Programa de Trabajo y Obras (PTO) de la cantera Las Nieves [17] confirmó estas condiciones geológicas, identificando en el sector una unidad rocosa de anfibolita en la zona alta de la ladera y una unidad de depósitos de vertiente

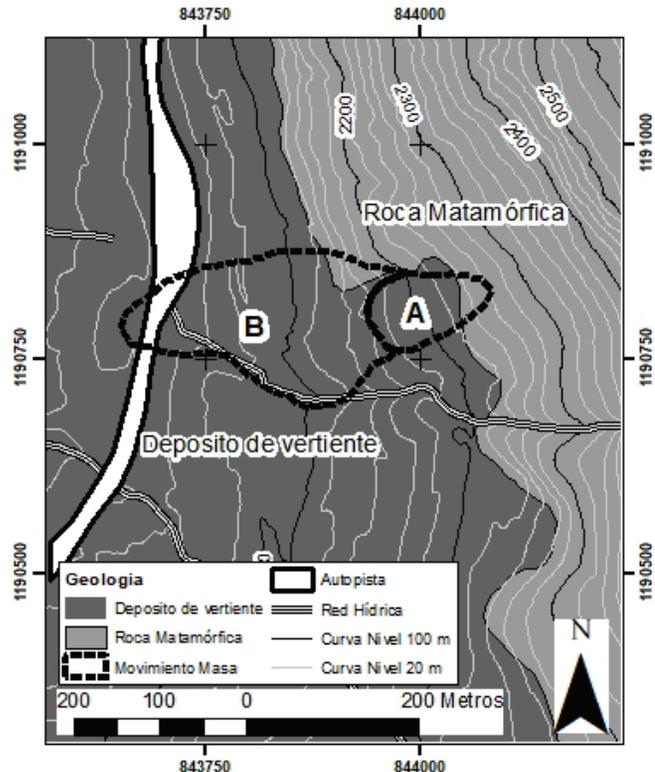


Figura 2. Geología en el área del movimiento en masa. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación.

Fuente: Los Autores.

en la zona media, definiendo la unidad de depósitos como el material a ser explotado en la actividad minera.

El trabajo de campo determinó que la zona corresponde a dos unidades superficiales.

Al oriente y en la zona topográficamente alta, se encuentran los afloramientos rocosos, los cuales corresponden a una secuencia metamórfica de anfibolitas con ocasionales texturas de fusión parcial. Esta unidad presenta distintos grados de meteorización. En las zonas aprovechadas o de alta pendiente, la roca presenta meteorización baja, mientras que, en las zonas de pendientes medias, se observa el desarrollo de zonas de meteorización media a alta con algunos puntos de formación de suelos residuales.

Al occidente del área y en la zona baja topográficamente, se presentan depósitos de vertiente, que corresponden principalmente a depósitos de escombros, con distintos grados de meteorización en función de su antigüedad. Los depósitos presentan bloques decimétricos, clasto-soportados en las zonas cercanas al escarpe rocoso y que cambian gradualmente a matriz-soportados disminuyendo su proporción de bloques a medida que se aleja del escarpe y se descende en la ladera. Estos depósitos se generaron a partir de movimientos en masa en la zona alta, que corresponde a la unidad de roca metamórfica.

Las zonas en las que se originó y depositó el movimiento en masa investigado, están al interior de la unidad de depósitos de vertiente, lo cual implica que el material caído corresponde a material removilizado de los movimientos en

masa antiguos que afectaron las laderas del valle de Aburrá [9,10].

3.1.2. Geomorfología

La zona del movimiento en masa se ubica al interior del Valle de Aburrá, valle caracterizado por un fondo en algunos sectores plano, con laderas intermedias de media pendiente y laderas altas escarpadas [10]. La cartografía detallada de la zona [11] determina que el área de estudio corresponde a dos unidades geomorfológicas, al oriente y en la zona alta está la unidad de escarpes semicirculares superiores, mientras que al occidente y en la zona baja se presenta la unidad de superficies suaves en depósitos poco incisados.

En el trabajo de campo se reconocieron dos unidades geomorfológicas (Fig. 3), los escarpes del borde del Valle de Aburrá y las laderas de pendiente media a alta. La unidad de escarpes presenta pendientes dominantes mayores al 75%, y la unidad de laderas tiene pendientes menores al 75%, en su mayoría menores al 50% (Fig. 4).

Las unidades geológicas y geomorfológicas muestran una relación importante en el sector. La zona caracterizada geológicamente por rocas metamórficas corresponde geomorfológicamente a la zona de escarpe y la zona caracterizada geológicamente por la presencia de depósitos de vertiente corresponde a la unidad geomorfológica de ladera de pendiente media y alta.

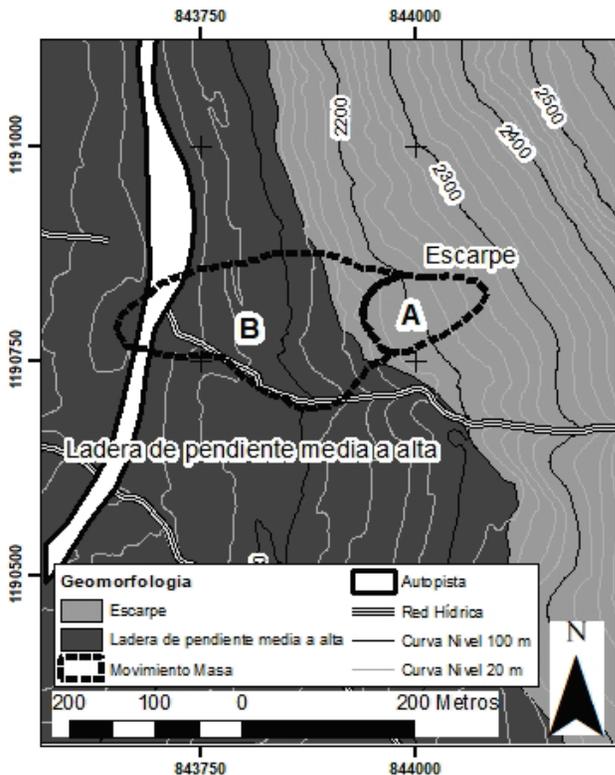


Figura 3. Geomorfología en el área del movimiento en masa. A. Zona de desprenderimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

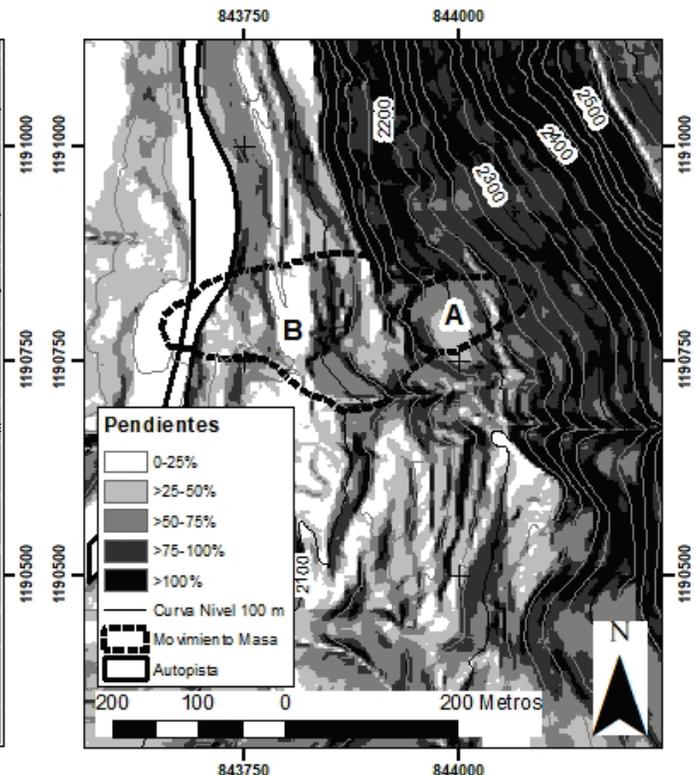


Figura 4. Topografía del área del movimiento en masa del día 26 de octubre del 2016. A. Zona de desprenderimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

Es importante anotar que el único sector donde la relación entre unidades geológicas y geomorfológicas no es directa, es precisamente el sector donde se originó el movimiento en masa. En este sector, la unidad geológica de depósitos de vertiente, coincide con la unidad geomorfológica de escarpes (Figs. 2, 3).

3.1.3. Coberturas y usos del suelo

Mediante fotointerpretación de las imágenes satelitales [14,15,19-21], se determinó la extensión exacta del movimiento en masa (Figs. 2-7) y las coberturas y usos del suelo en el intervalo 2005-2018 (Fig. 7).

Se determinó que el movimiento en masa afectó directamente un área de 50.376 m², presentando una distancia entre la corona del deslizamiento y la base de 435 m, un ancho máximo de 180 m y una diferencia de altura entre la corona y la base del depósito generado de 236 m (2.276 y 2.040 m.s.n.m.).

En el año 2005, antes del desarrollo de la actividad minera, el sector desde donde se desprendió la masa de suelo se encontraba cubierta por bosque y rastrojos, con algunas zonas de pastos alrededor. Esta cobertura boscosa fue retirada para la explotación minera. Cuando ocurrió el movimiento en masa, la zona desde donde este se desprendió no contaba con cobertura alguna y los suelos se encontraban desnudos (Figs. 1, 5, 8), alrededor de la misma se conservaban rastrojos, pastos y algunos remanentes de cobertura boscosa asociadas a las zonas de retiro de fuentes hídricas. La cobertura de suelo será utilizada para el cálculo de la susceptibilidad a movimiento en masa antes y después del desarrollo minero.

Las intervenciones realizadas se encuentran amparadas por las licencias ambientales de la Cantera Las Nieves, la Autopista Medellín-Bogotá y demás obras realizadas en el sector. No fue posible constatar el estado de las obras para el manejo de aguas subterráneas debido a las restricciones de ingreso a la cantera.

3.1.4. Hidrología

La fuente hídrica dominante en el sector estudiado es la quebrada Suramericana (Fig. 2) [17]. Las zonas altas de las laderas del Valle de Aburrá son identificadas como zonas de nacimientos y de afloramiento de aguas subterráneas. [12-13]. En la zona donde ocurrió el movimiento en masa se presentan dos tipos de flujos de agua, el de flujo superficial y el flujo subterráneo.

Los flujos superficiales corresponden a las aguas provenientes de las zonas más elevadas topográficamente y que recorren la ladera por su superficie. En este caso los flujos superficiales corresponden a la quebrada Suramérica y sus afluentes. Fue verificado en campo que los cauces superficiales del sector se encuentran en buenas condiciones y las respectivas rondas hídricas han sido conservadas con cobertura de bosque nativo.

Las aguas subterráneas son aguas infiltradas al macizo rocoso en la zona alta de la montaña y que fluyen por medio de las discontinuidades en el macizo rocoso y las masas de

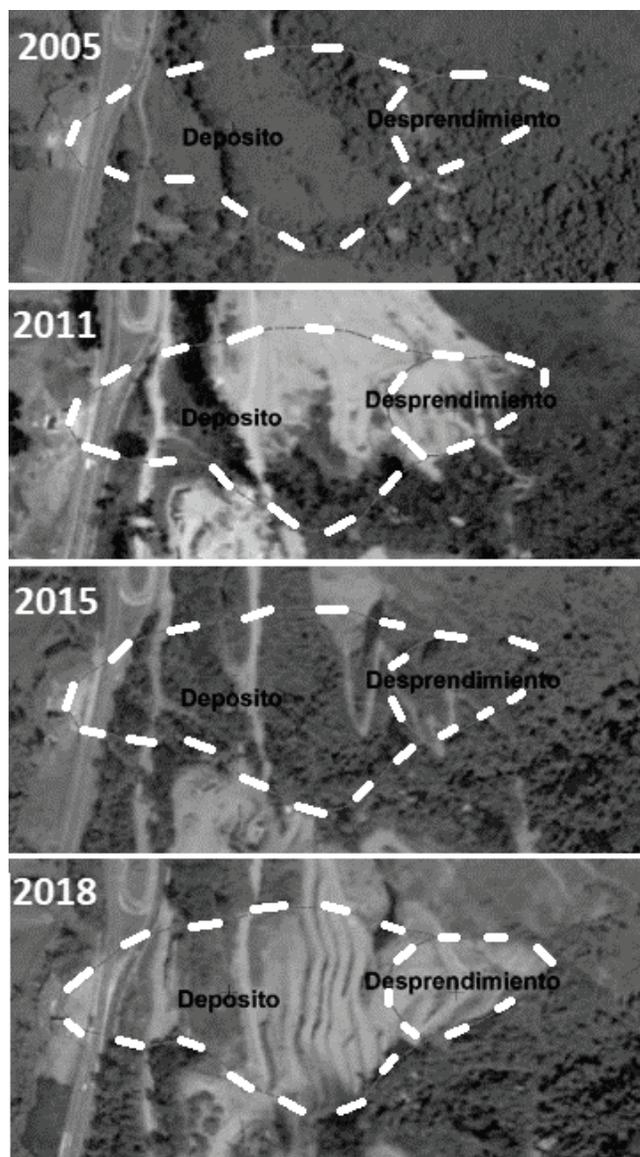


Figura 5. Imágenes satelitales del 2005, 2011, 2015 y 2018, donde se observa la cobertura de los suelos y el área de cobertura boscosa que fue retirado para dar cabida a la explotación minera en el área afectada por el movimiento en masa.

Fuente: modificado de [14, 15].

suelos. Ocasionalmente, los flujos subterráneos pueden encontrar puntos de afloramiento, alimentando los afluentes superficiales. Es de vital importancia anotar que, tal y como fue reportado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [3], el detonante del movimiento en masa fue la saturación de la masa de suelo deslizada debido a un flujo de aguas subterráneas. Este flujo de aguas se puede evidenciar en las fotografías tomadas al sector el día del desastre (Fig. 1) y en días posteriores (Fig. 6).

El estudio detallado de las aguas subterráneas en el sector está por fuera del alcance de la presente investigación, por lo tanto, se partió de la verificación de fuentes secundarias. Al verificar los estudios hidrológicos anexos a la “Licencia Ambiental Expediente AN3-2004-2 Titulo Minero 5530” [17],

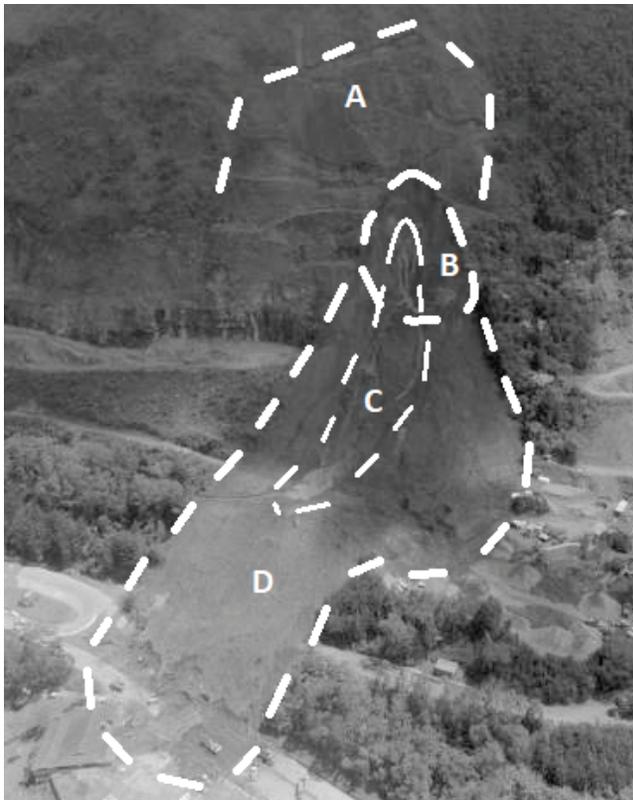


Figura 6. Fotografía aérea del movimiento en masa el día 27 de octubre del 2016. A. Límite superior de la explotación minera y la zona deforestada. B. Zona de desprendimiento del movimiento en masa. C. Afloramiento y flujo de aguas subterráneas. D. Material desprendido. Fuente: modificado de [7].

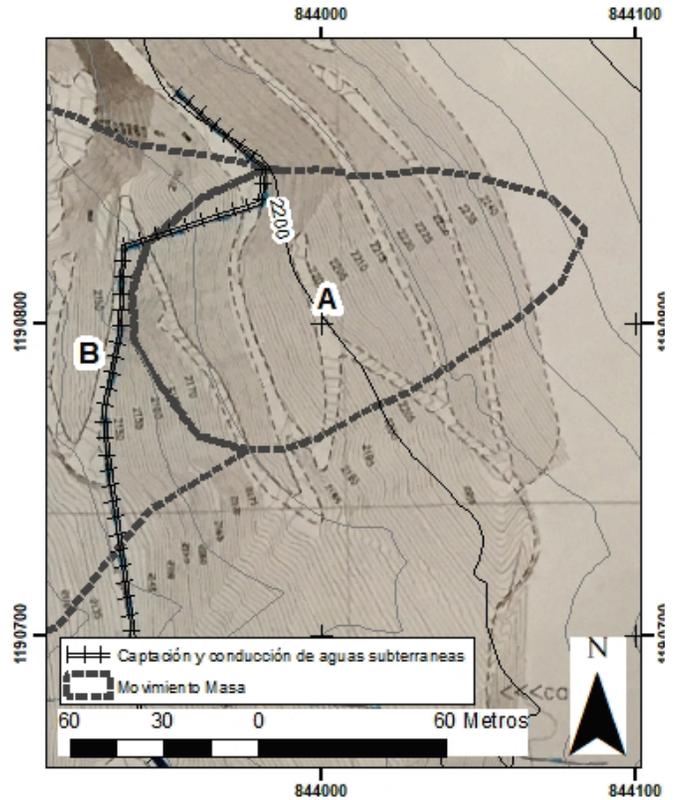


Figura 7. “Plano Ubicación Captación Aguas Título Minero 5530”, anexo al “Expediente AN3-2004-2 Título Minero 5530” [17] georreferenciado para comparar el mismo con la localización del deslizamiento del 26 de octubre del 2016. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: modificado de [17].

licencia de la “Cantera Las Nieves”, fue posible verificar que el afloramiento de aguas subterráneas ubicado en el centro del sector donde se generó el deslizamiento, estaba identificado por la empresa propietaria de la cantera, empresa APMA (Agregados y Proyectos Mineros de Antioquia S.A.).

En la página 31 del “Informe de Seguimiento Programas y Actividades Ambientales Cantera Las Nieves Expediente Ambiental 03-04-02” [17], se lee que los técnicos responsables por el desarrollo de la actividad minera reconocieron las aguas subterráneas aflorantes en el sector donde se originó el movimiento en masa y se reconoce que el mal manejo de las mismas podría generar inestabilidad en los taludes del sector. La Fig. 7 [17] muestra la infraestructura para captar y transportar las aguas subterráneas desarrollada en el frente norte la cual coincide con el punto donde se originó el movimiento en masa.

3.1.5. Susceptibilidad a movimiento en masa

El análisis de susceptibilidad para movimiento en masa fue realizado para dos escenarios. El primer escenario considera las condiciones antes del desarrollo de la actividad minera (Fig. 8), mientras el segundo considera las condiciones al momento del movimiento en masa (Fig. 9). La

metodología cualitativa aplicada (ver sección 2.4) clasifica la posibilidad de la ocurrencia de los movimientos es masa en una escala de 0 a 10, siendo 0 una muy baja posibilidad y 10 una muy alta posibilidad.

La susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2005 (Fig. 8) presenta valores entre 3 y 8, con un valor medio de 6. Los mayores valores se encuentran asociados a las zonas de muy alta pendiente asociadas al escarpe rocoso ubicadas al NE de la zona de estudio y a los taludes desarrollados para la Autopista Medellín- Bogotá. La zona donde se originó el movimiento en masa presenta valores de entre 5 y 7, estando dentro de los rangos promedios observados en la zona. La cobertura boscosa que se presentada en el sector ayuda a disminuir la susceptibilidad a movimiento en masa al regular la infiltración de aguas lluvias a la masa de suelo [23].

La susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2016 (Fig. 9) presenta valores entre 4 y 10, con un valor medio de 6.5. Los mayores valores son obtenidos justo en el punto donde se originó el movimiento en masa, valor 10, mientras que las zonas aledañas presentan un valor de 9. Los altos valores presentados se deben a la coexistencia en este punto de la unidad geológica de depósitos de vertiente, la unidad geomorfológica de escarpe, las altas pendientes presentadas y el suelo con coberturas asociadas a la actividad de la Cantera Las Nieves y sus frentes de explotación.

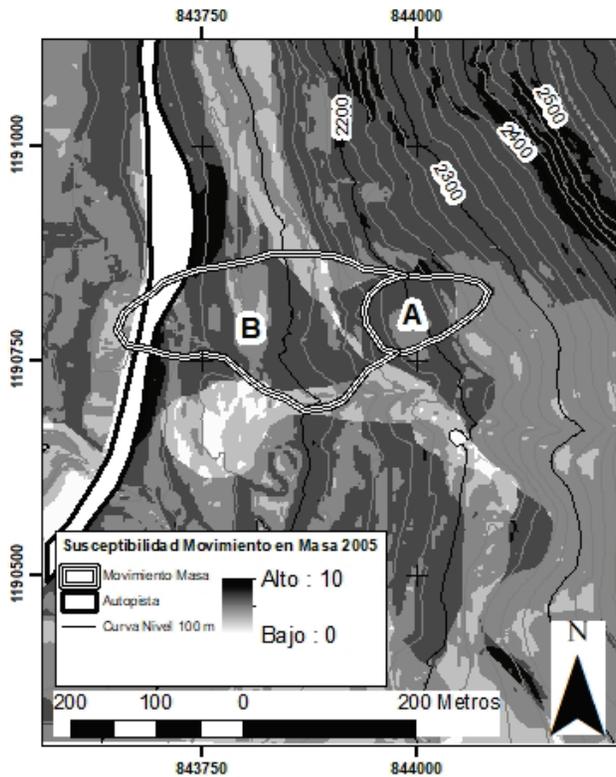


Figura 8. Susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2005 en el área estudiada. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

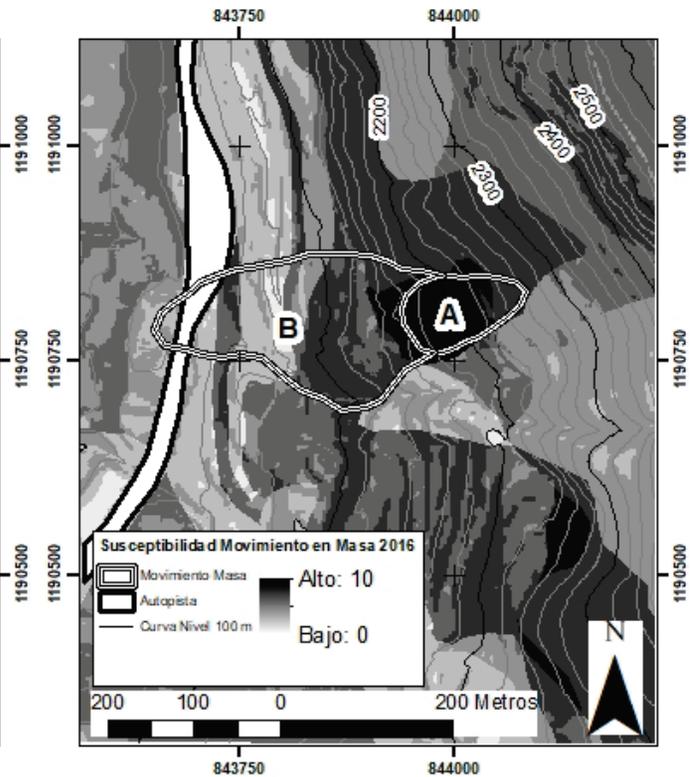


Figura 9. Susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2016 en el área estudiada. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

3.2. Condiciones jurídicas

La normatividad de ordenamiento territorial aplicable sobre determinado territorio, brinda las pautas para el desarrollo de actividades en el mismo, sin afectar el medio ambiente o materializar riesgos, principalmente por fenómenos naturales. El siguiente estudio normativo y jurídico busca verificar si existía para el momento del deslizamiento, algún registro de riesgo de movimientos en masa en el sector y que actividades se debían realizar para mitigarla.

3.2.1. PBOT del municipio de Copacabana

El instrumento de ordenamiento territorial que corresponde al municipio de Copacabana es un Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Al momento del movimiento en masa del 26 de octubre del 2016, el municipio se encontraba regido por el Acuerdo 025 del 20 de diciembre del 2000 [16]. Como la vigencia normativa a largo plazo de los instrumentos de ordenamiento territorial es de 12 años, el municipio de Copacabana debió actualizarlo en el 2012.

Al verificar la clasificación del suelo del sector donde se originó el movimiento en masa, se encontró que la zona comprendida por encima de la autopista Medellín-Bogotá en la vereda El Cabuyal, es considerado como suelo de protección en el artículo 62, numeral 1.1.. El artículo 67 considera la vereda El Cabuyal (Sector Las Margaritas-La

Autopista) como una zona de riesgo mitigable o recuperable por amenaza o riesgo natural.

Al verificar los usos del suelo para el sector se encontró que el uso principal es “*Forestal protector productor*”, y que como usos prohibidos se encuentra “*Minería en zonas de recargas de aguas. Deforestación. Ganadería extensiva. Apertura de vías.*”.

Esta normativa de usos del suelo fue corroborada el 15 de abril del 2016, 6 meses antes del movimiento en masa, mediante oficio [23], disponible en el Expediente AN3-2004-2 [17]. Se aclara que “*La actividad Minera descrita no es compatible con el uso del suelo estipulado en el PBOT del Municipio de Copacabana, no obstante, se aclara que conforme al parágrafo 2° del artículo 2° del Decreto Nacional 0934 del 2013, esta prohibición “no podrán ser oponibles, aplicadas o exigidas a las actividades mineras, por ninguna autoridad.”*” [24]. El 19 de diciembre del 2018, dos años después del movimiento en masa, se corrobora mediante oficio [25] que dichos usos continúan vigentes y no han cambiado. También se confirma que el sitio donde se desarrollan las actividades mineras corresponde a una zona de protección forestal y de alto riesgo mitigable.

Si bien el PBOT del municipio de Copacabana consideraba el sector como protección forestal y zona de alto riesgo mitigable, y que consecuentemente, la deforestación y la actividad minera en la zona donde se originó el movimiento en masa están prohibidas, este no tenía la autoridad para impedir esta actividad debido a restricciones

normativas de orden nacional [26].

Es importante aclarar que en el expediente minero AN3-2004-2 [17], se encontró que el municipio de Copacabana había solicitado desde el año 2010 y mediante oficio [27] que la autoridad ambiental Corantioquia, hiciera “*el control y seguimiento a las proyectos, obras o actividades autorizadas*” en el plan de manejo ambiental a, entre otras, la Cantera Las Nieves.

3.2.2. Expediente minero

Debido a que el sitio en estudio está al interior de una licencia minera, el expediente de la misma contiene información importante sobre las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio, lo cual incluye el riesgo por movimiento en masa. Además, dicta las condiciones en las que se deben desarrollar las actividades mineras para evitar la materialización del riesgo.

El expediente minero de la Cantera Las Nieves [17] fue consultado en la sede principal de Corantioquia, consulta autorizada mediante oficio [28].

Por medio de la resolución 4888 del 01 de septiembre del 2006 de Corantioquia, resolución contenida en el expediente minero [17], se otorga la licencia ambiental a la explotación de la Cantera Las Nieves, y se estipula que el método de explotación consistirá en bancos descendentes con arranque mecánico en dos frentes. La explotación se autoriza entre las cotas 2100 y 2205 para el frente norte y entre las cotas 2100 y 2300 para el frente sur. El límite entre los dos frentes es la quebrada Suramericana.

3.3. Condiciones técnicas de la explotación minera

3.3.1. Evolución de la explotación

Para determinar la evolución de la explotación minera en zona del movimiento en masa se verificaron las imágenes satelitales del periodo 2005-2018 [14, 15, 19-21], mostradas en la Fig. 10.

Estas evidenciaron que en 2005 el sector contaba con cobertura boscosa y no presentaba explotación minera. Para el 2011, se había hecho el respectivo descapote y la explotación de la capa superficial del suelo en la zona donde se originó y donde se depositó el movimiento en masa. En el 2015 este sector se encontraba abandonado. Este abandono debió atender a los parámetros técnicos del cierre y abandono de minas. Con la explotación suspendida los suelos del sector recuperaron su cobertura vegetal en forma de rastrojos bajos. En el 2018 es posible observar que después del 2015 y hasta la suspensión de las actividades en la cantera, las obras de explotación continuaron en la zona alta de la ladera, justo por encima de la zona sobre la cual se generó el movimiento en masa.

En las fotografías tomadas posteriormente al movimiento en masa (Figs. 1, 5), se confirma el análisis de las imágenes satelitales, observando que la deforestación y apertura de caminos se desarrollaron antes del movimiento en masa en el punto donde se originó el mismo.

3.3.2. Método de explotación

Al realizar el análisis multitemporal en el periodo 2005-2018 de las imágenes satelitales georreferenciadas y comparando estas con la topografía oficial sector [14, 15, 19-21], es posible determinar los límites de la explotación en cada momento (Fig. 10)

La explotación se dio en la parte baja de la ladera en el año 2009 y ascendió paulatinamente. En el frente 2 se superó el límite de la cota 2205 en el 2011 o antes, mientras en el frente 1 se superó el límite establecido por la cota 2300 en el año 2015 o antes. Se observa que el método de explotación autorizado no se cumplió, pues la explotación se realizó de manera ascendente, es decir, de la cota menor a la cota mayor y por fuera de los límites definidos y autorizados por el PTO y la licencia ambiental.

3.3.3. Manejo de aguas

La causa principal del deslizamiento fue la saturación del suelo debido a las aguas subterráneas en el sector [3]. El afloramiento de parte de las aguas subterráneas y las consecuencias de su manejo de forma inadecuada, eran condiciones conocidas por los propietarios de la cantera y las autoridades ambientales [17]. El manejo de estas aguas era responsabilidad de la cantera y debió de darse de acuerdo con lo estipulado en el Plan de Manejo Ambiental (PMA) de tal manera que garantizara la seguridad del proyecto, la estabilidad de los taludes y la protección del medio ambiente en el área de influencia del mismo. La verificación de su cumplimiento era responsabilidad de los entes de control, en este caso, Corantioquia y Secretaria de Minas de la gobernación de Antioquia [26].

4. Discusión

El sector donde se originó el deslizamiento del día 26 de octubre del 2016 y particularmente el sector en el cual se ubica la “Cantera Las Nieves”, es una zona de altas pendientes, las cuales son reconocidas en las zonas tropicales como el principal factor de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. Las condiciones geológicas y geomorfológicas del sector estudiado, caracterizado por escarpes rocosos y depósitos de vertiente en sus bases, indican la ocurrencia en el pasado de grandes movimientos en masa y una alta susceptibilidad a la ocurrencia de nuevos movimientos. Los suelos desnudos presentan una probabilidad al desarrollo de movimientos en masa mucho mayor que suelos con cobertura boscosa, por lo tanto, el cambio de cobertura de suelos presentado en la zona de estudio afectó considerablemente la estabilidad de la ladera.

El movimiento en masa del 26 de octubre del 2016 está asociado a la presencia de aguas subterráneas. La presencia de dichas aguas, la necesidad de su adecuado manejo y las posibles consecuencias de las mismas, eran conocidas por los propietarios de la cantera y la autoridad ambiental competente. La generación de un movimiento en masa por consecuencia de estas implica un mal manejo técnico de las

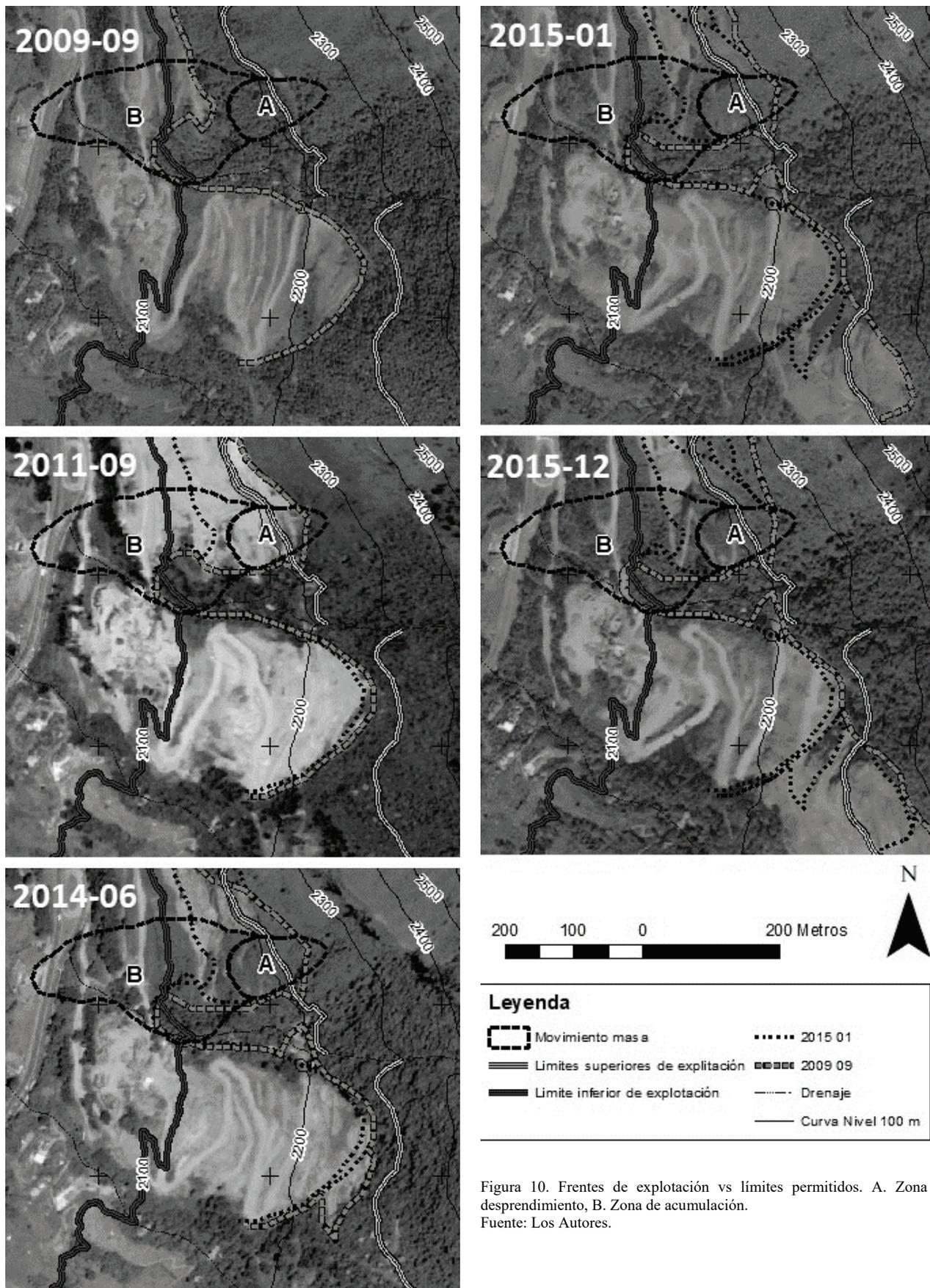


Figura 10. Frentes de explotación vs límites permitidos. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

mismas, responsabilidad de los propietarios de la cantera y los entes de control.

El PBOT del municipio de Copacabana encontró la zona de estudio con alto riesgo mitigable por movimiento en masa, además, en función de esta característica, considera que las actividades de minería, deforestación y apertura de caminos no se deben de realizar en el sector. El análisis de fotografías muestra que la minería, la apertura de caminos y la deforestación se realizaron en el sitio. La susceptibilidad a movimiento en masa aumentó de manera significativa debido a los cambios en el territorio asociados a la actividad minera. La máxima susceptibilidad en el año 2005 estaba asociada a los escarpes de la ladera. La máxima susceptibilidad en el año 2016 estaba asociada a la actividad minera y presenta su valor máximo en el área particular donde se originó el movimiento en masa. Las condiciones de inestabilidad de la ladera donde se desarrolló la explotación minera eran conocidas por el estado y la empresa privada a través del PBOT del municipio de Copacabana y el PTO y los PMA de la Cantera Las Nieves.

La “Cantera Las Nieves” no fue explotada con la metodología de banqueo descendente planteada en el PTO y requerida para la explotación a cielo abierto en zonas de alta pendiente. La explotación ascendente va en contravía de lo establecido por las autoridades en la licencia minera. La cota 2300, cota definida como límite superior para la explotación del “Frente 1” y la cota 2205, cota definida como el límite superior de las explotaciones del “Frente 2” y la zona norte de la “Cantera Las Nieves”, no fueron respetadas. Las explotaciones por fuera de la zona estipulada y en la zona alta de la ladera constituyen una violación a lo definido en la Licencia Ambiental y Minera. El desarrollo de actividades mineras sin atender los parámetros técnicos establecidos y verificados en los procesos de licenciamiento aumenta la posibilidad de ocurrencia de desastres.

El movimiento en masa en la “Cantera Las Nieves” se originó en un sector previamente explotado. Es responsabilidad de quienes ejecutan la explotación, garantizar que las zonas abandonadas son recuperadas ambientalmente y todos los riesgos presentes sean mitigados.

El tramo de la autopista Medellín-Bogotá comprendido entre Zamora y el Alto de la Virgen tiene condiciones similares a las presentada en el sitio del deslizamiento. Este tramo presenta altas pendientes, suelos asociados a depósitos de vertientes y múltiples afluentes y afloramientos de aguas subterráneas. En la zona se presenta una alta ocupación del suelo representada en múltiples canteras para la extracción de materiales pétreos, además de otros movimientos de tierras y deforestación asociadas a otras actividades económicas.

Estas condiciones configuran un escenario donde es posible la ocurrencia de nuevos movimientos de masa de grandes magnitudes. Los corredores asociados a importantes interconexiones viales como la autopista Medellín-Bogotá y otras autopistas de montaña, deben contar con estudios de gestión del riesgo que permitan determinar la posibilidad de ocurrencia de estos eventos y las medidas requeridas para la mitigación de los mismos. Ante la ausencia de dichos estudios y la posibilidad o recursos para realizarlos, los

concesionarios responsables de las vías deberían avanzar en su implementación, principalmente en los tramos viales con mayores pendientes.

Referencias

- [1] Giraldo-Ramírez, W. y Ordóñez-Carmona, O., Problema geotécnico del Km 6 de la autopista Medellín-Bogotá: antecedentes, causas y soluciones alternativas. *Boletín Ciencias de la Tierra* 34, pp. 25-33, 2013.
- [2] El Colombiano, Declaran calamidad pública por derrumbe en la Medellín-Bogotá, 30 de diciembre del 2016. [en línea]. 2016. [Consultado el 16 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/declaran-calamidad-publica-por-derrumbe-en-la-medellin-bogota-EN5681402>
- [3] UNGRD, Informe Post-Misión: Copacabana. Fecha: octubre 26 a noviembre 2 de 2016. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres Presidencia de la República, 2016.
- [4] El Colombiano, Seis muertos y cuatro heridos por derrumbe en Autopista Medellín-Bogotá, 26 de octubre del 2016, [en línea]. 2016. [Consultado el 01 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/seis-muertos-y-cuatro-heridos-derrumbe-autopista-medell-articulo-662356>
- [5] Alcaldía de Copacabana, Sala de Prensa, [en línea]. 2016 [Consultado el 11 de noviembre del 2016]. Disponible en: <http://www.copacabana.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Pagina/default.aspx>
- [6] USAR, Ya son 13 los cuerpos recuperados en emergencia presentada vía Medellín-Bogotá, 1 de noviembre del 2016. [en línea]. 2016. [Consultado el 10 de noviembre del 2016]. Disponible en: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/usar/sala-de-prensa/Lists/EntradasDeBlog/Post.aspx?ID=29>
- [7] Devimed, El antes y después del derrumbe en la autopista, 28 de octubre del 2016. [en línea]. 2016, [Consultado el 01 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://mioriente.com/altiplano/despues-del-derrumbe-la-autopista.html>
- [8] Toussaint, J.F. and Restrepo, J.J., Tectonostratigraphic terranes in Colombia: an update. Second part: oceanic terranes. In: Gómez, J. and Pinilla-Pachón, A.O., (eds.), *The geology of Colombia*, Vol. 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas. Especiales. 36, 2020, 24 P. Bogotá. DOI: 10.32685/pub.esp.36.2019.07.
- [9] Rendón, D., Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín. Trabajo de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 200 P, 1999.
- [10] Aristizabal, E. y Yokota, E., Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 24, pp. 5-18, 2008.
- [11] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Geomorfología del Valle de Aburrá, [en línea]. 2019. [Consultado el 8 de mayo del 2020]. Disponible en: <http://geografico.metropol.gov.co/arcgis/rest/services/Geomorfologia/Geomorfologia/MapServer>
- [12] Corantioquia-Area Metropolitana del Valle de Aburrá, Estudio de zonas de recarga y acuíferos del Valle de Aburrá, 2002.
- [13] Giraldo, W., Modelo hidrogeológico conceptual de los valles de San Nicolás y de La Unión. Universidad Nacional de Colombia-Cornare, 2013.
- [14] CartoAntioquia. Convenio interadministrativo 4085 de 2009 para la generación de la cartografía del Departamento de Antioquia, suscrita entre el Departamento de Antioquia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC, 2011.
- [15] Google Earth. Imágenes satelitales del municipio de Copacabana, [en línea]. 2020. [Recuperado el 01 de mayo del 2019].
- [16] Municipio de Copacabana. Acuerdo 025 de 2000-Plan básico de ordenamiento territorial, Municipio de Copacabana. 2000.
- [17] Corantioquia, Expediente AN3-2004-2 Título Minero 5530, Cantera Las Nieves, Archivo general de Corantioquia, 2004.
- [18] Diarioriente, Se declaró la calamidad pública para atender la emergencia del cierre de la autopista Medellín – Bogotá, 31 de diciembre del 2016. [en línea]. 2016. [Consultado el 16 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://diarioriente.com/altiplano/se-declaro-la>

calamidad-publica-atender-la-emergencia-del-cierre-la-autopista-medellin-bogota.html

- [19] Schepaschenko, D., See, L., Lesiv, M., Bastin, J., Mollicone, D., Tsendbazar, N., Bastin, L., McCallum, I., Laso-Bayas, J., Baklanov, A., Perger, C., Dürauer, M. and Fritz, S., Recent advances in forest observation with visual interpretation of very high-resolution imagery. *Surv Geophys* 40, pp. 839-862, 2019. DOI: 10.1007/s10712-019-09533-z
- [20] Svatonova, H., Analysis of visual interpretation of satellite data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B2, pp. 67-681, 2016. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B2-675-2016
- [21] Arranz-López, A., López-Escolano, C., Salinas-Solé, C., Zúñiga-Antón, M., Montorio-Llovería, R. y Pueyo-Campos, A., El potencial de Google Earth aplicado al análisis espacial en Geografía. En: *Innovación en la enseñanza de la geografía ante los desafíos sociales y territoriales*, Universidad de Zaragoza, 2013, pp. 179-194. ISBN 978-84-9911-249-7.
- [22] Cornare, Gobernación de Antioquia, evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos en los 26 municipios de la jurisdicción de Cornare. Convenio Cornare-Gobernación de Antioquia N° 2011-cf-12-0051 y 217-2011, 2011.
- [23] Villegas, J.C., Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquia. *Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 1(Enero-Junio), pp. pp.73-79, 2004.
- [24] Municipio de Copacabana. Oficio 1605 1945 01844 del 15 de abril del 2016, De Frank Montoya Arroyave, Director del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, a Cesar Augusto Saldarriaga, Gerente Regional Agregados y Proyectos Mineros de Antioquia S.A. – APMA-. 2016.
- [25] Municipio de Copacabana. Oficio 12569 del 19 de diciembre del 2018, De Luis Carlos Gómez Hernández, Director del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, a Raúl Guillermo Tamayo Zapata. 2016.
- [26] Ministerio de Minas y Energía. Decreto Numero 0934 de 9 de mayo del 2013, Por el cual se reglamentan el Artículo 37 de la Ley 685 de 2001. 2013.
- [27] Municipio de Copacabana. Oficio 103-964 1090 del 18 de marzo del 2010, De Diego Echeverri Hincapié, Alcalde, a Carlos Alberto Molina Gómez, Director territorial Aburrá Norte, Corantioquia. 2010.
- [28] Corantioquia. Oficio FT-GIC-18 del 12 de diciembre del 2018, De Julian Andres Granada Restrepo, Jefe Oficina Territorial Aburrá Norte, a Raúl Guillermo Tamayo Zapata. 2018.

W.E. Giraldo-Ramírez, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, MSc. y PhD (candidato) de la Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Actualmente investiga la evolución geodinámica de los Andes del Norte y las aplicaciones de la geología al ordenamiento territorial.

ORCID: 0000-0003-3339-1741

M.F. Aristizabal-Arboleda, es Ingeniera Geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ORCID: 0000-0002-7842-7659



Sequential stratigraphy of the Guajira Lower Sub-basin

Luis Antonio Castillo-López^a & Thais de Souza Kazmierczack^b

^a Departamento de Geociencias, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil. luiscastillo@ufam.edu.br

^b Hocol, Bogotá, Colombia, thais.desouza@hocol.com.co

Received: October 4th, 2018. Received in revised form: September 16th, 2019. Accepted: October 18th, 2019.

Abstract

Sequence stratigraphy comprise one useful and solid tool for understanding stratigraphy historical of the rocks in subsurface. Based on staking patterns identified on well logs at southeast of the area, it is possible to interpret progradation, retrogradation trends, and their bounding surfaces, which are also interpreted on the seismic lines. Then, with petrophysical analyses populate sequences of interest into tectonostratigraphic model. The Lower Guajira Sub-Basin comprises a huge depocenter of stacking rocks from Cretaceous and Cenozoic age. The results show three depositional sequences, involving seven system tracts. Considering ages reported for some depth intervals, it is possible the interpretation based on Wheeler domain, getting depositional, erosion and non-depositional stages.

Keywords: sequence stratigraphy; Guajira; tectonostratigraphy.

Estratigrafía secuencial de la Sub-cuenca de la Baja Guajira

Resumen

La estratigrafía de secuencias se constituye en una herramienta sólida y útil para el entendimiento y disposición de la historia estratigráfica de las rocas en el subsuelo. A partir de la identificación de patrones de apilamiento de datos geológicos o geofísicos (registros de pozo y datos sísmicos). Así, junto a análisis petrofísicos, localizados al sureste de la Guajira se interpretan la geometría y tendencias sedimentares, de los diferentes paquetes de roca dispuestos en el subsuelo. La Sub-cuenca de La Baja Guajira, constituye un gran depocentro, con secuencias de sedimentos apilados con edad Cretácica y Cenozoica. Como resultado de este estudio se interpretaron tres secuencias deposicionales que incluyen siete tratos de sistema, y considerando la información de los pozos se reportan algunas edades para diferentes intervalos de profundidad, a partir de la cual se construye un diagrama de Wheeler, donde se establecen periodos de depositación junto con intervalos de erosión, sufridos en la cuenca.

Palabras clave: estratigrafía de secuencias; Guajira; tectonoestratigrafía.

1. Introduction

La Cuenca de la Guajira se divide en las Sub-Cuencas de la Alta y la Baja Guajira [1], la cual se encuentra limitada por las Falla de Cuiza al norte y la Falla de Oca al sur. La transtensión a lo largo de estos sistemas de fallas es la responsable de la formación de depocentros [2], donde son depositadas espesas secuencias sedimentarias Cretácicas y Cenozoicas. La Baja Guajira es considerada una cuenca inexplorada, donde los campos gasíferos encontrados (Chuchupa, Ballena y Riohacha), constituyen tres descubrimientos de gas importantes [3], representando así, un

área de interés dentro de la industria petrolera. Así, se busca tener un mayor conocimiento de la zona en general, para lo cual se plantea un modelo estratigráfico, abordado desde la perspectiva de la estratigrafía secuencial, como herramienta que determina la disposición espacio temporal de las rocas en el subsuelo, especialmente en la exploración de hidrocarburos, donde cambios de facies verticales y laterales pueden ser formulados con la construcción de dichos modelos [4].

En este trabajo se toman como referencia principal conceptos estratigráficos actuales [4], para la definición y determinación de superficies claves (superficie de inundación

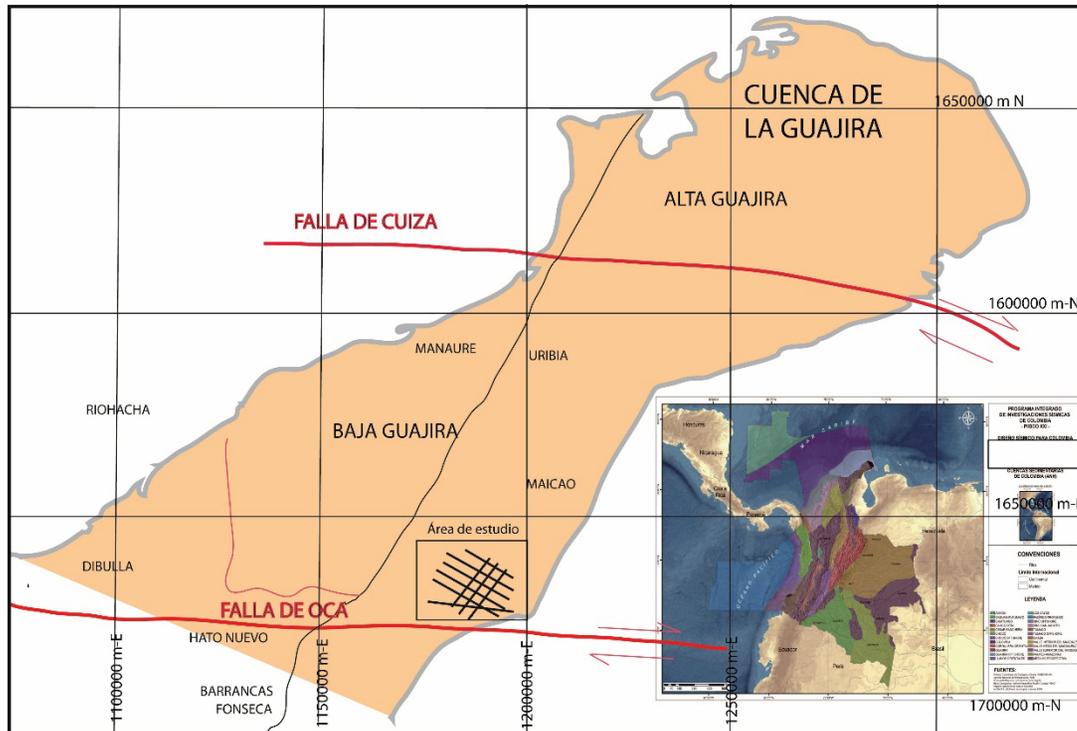


Figura 1. Área de estudio y distribución de datos disponibles: Líneas sísmicas y registros de pozo.
Fuente: Los Autores.

inundación máxima, *sim*; discordancias e inundación), Tratos de Sistema a partir del reconocimiento de patrones de apilamiento específicos. Estos Tratos de Sistema definen, “unidades estratigráficas relacionadas genéticamente [5], que incorporan estratos depositados dentro de un sistema de dispersión sincrónico”, los cuales pueden ser asignados a una posición particular en la curva del nivel base en la línea de costa. Como complemento, es importante la determinación de superficies estratigráficas que marcan cambios a través del tiempo en los regímenes deposicionales, creadas por la interacción entre el nivel base y la sedimentación.

1.1. Área de estudio e información

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sureste de la Península de la Guajira, en cercanías al área de Maicao (Fig 1). Hace parte de Sub-Cuenca de la Baja Guajira [6], cuyos límites están constituidos por el sistema de fallas de Cuiza al norte, la Falla de Oca al sur, el Mar Caribe al Oeste y el Golfo de Venezuela al Este [7].

La información consiste en datos de superficie y de subsuelo. Datos de superficie incluyen la cartografía geológica, muestreo geoquímico, mientras las de subsuelo: líneas sísmicas, gravimetría, pozos con su conjunto de registros eléctricos (GR, SP, R, Ø). Además, se cuenta con reportes internos, tesis, artículos publicados.

Se contó con un levantamiento sísmica 2D, adquirido al sureste Guajira, en cercanías al municipio de Maicao. La información sísmica corresponde a 13 líneas migradas In-In (con filtros y escalares).

Estudios de superficie presentan cartografías con depósitos Neógenos, y a lo mucho Cretácicos en la sección más norte de la Alta Guajira. Por ello se hace necesario considerar los datos de pozos y sísmica, para establecer un modelo del subsuelo con mayor alcance. A partir de ello el modelo estratigráfico, basado en los datos, independiente de la interpretación secuencial.

La Subcuenca de la Alta Guajira se caracteriza, hacia la base por presentar secuencias tectonoestratigráficas (tipo Rift), y secuencias deposicionales hacia la parte superior (Fig. 2). La Subcuenca de la Baja Guajira, foco de este estudio, comprende secuencias deposicionales (cuatro secuencias deposicionales: secuencias 1 al 4), se evidencian cambios eustáticos y de influencia tectónica en el sector sur de la Cuenca.

2. Geología

La configuración estratigráfica y estructural de la Cuenca de la Guajira está influenciada por el desplazamiento lateral de la Placa Caribe a lo largo del margen norte de la Placa de Suramérica, generando grandes fallas de rumbo que controlan el área. La Falla de Cuiza, junto con la Falla de Oca son unos de los rasgos estructurales más sobresalientes del área. Estas son fallas de rumbo dextrales, cuyo movimiento ha generado el levantamiento y deformación de diferentes bloques [2].

El relevo del sistema de fallas Oca-Cuiza se cree es el responsable de la formación de la Sub-Cuenca de la Baja Guajira dentro de un ambiente transtensional [2]. Las formaciones

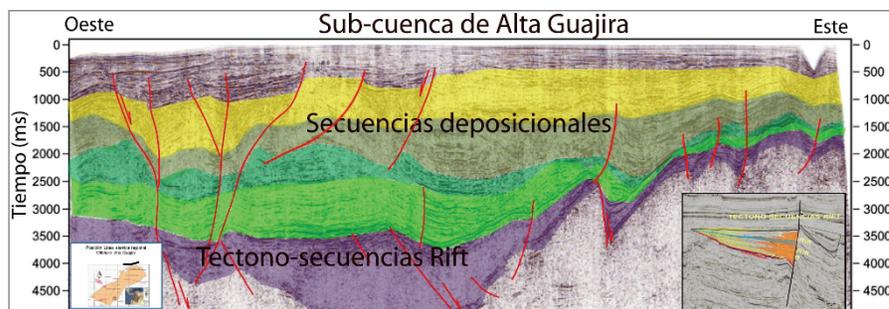


Figura 2. Secuencias y tectono-secuencias rift en la Cuenca de la Guajira (sector de la Alta Guajira). Fuente: Los Autores.

presentes en esta área van desde el Jurásico inferior hasta el Reciente, y fueron depositadas en ambientes tanto marino como continental. El basamento pre-Mesozoico se encuentra expuesto al Noroeste de la sub-cuenca, junto con rocas triásicas y jurásicas [7]. El sector occidental de la sub-cuenca, y el sector de la Guajira costa afuera comparten características geológicas y de producción similares, a diferencia del sector oriental que se compara más fácilmente con el Golfo de Maracaibo y sus condiciones geológicas [3].

En la sub-cuenca de la Baja Guajira la sucesión estratigráfica se sintetiza de la siguiente forma [8]: el basamento constituido principalmente por un cinturón de rocas máficas y ultramáficas con dirección este-oeste (74 MA con K-Ar [8]; rocas metamórficas en facies esquisto verde y anfibolita de edad cretácica [9], presentes en la región costa afuera de la cuenca, y un cinturón de granitos con tendencia noreste hacia la zona costera y la Sierra Nevada de Santa Marta. Discordantemente, sobre el basamento, se encuentra una sucesión de rocas cretácicas no diferenciadas, reportada en los pozos Guaitapa-1 y Los Manantiales-1. Litológicamente la unidad se compone de lodolitas con intercalaciones de areniscas y calizas depositadas en ambientes de plataforma en el sector del pozo Los Manantiales-1 [3], alcanzando 2270 pies de profundidad y 2036 pies en el pozo Guaitapa-1, con edad reportada de Maastrichtiano temprano a tardío con base datos bioestratigráficos [10]. La secuencia estratigráfica continúa con la Formación Uitpa que consiste en areniscas intercaladas con shales y calizas biomicríticas, de edad Mioceno temprano, según datos bioestratigráficos en diferentes pozos. La Formación Jimol consiste de biomicritas y esparitas depositadas en un ambiente de plataforma. La Formación Castilletes se compone de arcillolitas, limolitas y areniscas depositadas en un ambiente de plataforma interior a exterior [11], cuya bioestratigrafía reporta una edad de Mioceno tardío a Plioceno [3].

La Cuenca de la Guajira ha sufrido varios eventos de deformación importantes; el primero correspondiente a un proceso de apertura "Rifting" en el Eoceno tardío que generó medio grabens "Half-grabens" en el norte de la región, seguido por transtensión en el Oligoceno que produjo cuencas extensionales; transtensión durante el Mioceno temprano y medio, y un último evento asociado al levantamiento de los Andes durante el Mioceno tardío -

Plioceno temprano, paralelo al relleno de las cuencas sedimentarias. [12].

Estructuralmente, la sub-cuenca de la Baja Guajira se comporta como un medio graben limitado al norte y sur por las fallas de Cuiza y Oca, respectivamente. Los esfuerzos tectónicos en el sector de la Guajira están por lo general localizados en las zonas aledañas a tales fallas y se relacionan con los movimientos transcurrentes de las mismas. [12].

3. Sismoestratigrafía

Para el control de calidad de los registros (archivos ".las") disponibles para cada uno de los 3 pozos (Well-1, Well-2, Well-3), se editaron ("merge" y "splice"), para unir los segmentos, con el fin de obtener una curva única, con la mayor longitud de registro. A pesar de tener datos sísmicos con el mismo procesamiento post-apilado, con filtros y escalares adicionales, estos no presentan un buen amarre. Por ello se hizo una re-edición, amarre y correlación con los registros de pozo. Para hacer el amarre de los pozos a la sísmica, se emplearon registros de chequeo para dos de los pozos, y se realizó una interpolación con el pozo que no se tenía información de velocidades (Fig. 3).

Los registros para la interpretación constituyen el combo básico: Potencial Espontaneo (SP), no todos los pozos contaban con registros Gamma Ray (GR) o estos estaban incompletos. Ya una vez cargados los pozos a la plataforma, mediante el análisis, usando la metodología de karogodin [13], se identificaron los patrones de apilamiento (agradación,

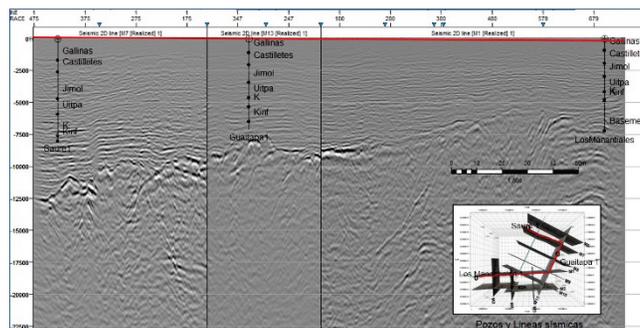


Figura 3. Amarre de pozos y la sísmica para el sector este de la Baja Guajira. Fuente: Los Autores.

progradación, retrogradación), para poder definir las principales superficies estratigráficas (Superficies de Inundación, superficies de máxima inundación y superficies discordantes).

Acorde a los registros de pozo, se continúa con la interpretación de los diferentes horizontes en las líneas sísmicas (Figs. 4 y 5), asociados a las superficies estratigráficas interpretadas. Los patrones de apilamiento identificados en el pozo Well-1, se observa, de base a tope las siguientes tendencias:

- Granocreciente en el intervalo de 7200 a 6300 pies (Cretácico superior).

- Granodecreciente de 6300 a 4800 pies (Cretácico superior).
- Granocreciente de 4800 a 4200 pies (Mioceno medio).
- Granodecreciente de 4200 a 3800 pies
- Granocreciente de 3800 a 2600 pies
- Granodecreciente de 2600 a 1000 pies.
- Constante de 1000 a 0 pies de profundidad (para los dos últimos intervalos la edad probable reportada es Plioceno superior a Pleistoceno).

A partir de los patrones de apilamiento observados se definen las secuencias deposicionales, con un total de siete Tratos de Sistema en la sección estudiada, limitados por diferentes superficies estratigráficas (Fig. 6):

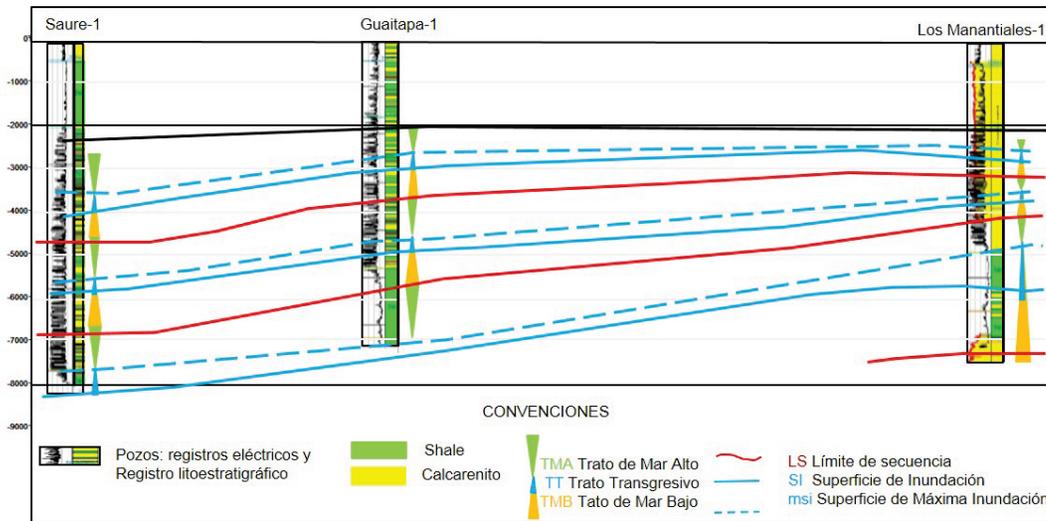


Figura 4. Correlación secuencial de registros de pozos para el sector este de la Baja Guajira. Fuente: Los Autores.

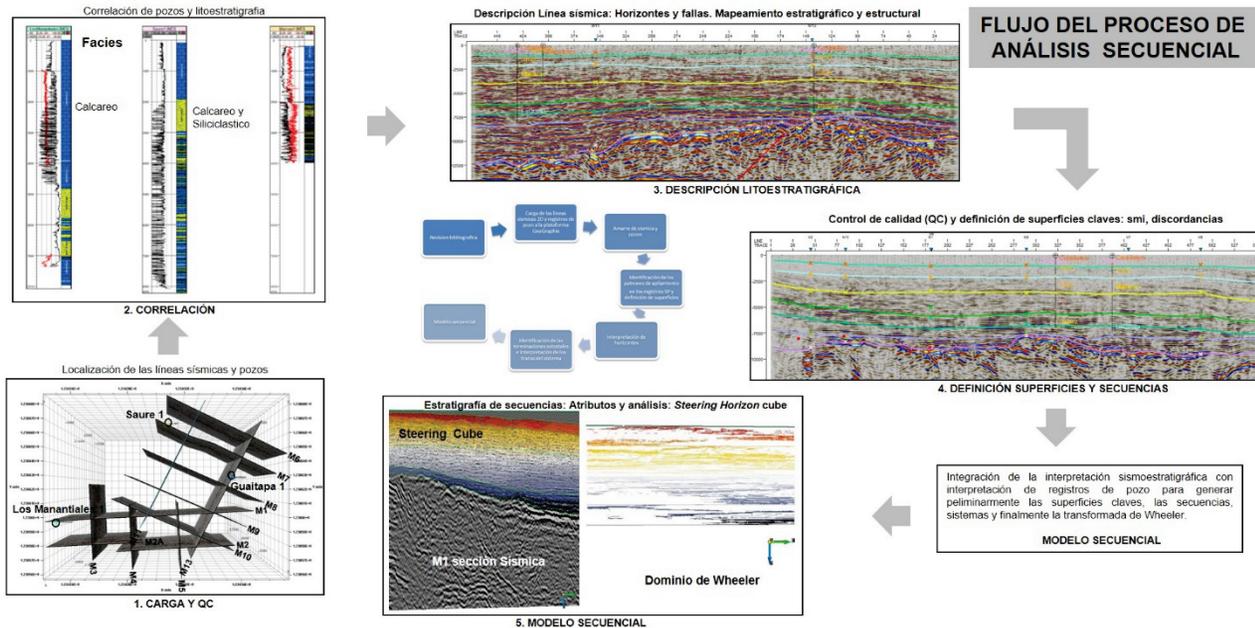


Figura 5. Síntesis de la metodología empleada para la construcción del modelo secuencial. Fuente: Los Autores

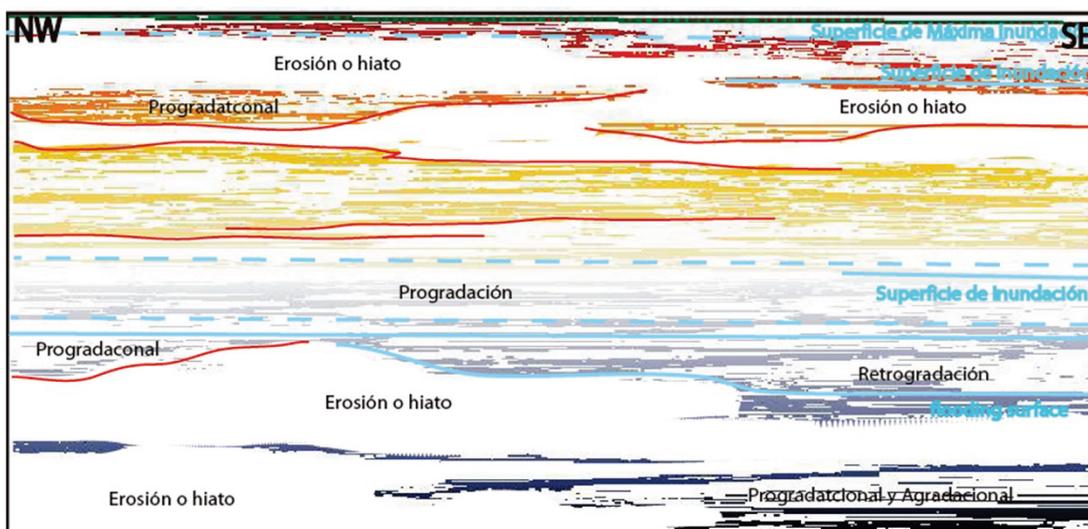


Figura 6. Disposición espacio temporal de los paquetes deposicionales e hiatos (diastemas o discordancias), a partir del diagrama de Wheeler [14]. Fuente: Los Autores.

- 1) TMB: cuyo límite inferior es una superficie discordante sobre el basamento, identificada en el registro SP a 7200 pies de profundidad. En este punto la sucesión comienza a ser progradante, depositada probablemente durante una etapa temprana de aumento en el nivel base, donde la tasa de sedimentación (S) es mayor que el espacio de acomodación (A) que se está generando ($A/S < 1$). El límite superior corresponde a una Superficie de Inundación (SI 1).
- 2) TT: tiene como límite inferior la SI 1. Como se infiere del registro SP, aquí la sucesión es retrogradante, se interpreta entonces un trato transgresivo, lo cual indica, que la secuencia fue depositada durante un aumento en el nivel de base en el que la tasa de acomodación sobrepasa a la tasa de sedimentación ($A/S > 1$). En el tope de la sucesión se observa una clara discordancia en la sección sísmica que se manifiesta como un fuerte contraste litológico en el registro SP.
- 3) TMB: el límite inferior corresponde a una fuerte discordancia, donde se marca el inicio de una tendencia granocreciente y finaliza con una SI.
- 4) TT: se identifica en el registro como una corta tendencia granodecreciente que culmina con una SMI.
- 5) TMA: sucesión progradante, es interpretada como un Trato de Mar Alto, lo cual indica que la sucesión fue depositada en la etapa final de subida de nivel base donde la tasa de acomodación cae sobre la tasa de deposición ($A/S < 1$).
- 6) TMB: a su base una superficie discordante que, aunque en el registro no es muy evidente es diferenciable en la sísmica y reportada en la literatura. Además, se evidencia la presencia de canales con sus rellenos respectivos.
- 7) TT: inicia con una SI y es identificado en el registro por un decrecimiento en la granulometría. Finaliza con una SMI.

Posteriormente, se identifican las terminaciones estratales observando la geometría de los reflectores en las líneas sísmicas. Una vez definidas todas las superficies, se definen los tratos del sistema para construir el modelo secuencial (Fig. 5).

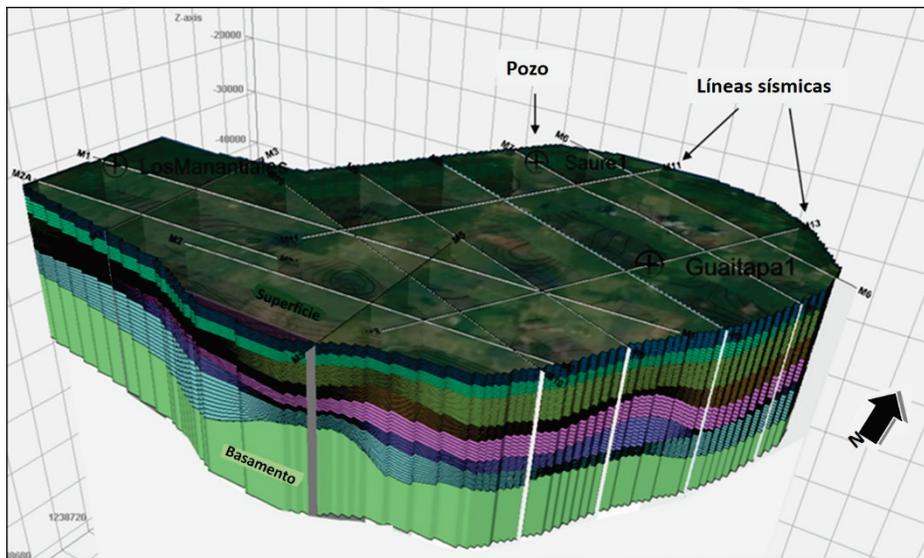
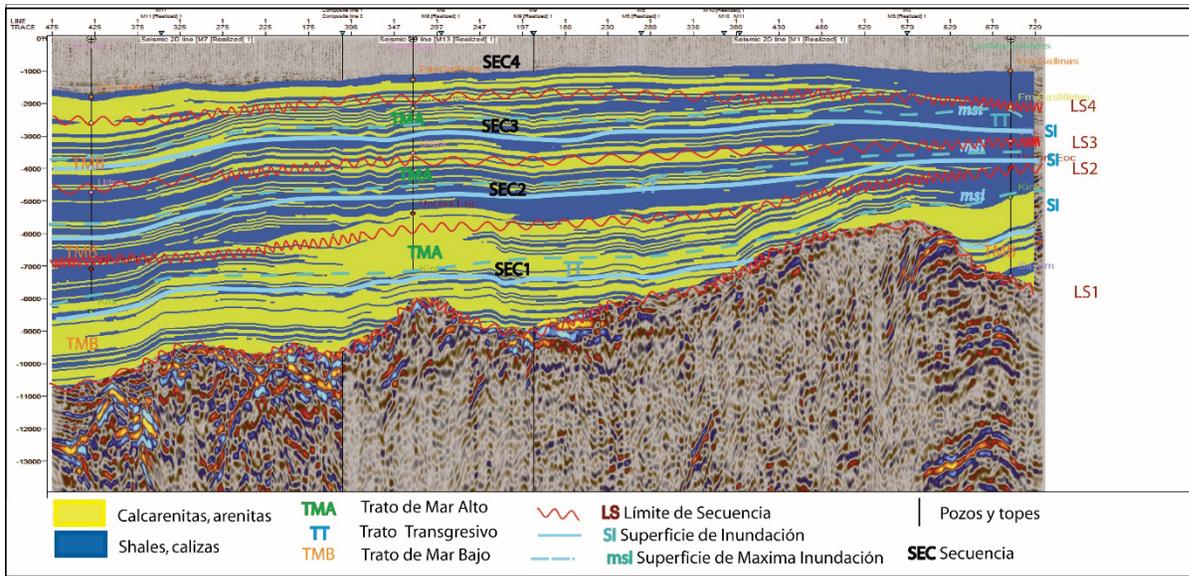
4. Análisis e integración

Debido a la baja calidad de las líneas sísmicas se dificultó la definición de los horizontes, los cuales se trazaron con incertidumbre en algunas de las líneas sísmicas. Para la interpretación final del modelo se empleó la línea 01, dispuesta E-W, amarrada a profundidad con el pozo Well-1, presentando una estructura general del área.

Mediante las superficies estratigráficas interpretadas es posible construir un diagrama de Wheeler (Fig. 6) con rangos de edades estimativos, a partir de las edades reportadas en las descripciones del pozo Well-1 halladas en la bibliografía. Como resultado se obtiene una sección cronoestratigráfica en la que se reconstruyen los periodos de deposición de las diferentes secuencias junto con los intervalos de erosión y no deposición (Fig. 7).

De esta manera, se interpreta un primer hiato, desde 136 Ma hasta 83 Ma aproximadamente (Valanginiano-Campaniano), representado por la discordancia al tope del basamento. Lo anterior, posiblemente indica que durante este lapso esta localidad de la Cuenca Guajira estuvo emergida, dando lugar a una etapa de erosión o no deposición.

Posteriormente se interpreta un periodo de deposición de alrededor de 10 Ma entre el Santoniano y Campaniano, seguido por un segundo hiato mucho más corto, que aumenta hacia el SW de la sección, probablemente porque la deformación en la zona genera un paleoalto sobre el cual van terminando los estratos. Seguido se presenta un periodo de depósito, que tiene como base una SI lo que implica el ingreso del mar en esta zona hace aproximadamente 74 Ma.



La discordancia principal y más evidente tanto en la sección sísmica como en el registro SP es la que representa un hiato de 50 Ma a partir de la parte alta del Maastrichtiano (~66 Ma), indicando un largo periodo de erosión y no depositación, cuya finalización en el Mioceno medio (~16 Ma) está posiblemente asociada a un cambio del régimen tectónico debido al levantamiento Andino. Desde este momento, el registro estratigráfico es solo interrumpido en dos breves periodos durante el Mioceno.

Basados en los datos sísmicos y de pozo, considerando las superficies claves, la estratigrafía y la estructural, se obtuvo un modelo tridimensional (Fig. 8).

5. Conclusiones y recomendaciones

La Cuenca de la Guajira comprende dos dominios estratigráficos, especialmente en el sector norte: secuencias tectonoestratigráficas y deposicionales. Esos dominios cambian para un dominio en el sector este de la subcuenca de la baja Guajira, donde solo se manifiestan secuencias deposicionales, con presencia de al menos cuatro secuencias deposicionales. Esto no incluye toda la subcuenca.

Las secuencias de la Cuenca de la Guajira están constituidas predominantemente por sedimentos siliciclásticos y carbonáticos, que con pocos datos de pozo permiten establecer un sistema petrolífero asociado a

secuencias estratigráficas y sus tratos de sistemas, estableciendo como sellos HST, LWSST y el TST como reservorio, especialmente para las secuencias superiores.

El desarrollo de secuencias esta relacionado a subsidencia y tectónica con secuencias de segundo orden. Definiendo un modelo final, según el marco estratigráfico y estructural conducido por los datos y el modelo, independiente de la estratigrafía de secuencias.

Dadas las características geológicas de la área estudiada, datos de pozo y sísmicos permiten comprender la configuración estructural de la sub-cuenca, y así mismo entender mejor la evolución geológica de la misma. Los modelamientos de la cuenca evidencian que las rocas de la baja Guajira son termalmente inmaduras. Por ello se sugiere un análisis del sector costa afuera de la cuenca (conocida como Depresión Tayrona), construyendo un modelo secuencial en este sector que permita predecir el comportamiento tanto lateral como vertical de las posibles rocas generadoras, reservorio y sello.

Es recomendable adicionar al modelo más datos, tanto de superficie como de subsuelo. Esto lleva consigo a un mejor y mayor detalle en la identificación de rasgos estratigráficos, útiles para la geofísica y la geología.

La tendencia de la sedimentación de la sub-cuenca de la baja Guajira es alta hacia el oeste, con depocentros mayores y dominados hacia la base, caracterizados por arenitas gruesas a medio, algunas veces mezclado con carbonatos.

En términos exploratorios, la secuencia 1 es la que mejor dispone de un posible sistema petrolífero, con el TT como sello y el TMB como reservorio, esto considerando una roca fuente, venida del sector norte, hacia el sur.

Estudios estratigráficos deben ser considerados y extendidos, ya que constituyen una herramienta sólida para conocimiento y disposición espacial y temporal de las rocas en el subsuelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a dGB Earth Sciences, permitiendo el uso de opendetect v6.4, cuyos módulos permitieron llevar a cabo los procesos de interpretación, correlación y modelamiento estratigráfico y secuencial, especialmente del dominio de Wheeler. Además agradecer a los revisores y editores, por su soporte y sugerencias para la mejoría del artículo.

Referencias

- [1] ANH. Evolución térmica de la Subcuenca de la Baja Guajira, 2008.
- [2] ANH. Catálogo Open Round Tipo 2, 2010.
- [3] ANH. Petroleum geology of Colombia, Guajira and Cayos Basins, Vol. 8, 2011.
- [4] Cataneanu, O., Principles of sequence stratigraphy. Elsevier, Amsterdam, 2006, 375 P.
- [5] Cataneanu, O., galloway, w., kendALL, C., MIAL, A., Posamentier, H., Strasser, A. and Tucker, M., Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. Newsletters on Stratigraphy, Stuttgart, 44(3), pp. 173-245, 2011.
- [6] Garcia, M., Mier, R. y Cruz, G., Reconstrucción de la historia paleotermal de la Subcuenca de la Baja Guajira, Colombia. Boletín

- Geol., [en línea]. 32(2), pp. 55-71. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832010000200004&ing=en&nrm=iso. ISSN 0120-0283.
- [7] Garcia, M., Mier, R. y Cruz, G., Geoquímica de hidrocarburos de la Subcuenca Baja Guajira, Colombia, Boletín de Geología. 33(2), pp. 55-57, 2011.
- [8] Cardona, A., Weber, M., Wilson, R., Cordani, U., Muñoz, C.M. y Paniagua, F., Evolución tectono-magmática de las rocas máficas ultramáficas del Cabo de La Vela y el Stock de Parashi, Península de La Guajira: registro de la evolución orogénica Cretácica-Eocena del norte de Suramérica y el Caribe. En: XI Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Agosto 14-17, 2007.
- [9] Mc Donald, W., Geology of the Serranía de Macuira area Guajira Peninsula, Colombia: PhD. dissertation, Princeton University, Nueva Jersey, USA, 1964.
- [10] Rubio, C., Correa, p., Suarez R., Rendon, L., Vargas, L. y Moreno, O., Potencial estratigráfico sector Carioca (Cuenca Baja Guajira) – Nuevo enfoque exploratorio en Colombia, en: International Congress of Conventional Hydrocarbon Resources, ACGGP. Cartagena, Colombia, 2008.
- [11] Cerón, J.F., Kellogg, J.N. and Ojeda, G.Y., Basement configuration of the northwestern South America–Caribbean margin from recent geophysical data. Ciencia, Tecnología y Futuro 3, pp. 25-49, 2007.
- [12] Vence, E., Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia, MSc. Thesis, Austin, Texas, USA, 2008, 128 P.
- [13] Karogodin, Ю.Н., Седиментационная Цикличность. 242с, 1975.
- [14] dGB Earth sciences, OpendTect: sequence stratigraphy interpretation, SSI, 2020.

L.A. Castillo-López, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, MSc. en Geofísica de la UFPa, Brasil y PhD en Estratigrafía de la UFRGS, Brasil. Labora en el área de geología, geofísica y petróleo como consultor y asesor para empresas de petróleo y gas. Además en el área académica fue docente e investigador de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor visitante del curso de posgrado en geología, Departamento de Geociencias de la UFAM - Universidade Federal do Amazonas, Brasil. Las áreas de interés incluyen simulación, modelamiento, evaluación petrolera, interpretación sísmica, estratigrafía de secuencias y uso de herramientas y técnicas modernas de interpretación.
ORCID: 0000-0003-4872-3219

T. de Souza-Kazmierczak, es Geóloga, MSc. en Estratigrafía de secuencias de la Universidad Federal de Río Grande del Sul - UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Se encuentra cursando el doctorado en geociencias en la Universidad Nacional de Colombia. Se desempeña como geóloga senior en Hocol-Colombia. Tiene vasta experiencia como integradora de datos geofísicos, geológicos y estratigrafía de secuencias para la exploración y producción de gas y petróleo en cuencas Colombianas, Brasileras entre otras.
ORCID: 0000-0002-9069-942X



Site characterization using geophysical and geotechnical Prospecting. Case study main road North Central Trunk (National Route 55) at Km 68 + 500 in the Municipality of Pamplona, North of Santander, Colombia

Anyelo José Moya-Gutiérrez ^a, Jairo Alberto Torres-Peña ^b & Manuel Contreras-Martínez ^c

^a Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, Colombia. anyelo.moya@unipamplona.edu.co

^b Grupo de Investigación en Geofísica y Geología (PANGEA), Universidad de Pamplona, Colombia. Jairo.torres2@unipamplona.edu.co

^c Grupo de Investigación en Ingeniería Civil (ETENOHA), Universidad de Pamplona, Colombia. macontreras7@hotmail.com

Received: February 28th, 2020. Received in revised form: June 15th, 2020. Accepted: August 24th, 2020.

Abstract

In the present investigation, geophysical and geotechnical techniques were applied to characterize the subsoil at the height of Km 68 + 500 in the municipality of Pamplona, define the electrical resistivity, seismic velocity type P and S, dynamic parameters of the soil, type of soil profile and acceleration spectrum curve using NSR10 title A, carrying out two phases: one in the field, where topographic survey was performed, two (2) SPT tests, four (4) SEV, two (2) TRS lines, two (2) of MASW 1D and 2D; and the data processing phase to generate 2D images of the profile, interpret and correlate, resulting in P wave velocities between 499m / s and 1714m / s, S wave velocities between 210m / s and 466m / s and resistivities between 6.06 Ω -m and 581.05 Ω -m., Type D soil profiles composed of rigid materials, sands with the presence of clay and saturated silty clay.

Keywords: geophysics; geotechnics; bearing capacity; s wave; p wave; refraction; elastic wave.

Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica. Caso de estudio vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia

Resumen

En la presente investigación se aplicaron técnicas geofísicas y geotécnicas para caracterizar el subsuelo a la altura del Km 68+500 del municipio de Pamplona, definir la resistividad eléctrica, velocidad sísmica tipo P y S, parámetros dinámicos del suelo, tipo de perfil de suelo y curva de espectro de aceleración mediante la NSR10 título A, llevando a cabo dos fases: una de campo, donde se realizó levantamiento topográfico, dos (2) ensayos de SPT, cuatro (4) de SEV, dos (2) líneas de TRS, dos (2) de MASW 1D y 2D; y la fase de procesamiento de datos para generar imágenes 2D del perfil, interpretar y correlacionar, dando como resultados, velocidades de onda P entre 499m/s y 1714m/s, velocidades de onda S entre 210m/s y 466m/s y resistividades entre 6.06 Ω -m y 581.05 Ω -m., perfiles de suelo Tipo D, compuestos de materiales rígidos, arenas con presencia de arcilla y arcilla limosa saturada.

Palabras clave: geofísica; geotecnia; resistividad eléctrica; onda s; onda p; refracción; onda elástica.

How to cite: Moya-Gutiérrez, A.J, Torres-Peña, J.A. and Contreras-Martínez, M, Site characterization using geophysical and geotechnical Prospecting. Case study main road North Central Trunk (National Route 55) at Km 68 + 500 in the Municipality of Pamplona, North of Santander, Colombia. Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 48, pp. 30-45, Febrero-Julio, 2020.

1. Introduction

En la presente investigación se pretende someter los estudios geofísicos con los geotécnicos para caracterizar, correlacionar las propiedades y conocer comportamiento del suelo desde el punto de vista de la ingeniería civil. Los estudios geofísicos, suelen ser: eléctricos, sísmicos, magnéticos y electromagnéticos [1]. Los métodos eléctricos son una técnica geofísica antigua, empleándose en ingeniería geológica, minería, arqueología, obras públicas y medio ambiente [2]. Los métodos sísmicos tales como Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW de sus siglas en inglés), estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de una onda de compresión producida por medios mecánicos en la superficie. El parámetro que se analiza es el de la Velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos [2]. La técnica de Geotecnia aplicada es el Ensayo de Penetración Estándar (SPT de sus siglas en inglés), este es un ensayo in situ de penetración por medio de golpeteo que define parámetros de diseño geotécnico [3]. El objetivo de esta exploración Geofísica y Geotécnica es obtener los parámetros del suelo los cuales serán indispensables al momento de clasificar el tipo de perfil del suelo de acuerdo a los lineamientos establecidos por la NSR-10 y fijar la respuesta de la curva de espectro de aceleración. La metodología que se lleva a cabo se divide en dos fases, la primera es donde se adquiere la información a lo largo de dos líneas de 80.5m la cual se asumió, correspondiente a la profundidad deseada de exploración y el tipo de fuente utilizada. La exploración fue realizada al costado de una vía, la topografía y la condición del sitio facilitaron la adquisición de datos; la segunda fase corresponde al procesamiento de cada ensayo y el análisis de los resultados obtenidos. Durante el procesamiento de datos geofísicos mediante el software, se filtra todo aquel ruido que es imposible evitarlo, el cual puede ser ambiental, cultural o geológico y lograr una buena interpretación y análisis de las imágenes captadas.

2. Antecedentes

En la jurisdicción de Guaduas del sector Villeta en Cundinamarca se utilizó Refracción Sísmica (26 líneas) para determinar los parámetros Geotécnicos, los módulos elásticos del subsuelo conocidos como módulo de Young (E), el módulo de corte máximo (G_0), módulo de deformación volumétrica (K) y relación de Poisson (ν), al igual del ensayo SPT se obtienen velocidades de corte con el número de golpes mediante correlaciones. [4].

En la universidad de Pamplona (sede principal), los métodos que se aplicaron para la caracterización del subsuelo de las zonas de estudio fueron Refracción sísmica, Reflexión sísmica, método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y Refracción por micro-tremores (ReMi). Una vez realizado el diseño de las líneas sísmicas y adquisición de los datos, se lleva a cabo el procesamiento de los mismos mediante los programas SeisImager de la empresa

Geometrics y Seismic Unix (CWP), obteniendo así perfiles 1D y 2D de cada zona. A través de los perfiles obtenidos de onda P y S se puede estimar el número de capas con sus espesores y tipo de material presente en el subsuelo con sus respectivas velocidades, además de los parámetros del subsuelo como son: capacidad portante, módulo de Poisson, módulo de rigidez, módulo de Young, densidad entre otros. [5].

En el Relleno Sanitario Regional “La Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) los parámetros geotécnicos fueron obtenidos a partir de datos geofísicos usando las técnicas de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Este trabajo abarco el diseño, la adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos geofísicos. Se obtuvieron perfiles de suelos D y C asociados a areniscas de granos muy finos con ángulos de fricción; Coeficiente de Poisson entre 0,399 y 0,44; Densidades entre 1464,8 – 1538,5 Kg/m³ entre otros parámetros de importancia. La aplicación de técnicas geofísicas actuales y modernas como complemento en la caracterización geotécnica en estudios de ingeniería, es un aporte novedoso en las ciencias de la ingeniería y la geotecnia [6].

3. Localización geográfica

El lugar de estudio está situado en las coordenadas 814.975 de longitud al oeste de Greenwich y a 761.264 de latitud norte, dicho emplazamiento en la zona 18 del hemisferio norte en proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), altitud de 2.322 metros sobre el nivel del mar en el municipio de Pamplona, limitando al Norte con el hospital San Juan de Dios, centro de acopio la Mejor y terminal de transportes Pamplona, al sur con la granja del ISER (Instituto Superior de Educación Rural) y barrio el Progreso, al oriente con barrio el Progreso y al occidente con el ISER (Instituto Superior de Educación Rural). La zona estudiada tiene una extensión aproximada de 540 m² al costado de la calzada (Ver Fig. 1).

4. Marco Geológico

El municipio de Pamplona está ubicado sobre depósitos cuaternarios de origen Fluvio-lacustre depositados discordantemente sobre rocas ígneas tipo gneis cuarzomonzónico pertenecientes a la unidad Ortoneis, en el denominado Valle del Espíritu Santo cortado por el cauce del río Pamplonita y bordeado por rocas sedimentarias pertenecientes a la formación Girón, Tibú - Mercedes y Aguardiente con fuerte control estructural que geomorfológicamente da origen a lomas y cuchillas. Estructuralmente se encuentra enmarcado por falla de Pamplona de tipo inverso con rumbo norte-sur y el sistema de fallas de Chitagá de tipo inverso con rumbo norte-sur, cortado por fallas de tipo normal, en el cerro Cristo Rey y en la cuenca de la quebrada el Escorial [7]. En la presente investigación, la zona de estudio esta prolongada sobre la

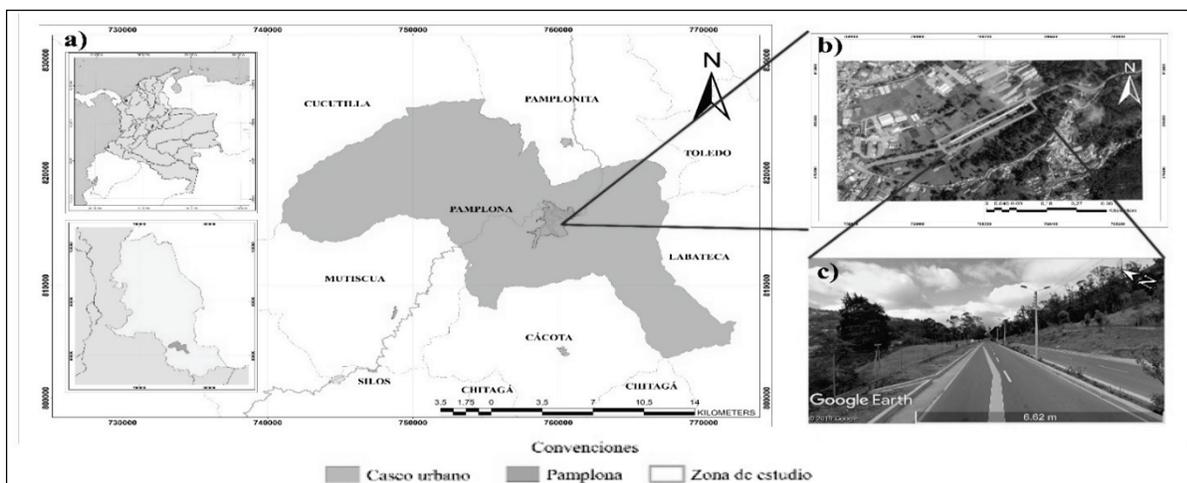


Figura 1. Localización Geográfica, a) Localización Del Municipio de Pamplona, b) Zona Estudio, c) Km 68+500
Fuente: Los Autores.

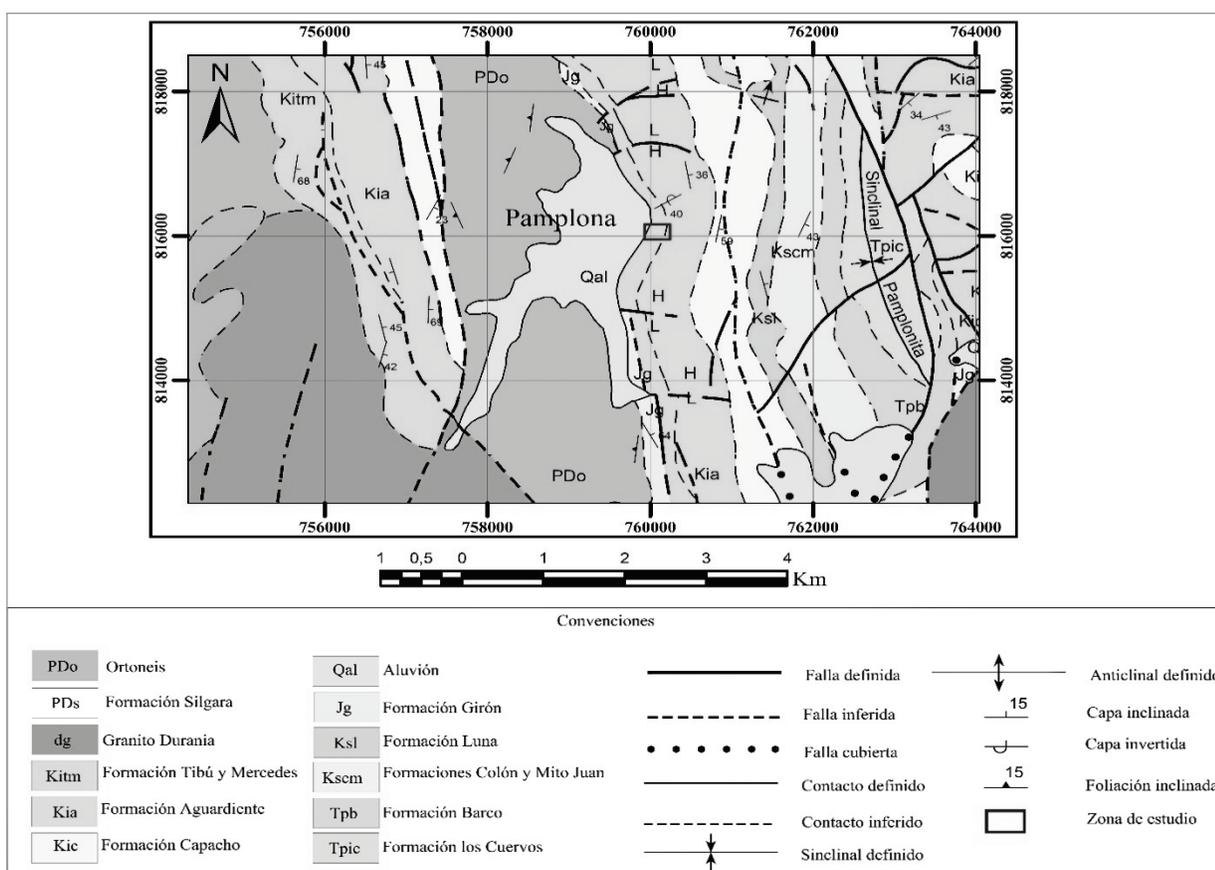


Figura 2. Mapa Geología, plancha 110 Pamplona, Escala (1:100.000)
Fuente: Los Autores.

formación Tibú y Mercedes (Kitm) (Ver Fig. 2), la cual es perteneciente junto a la formación Aguardiente (Kia) al grupo Uriabante, que se le debe su nombre al río Uriabante en el estado Táchira (Venezuela). Tibú tiene en la base, areniscas guijosas de grano grueso de 5 – 12 m de grueso, cubriendo rocas ígneas y metamórficas. El Mercedes

subyacentes, están oscurecidos por material aluvial y son rara vez definibles en las fotografías aéreas. Como resultados de estas circunstancias no ha sido posible o práctico, cartografiar el Tibú y el Mercedes como unidades separadas. Estos son cartografiados como unidad entre las rocas subyacentes precretáceas y el suprayacente Aguardiente. Tibú y Mercedes

pueden asignárseles un margen de edad semejante, con excepción de la arenisca basal del Tibú que probablemente se extiende dentro del Barremiano [8].

5. Metodología

5.1. Fase 1. Adquisición de datos geofísicos y geotécnicos

Se analizó 161 metros lineales donde se realizó levantamiento topográfico, dos estudios de SPT a una profundidad máxima de 4,57 metros, cuatro sondeos eléctricos verticales (SEV), para la toma de datos de TRS, MASW 1D y MASW 2D se hizo tendido de 2 líneas de 80,5 metros de longitud (Ver Tabla 1).

5.1.1. Topografía

Se hizo un levantamiento topográfico utilizando el equipo receptor GNSS (Stonex S800) (Ver Fig. 3a), de 555 canales y capaz de admitir múltiples constelaciones de satélites, este usa el sistema global de navegación por satélite, la portabilidad y la velocidad de operación hacen que el receptor S800 GNSS sea especialmente adecuado para el trabajo de campo en áreas de terreno complejo [9]. La topografía en el área de estudio es de poca pendiente debido a que se encuentra al costado de la vía.

5.1.2. Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Para este estudio se aplicó Geoelectrónica, su principio es la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo para la obtención de diferencia de potencial mediante la configuración de electrodos [10]. Existen diferentes métodos de Geoelectrónica, los más utilizados son: sondeos eléctricos verticales (SEV), calicatas eléctricas (CE), polarización inducida (PI) y el potencial espontáneo (PE), pero las de mayor utilidad son los SEV y las CE. El flujo de una corriente eléctrica a través de las rocas o sedimentos se puede explicar mediante la Ley de Ohm donde establece que la caída de potencial ΔV entre 2 puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I , es proporcional a ésta y a la resistencia R que ofrece el medio al pasaje de la corriente [11]. Se empleó el método de SEV, para el cual se optó por tomar una configuración de electrodos tipo Schlumberger, la

cual es una disposición simétrica, además debe cumplir la condición de que la distancia que separa los electrodos de inyección de corriente A y B debe ser mayor o igual que 5 veces la distancia que separa los electrodos de medición del potencial M y N [11]. Los equipos que se utilizaron para la adquisición de datos en campo fue el GEOAMP 303 (equipo geofísico desarrollado por SUBSUELO3D [12], cuatro electrodos de 50 cm de longitud, cuatro tramos de cable AWG 00 de más de 100 m cada uno, cables conectores de adquisición, computador con software de adquisición de datos (PowerDAQ) (Ver Fig.3d) [13]. En el procesamiento de datos se usó el software (IPI2win) [14], En el cual se va introducir los datos de resistividad que arroja el software de adquisición, este posicionara una serie de puntos, para obtener una curva en función de la separación de electrodos y la resistividad aparente, y se obtendrá una gráfica donde indicara la profundidad alcanzada con el número de capas y sus espesores.

5.1.3. Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)

Los equipos y herramientas utilizados para llevar a cabo el ensayo de refracción sísmica y la adquisición de datos fueron, un Sismógrafo de 24 canales marca Geometrics, modelo Geode [15], Geófonos o sensores con frecuencia pico de 14 Hz, Trigger o disparador de las señales de ondas sísmicas, placa metálica, porra, batería de 12 V, cable multipolar (Ver Fig. 3c). Para este ensayo se cuenta con dos líneas sísmicas de 80,5 m, luego se proceden a instalar los Geófonos, con un espaciamiento de 3,5 m respectivamente (Ver Fig. 5), en función de la exploración requerida. Las ondas “Vp” se producen mediante explosivos, pistola, fuente martillo semi-hidráulico, peso dejado caer, y de manera usual con un martillo de 12 lb, como es el caso del presente estudio, golpeando 10 veces por fuera de la línea y 5 a lo largo de la línea, a un intervalo de muestreo de 0,25 ms y longitud de respuesta de 0,175 s. Los parámetros de adquisición fueron obtenidos mediante el software “Seismodule Controller Software” [16] el cual recibe las señales de ondas emitidas por la fuente donde son procesadas posteriormente mediante otro software (Pickwin, Plotrefa) [16] para hallar el perfil sísmico bidimensional del suelo. Obtenidos los tiempos de llegada de las ondas, se estudia particularmente las ondas longitudinales P en su primera llegada. Para la metodología

Tabla 1.

Coordenadas punto inicial y final de líneas sísmicas, sondeos eléctricos verticales y ensayos de penetración estándar

Coordenadas		X	Inicio	Y	X	Final	Y
Tomografía de refracción sísmica	Línea 1	760120		815531	760175		815567
	Línea 2	760175		815567	760247		815619
		X		Coordenadas de sitio		Y	
Sondeo eléctrico vertical	SEV 1		760164			815565	
	SEV 2		760190			815581	
	SEV 3		760207			815592	
	SEV 4		760222			815604	
	SEV 5		760249			815619	
Ensayo de penetración estándar	Sondeo 1		760189			815579	
	Sondeo 2		760264			815631	

Fuente: Los Autores.

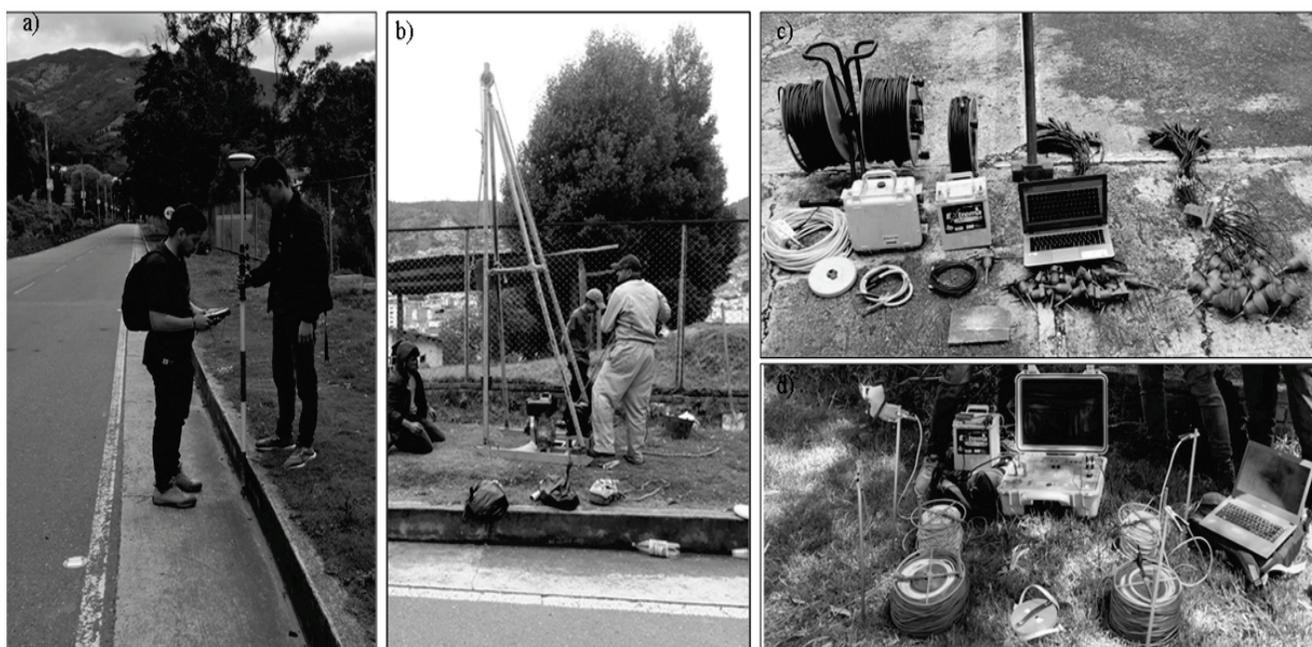


Figura 3. Equipos Adquisición de Geofísica y Geotecnia, a) Equipo Topografía GNSS (Stonex S800), b) Equipo de SPT, c) Sismógrafo y accesorios, d) Equipo Geoeléctrica (GeoAmp) y accesorios.

Fuente: Los Autores.

del ensayo se emiten golpes desde la fuente que son captados con el sismógrafo por Geófonos, estas ondas son de tipo Rayleigh u ondas primarias (V_p), mediante un computador portátil conectado al sismógrafo. En la determinación de la velocidad sísmica de propagación esta va a depender de las propiedades elásticas del material, junto con el procesamiento se obtendrá la caracterización del perfil de suelo que corresponde a la velocidad de propagación de onda P.

5.1.4. Análisis multicanal (MASW)

El ensayo MASW o Análisis de Ondas superficiales en Arreglo Multicanal que consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) para el punto central de dicha línea. El método MASW, permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 25 m a 30 m [17]. Ya con los datos adquiridos en campo se procede al debido procesamiento, corregir o filtrar aquellos errores para obtener la curva de dispersión adecuada. Con los datos procesados al final se promedian los perfiles de suelos para obtener el perfil más acertado, este método se denomina MASW 1D, donde el resultado es un perfil de suelo en el que se puede apreciar las profundidades y las velocidades de propagación de las ondas S. El otro análisis llamado MASW 2D, mide la profundidad y el largo en dos dimensiones contra la velocidad de propagación de la onda S. En este método los golpes se llevan a cabo en medio

de cada geófono dentro de la línea a diferencia de MASW 1D que los golpes que se hacen fuera de la línea.

5.1.5. Ensayo de penetración estándar (SPT)

Este método proporciona una muestra de suelo para investigación y ensayos de laboratorio a partir de un muestreo, el cual puede producir gran alteración en el espécimen debido a la deformación por corte [18]. Para el muestreo y procedimiento de este ensayo se conecta el tubo partido a la tubería de perforación y se baja dentro del hueco, dejándolo caer suavemente, sin permitir que se introduzca dentro del suelo que va a ser muestreado. Se marca el extremo superior de la tubería de perforación en tres incrementos sucesivos de 0.15 m (6") de manera que el avance del muestreo bajo el impacto del martillo pueda ser observado fácilmente para cada incremento de 0.15m (6") [18]. Se hinca el muestreo con golpes del martillo de 63.5kg (140 lb), Para cada golpe del martillo, el operador deberá emplear un levantamiento y una caída de 0.76 m (30"); se cuenta el número de golpes aplicados a cada incremento de 0.15 m (6"), hasta cuando ocurra una de las siguientes condiciones: Que se haya aplicado un total de 50 golpes en cualquiera de los tres incrementos de 0.15 m (6"). Que se haya aplicado un total de 100 golpes para 0.30 m (12"). Que no se observe avance del muestreo mediante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martillo. Que el muestreo avance 0.45 m (18") completos, sin alcanzar las cuentas límites de golpes, descritas anteriormente (Ver Fig. 3b) [18]. Se saca el muestreo a la superficie y se abre. Se registra el porcentaje de recuperación o la longitud de la muestra recobrada; se coloca luego una o más partes representativas de las muestras

en empaques selladas para el ensayo de humedad, se sella rápidamente para evitar la evaporación de la humedad del suelo, se colocan etiquetas en los empaques con el nombre de la obra, el número de la perforación, la profundidad, la cuenta de golpes para cada incremento de 15 mm (6") y la descripción del material [18].

5.2. Fase 2. Procesamiento de datos geofísicos y geotécnicos

En esta fase se expone el procesamiento el cual se ilustra a continuación y constituyen los datos tomados en campo (zona de estudio), datos sísmicos, geotécnicos y geoelectrónicos con los ensayos de TRS, MASW 1D y 2D, SEV y SPT.

5.2.1. Procesamiento de datos sísmicos (TRS)

Se hace mediante el software (Pickwin y Plotrefa) [16], primero se usa Pickwin (Pick First Breaks or Dispersión Curve). En la Fig. 4a se observan los picados de las ondas refractadas para el SHOT 8, se identifica el tren de ondas superficiales de los datos obtenidos, En la Fig. 4b se muestra la distancia vs el tiempo y la selección de las capas. La matriz de inversión arroja un error de 1,25 ms. En la Fig. 4c muestra

el modelo inicial con las respectivas velocidades, una primera capa de 501 m/s y una segunda capa de 1743 m/s. En la Fig. 4d está el modelo final de la tomografía después de realizar 10 inversiones con un error de 2,73 ms, arroja las velocidades para un número de (3) tres capas, donde una primera capa posee un espesor 5,5 m (metros) con velocidades que van desde 501 m/s (metros por segundo) hasta 777 m/s. Una segunda capa con espesor de 4,47 m y velocidades de 501 m/s hasta 1467 m/s respectivamente. Por último se tiene una capa cuyo espesor es indefinido y velocidades que van desde 1467 m/s hasta valores que son indeterminados.

5.2.2. Procesamiento de datos sísmicos MASW 1D

Se realiza utilizando el software Surface Wave Analysis Wizard, [16], se cargan los datos sísmicos el cual muestra los primeros arribos de la onda S en cada línea como se muestra en la Fig. 6a, después se hace un picado para generar curvas de dispersión (ver Fig. 6b), luego se muestra el modelo inicial generado a través del software WaveEq Surface Wave Analysis Wizard como se observa en la Fig. 6c, el último paso es generar el modelo final donde se utiliza una inversión para conseguirlo (Fig. 6d), se puede observar la velocidad de onda (V_s 30m) y la profundidad estimada en el centro de la longitud de la línea.

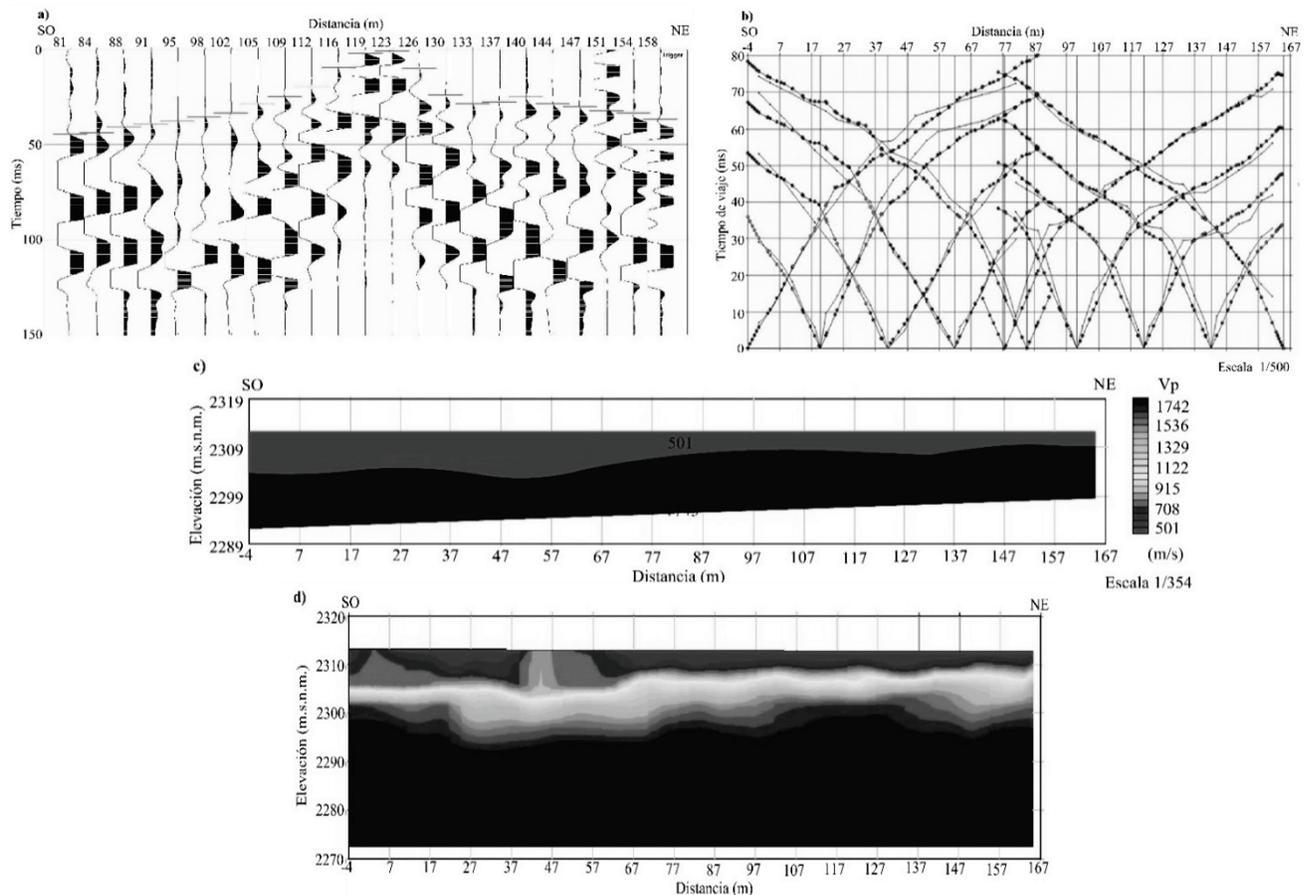


Figura 4. Procesamiento de Tomografía Refracción Sísmica. a) Picados primeros arribos, onda refractada, b). Ubicación de capas, c). Modelo basado en la inversión de Mínimos Cuadrados, d) Modelo a partir de la inversión de la tomografía
Fuente: Los Autores.

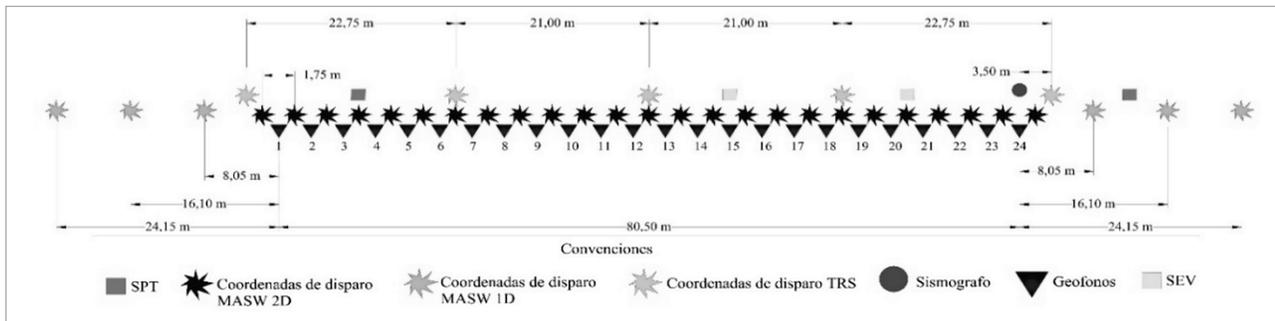


Figura 5. Geometría de la adquisición de datos geofísicos y geotécnicos para una línea de 80,5 m
Fuente: Los Autores.

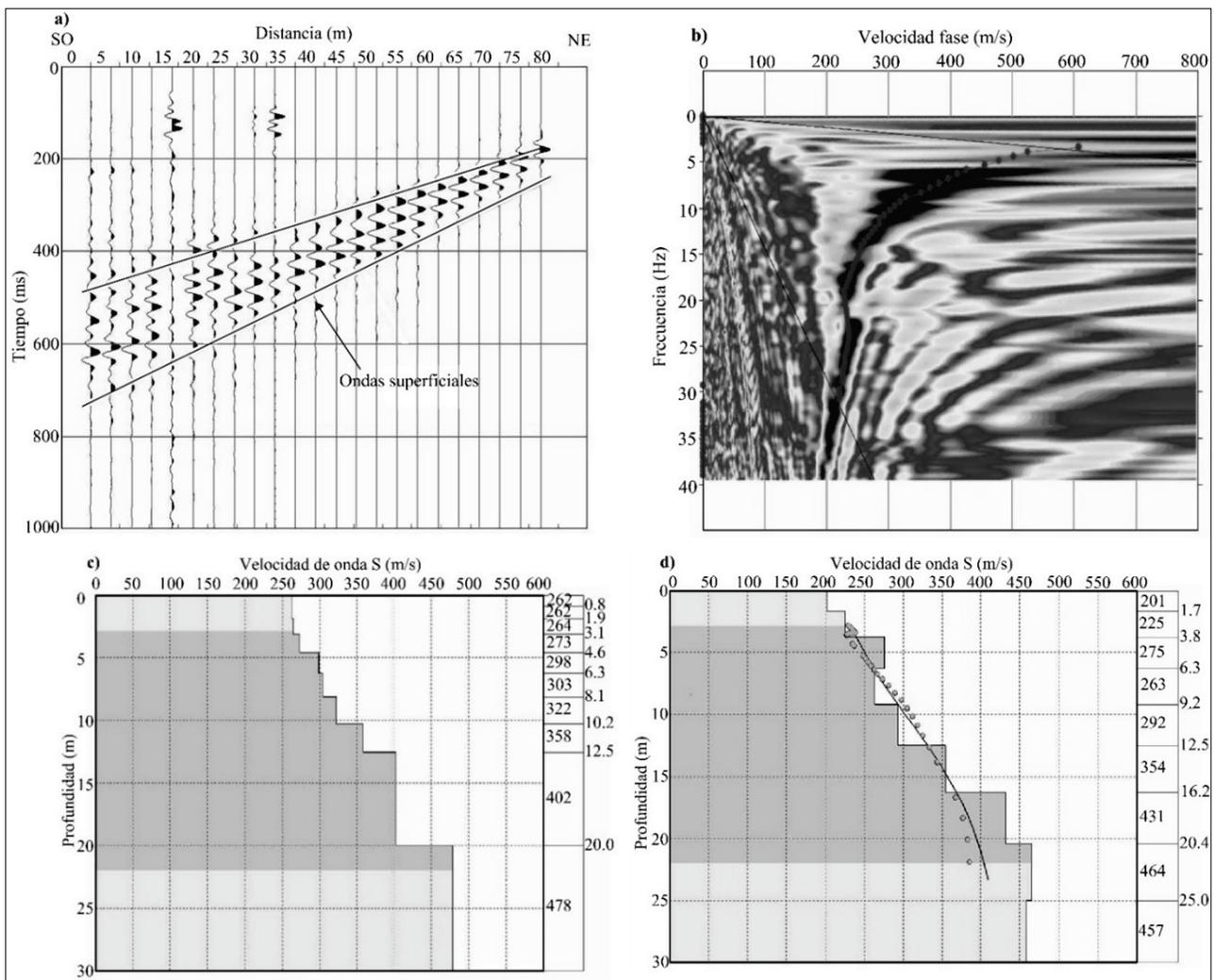


Figura 6. Procesamiento MASWID: a) Registro de las ondas superficiales, b) Picado del modo fundamental, c) Modelo inicial, d) Modelo con velocidades aparentes
Fuente: Los Autores.

5.2.3. Procesamiento de datos MASW 2D

Se usa el software Surface Wave Analysis Wizard en el cual se procesan los datos de MASW2D, donde permite crear una lista con todos los datos a utilizar y realizar un filtrado,

por consiguiente arroja graficas en formato CMP, (common middle point) o punto medio común (Ver Fig. 7a), para encontrar que los datos pasen al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier, arrojando así curvas de dispersión inicial, luego se corrige la curva

eliminando datos de alta y baja frecuencia (Dispersión curvas) si es necesario (igual que el MASW 1D) (ver Fig. 7b). Se genera un modelo inicial el cual indica la profundidad según la longitud de la línea donde se observan espesores de cada capa de todos los CMP y velocidades aparentes y enseguida se origina un modelo 2D con las velocidades presentes a lo largo de la línea con sus respectivos rangos (Ver Fig. 7c).

5.2.4. Procesamiento de datos sondeo eléctrico vertical (SEV)

El procesamiento de los datos de SEV, se realizaron en el software IP2win el cual es un programa que arroja graficas 1D de curvas SEV, la cual relaciona los valores resistividad aparente en función del espaciado de los electrodos como se muestra en la Fig. 8a. La primera imagen muestra un gráfico logarítmico que se realizó gracias al arreglo Schlumberge (Fig. 8b). Se identifica la curva de datos observados y los

datos calculados, la cual debe asemejarse lo más posible a la línea de los datos observados (Fig. 8c). En las grafica que arroja el software, el cual muestra un perfil de resistividad aparente contra una profundidad (Fig. 8d), es el modelo final de donde se puede extraer información como la profundidad de capas y resistividades.

5.2.5. Procesamiento Novo SPT

El software NovoSPT [19] está diseñado para analizar los recuentos de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT), y correlacionar el número de golpes con las propiedades del suelo. Los datos adquiridos varían según los métodos y tipos de suelo. En el procesamiento se eligieron varios métodos para promediarlos, donde se encontraron los siguientes parámetros del suelo: Peso específico (Fig.9 a), Angulo de fricción interno (Fig. 9 b), Modulo de corte (Fig. 9c), Modulo de Young (Fig. 9d)

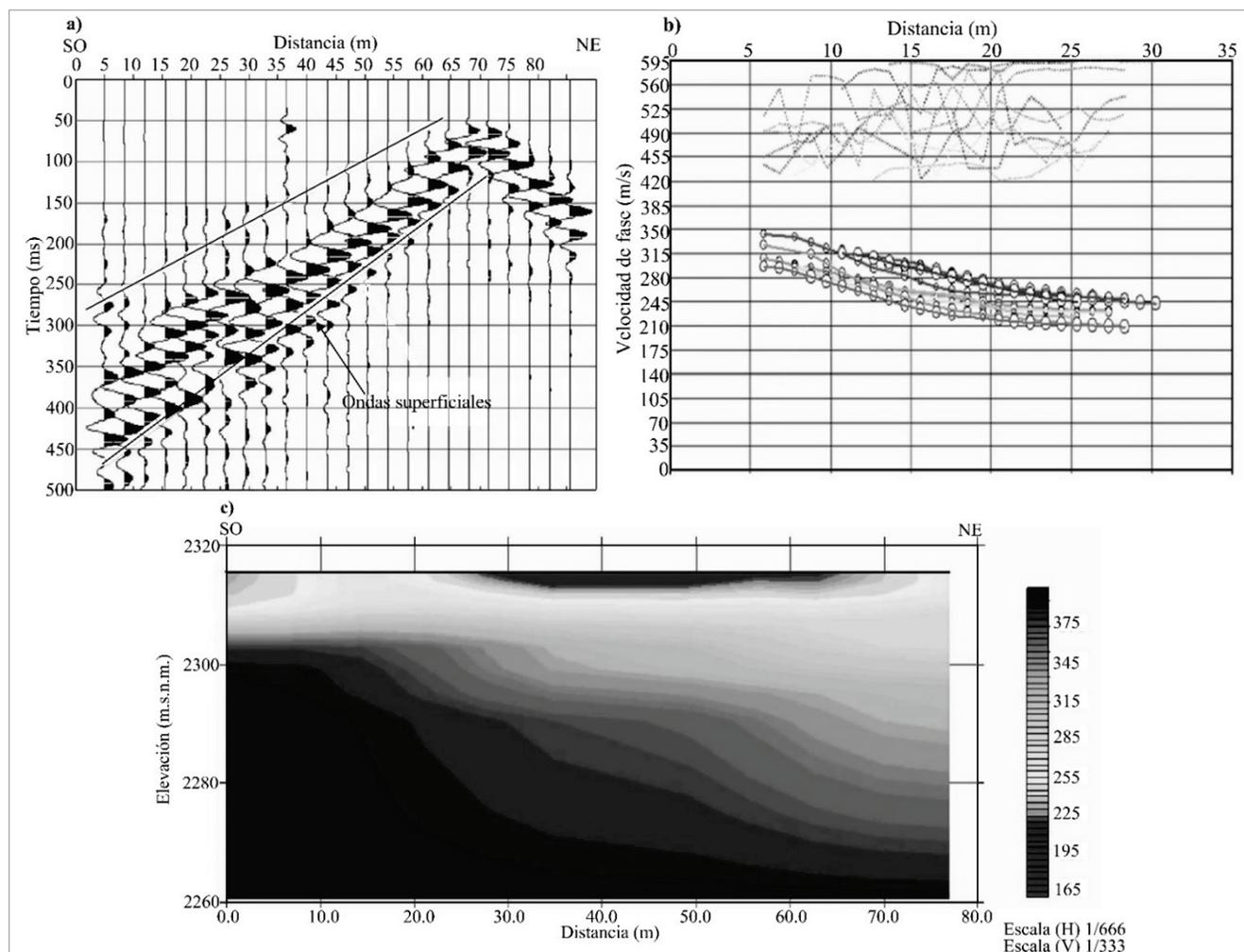


Figura 7. Procesamiento MASW 2D, a) Frente de Ondas Superficiales. b) Curvas de dispersión activas resultantes del stacking, c) Perfil transversal inicial generado a partir de las curvas, d) Modelo final generado por la inversión.

Fuente: Los Autores.

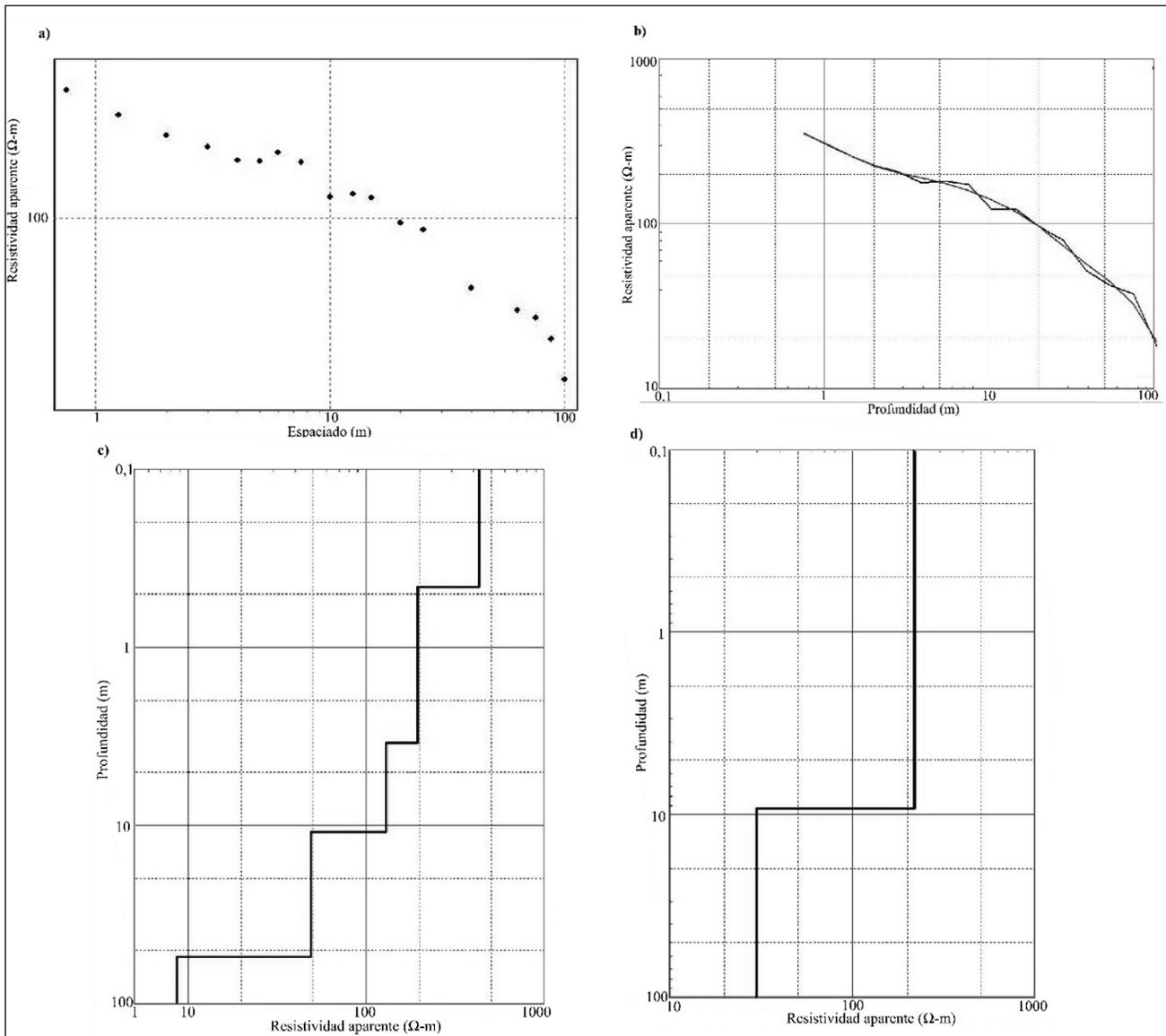


Figura 8. Procesamiento sondeo eléctrico vertical. a) Dispersión de las resistividades aparentes en función del espaciado, b) Curva de atenuación de los datos de resistividad de campo, c) Perfil resistividad aparente con profundidad de una capa y d) La profundidad de capas en función de la resistividad real Fuente: Los Autores.

5.2.6. Ensayos de laboratorio

Tabla 2. Resumen datos obtenidos en laboratorio

Sondeo	Estrato	Profundidad (m)	Contenido humedad W (%)	Límites de consistencia (%)			Granulometría % pasa N° 200	Suelo	Simbología	Clasificación SUCS
				LL	LP	IP				
1	E-1	1.7	11.88	26.30	20.43	5.88	20.68	Grueso	SC	Arena Arcillosa
	E-2	2.08	18.87	39.56	31.45	8.11	60.80	Fino	ML	Limos Orgánicos
2	E-1	0.63	11.79	28.72	24.02	4.70	16.51	Grueso	GM-OL	Gravas Limosas con Limos Orgánicos y arcilla limosa
	E-2	1.29	18.75	31.07	19.01	12.06	58.09	Fino	CL	Arcillas con arena
	E-3	0.75	17.43	29.72	20.43	9.29	50.66	Fino	CL	Arcillas con arena
	E-4	0.53	18.64	24.61	N.P.	24.61	26.39	Grueso	SC-CL	Arenas y gravas arcillosas
	E-5	1.03	20.63	31.03	20.76	10.27	60.28	Fino	CL	Arcillas con arena

Fuente: Los Autores.

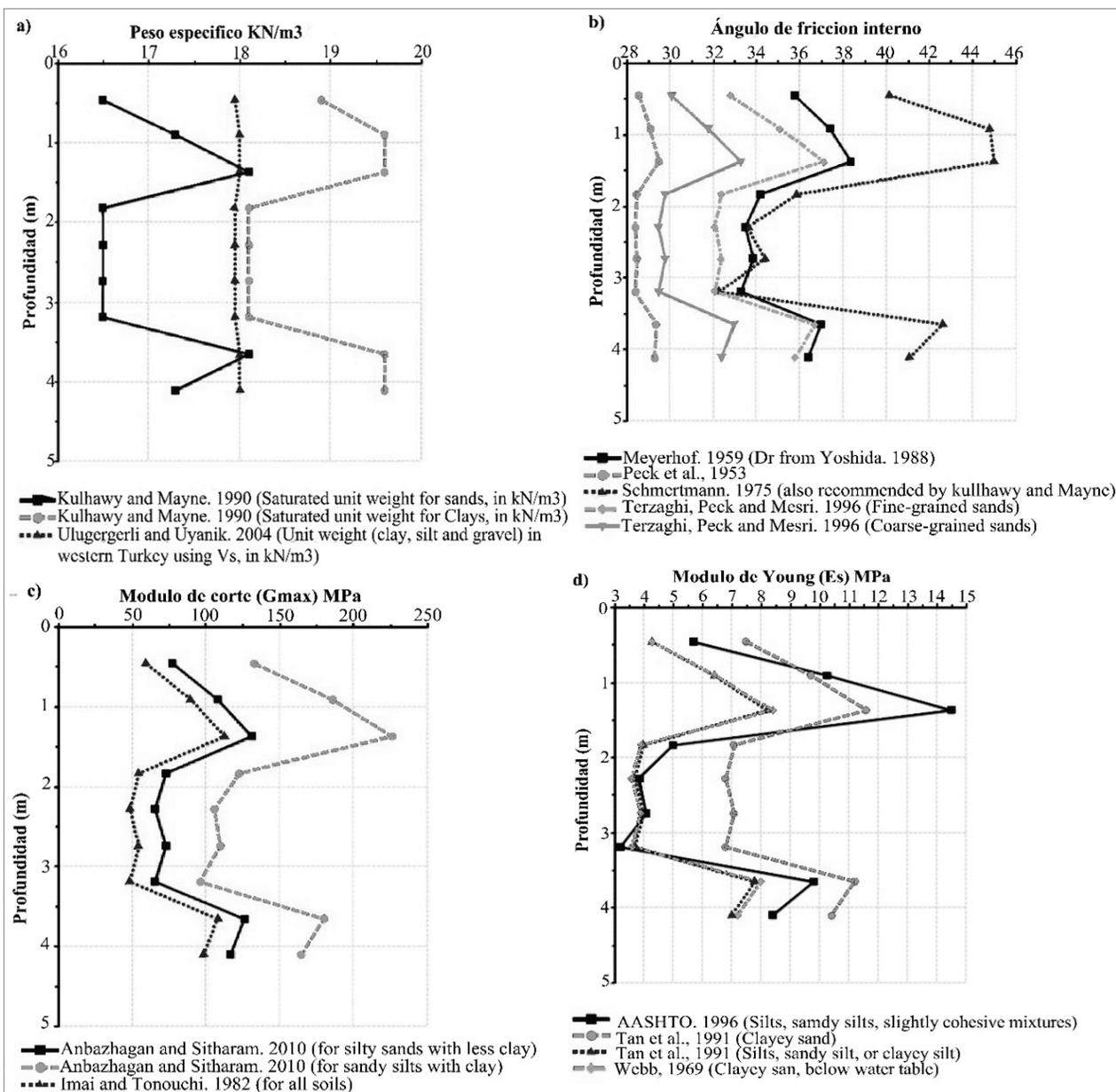


Figura 9. Parámetros del suelo en función de la profundidad (sondeo 1), a) Peso Específico, b) Angulo de Fricción Interno, c) Modulo de Corte, d) Modulo de Young.
Fuente: Los Autores.

6. Resultados

6.1. Tomografía de refracción sísmica

Este modelo final, nos representa el cambio de velocidad de cada capa, también la elevación (m.s.n.m). Que se anexaron debidamente de los datos obtenidos de la topografía. En la zona se extendieron dos líneas de 80,5, en esta línea se identifican tres capas, la primera con un espesor máximo de 7.9 m y espesor mínimo de 3.2 m con velocidades entre 501 a 777 m/s, la segunda capa con espesor máximo de 7.27 m y espesor mínimo de 1.67 m y velocidades entre 777

y 1467 m/s y una tercera con velocidades mayor a 1467 m/s como se muestra en la Fig. 10.

6.2. MASW 1D

Los modelos finales se observan en la Fig. 11a, se muestran velocidades entre 267 m/s y 466 m/s de la línea 1 y una profundidad máxima de 25 m. En la Fig. 11b, se muestran velocidades entre 257 m/s y 399 m/s en la línea 2 y una profundidad máxima de 20 m. En la Tabla 3 se muestran los rangos de cada línea sísmica

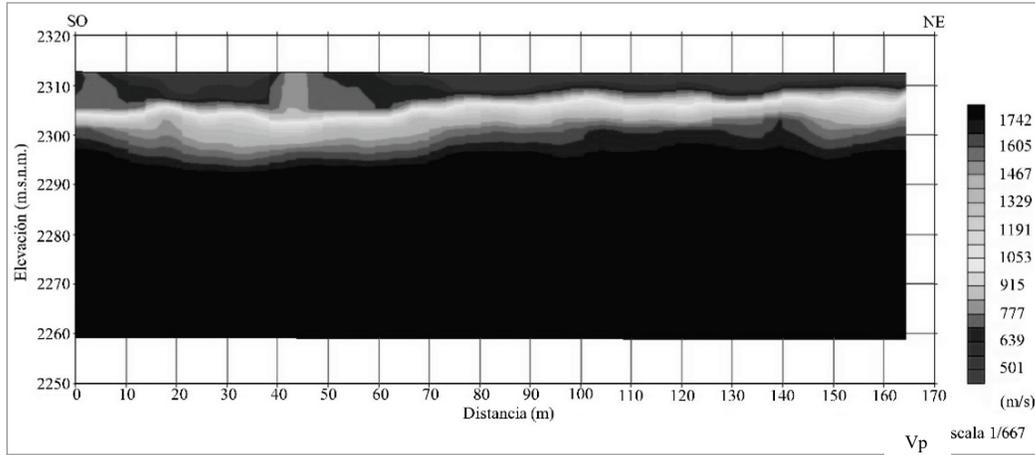


Figura 10. Modelo Final Tomografía Refracción Sísmica, línea de 161 metros.
Fuente: Los Autores.

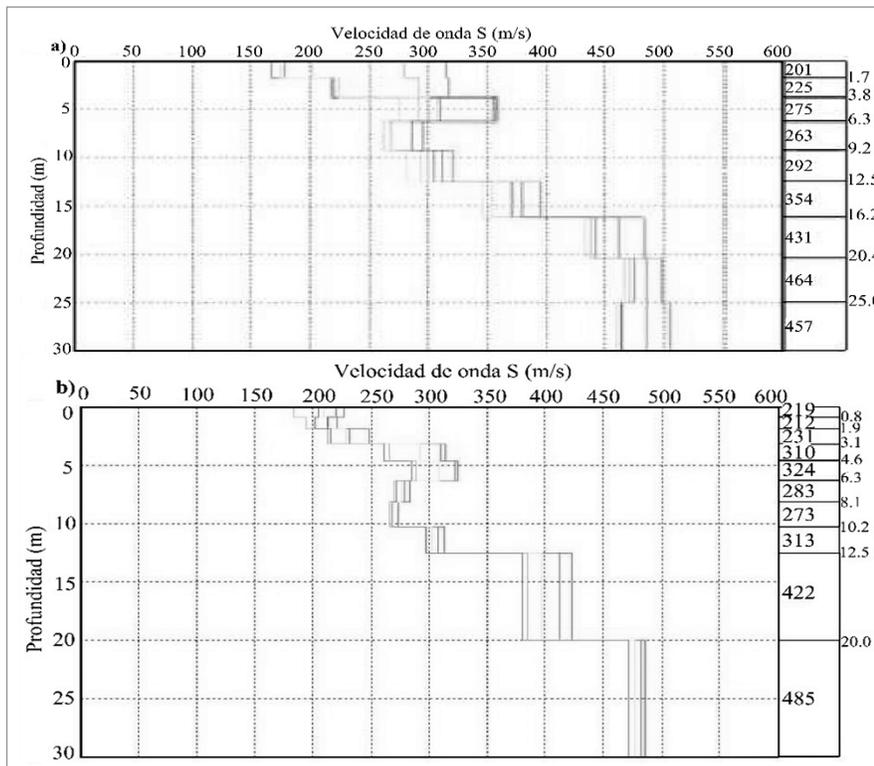


Figura 11: Velocidades de onda S: a) Velocidad de onda S en línea 1, b) Velocidad de onda S en línea 2
Fuente: Los Autores.

Tabla 3.
Resultados de MASW 1D

Línea	Capa	Profundidad (m)	Velocidades Vs (m/s)
1	1	6,3	266,9
	2	6,3-16,2	321,27
	3	16,2-25	466,13
2	1	6,3	256,64
	2	6,3-12,5	283,45
	3	12,5-20	399

Fuente: Los Autores.

6.3. MASW 2D

Se obtuvo un modelo de capas delimitadas, en el cual están las distancias en metros que se encuentran en función de la elevación (m.s.n.m.), se evidencia para cada una de las líneas procesadas, la línea de 161 metros, (Fig. 12), en la que se identifican 3 capas, la primera capa tiene una profundidad promedio de 5 m y velocidades de onda S entre 210 m/s y

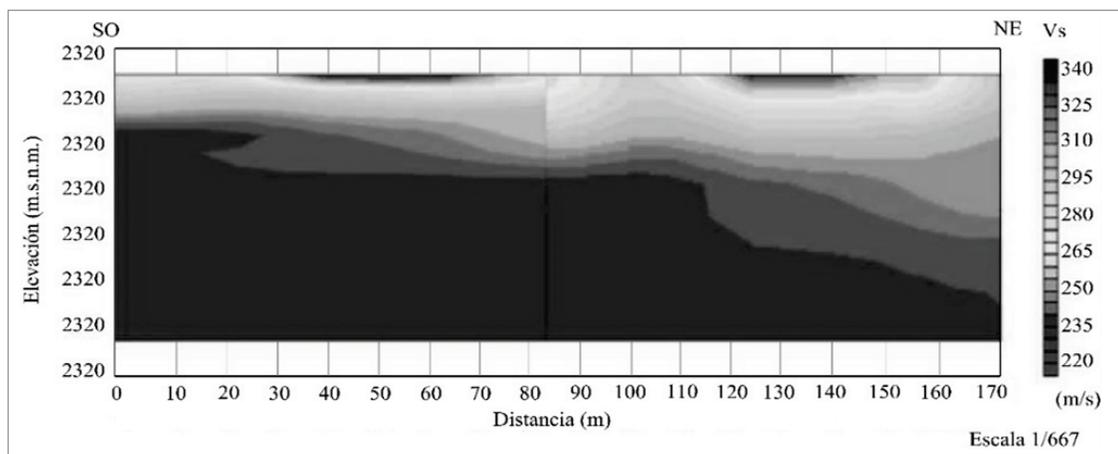


Figura 12. Modelo Final MASW2D.
Fuente: Los Autores.

280 m/s y la segunda capa se encuentra a una profundidad promedio de 5-15.4 m y velocidades de onda S entre 280 m/s y 320 m/s y la tercera capa con velocidades entre 320 m/s-340 m/s

6.4. SPT

Del procesamiento de los datos adquiridos en campo con el SPT, (Ver Fig. 13), obtenemos parámetros estructurales fundamentales del suelo, mostrados en la Tabla 4, al igual que la profundidad máxima alcanzada.

7. Análisis de resultados

7.1. SEV

De los datos procesados de los SEV y la tabla de valores típicos de resistividad para algunos materiales que se encuentran en la capa somera del suelo [20] tenemos que:

SEV 1: Material con resistividad promedio de 246.826 Ω -m, interpretado como roca fracturada y Sapolito parcialmente saturado; el espesor promedio de este sondeo es de 9.35m.

SEV 2: Material con resistividad promedio de 164.238 Ω -m, interpretados como roca fracturada, arenas saturadas y Limos parcialmente saturados, el espesor promedio de este sondeo es de 13.399m.

SEV 3: Material con resistividad promedio de 119.712 Ω -m, interpretados como roca fracturada, arenas saturadas y Limos parcialmente saturados, el espesor promedio de este sondeo es de 8.499m.

Tabla 4.
Resultados de MASW 1D

Línea	Capa	Espesor Promedio (m)	Velocidades (m/s)
Línea Vial	1	5	210-280
	2	10.4	280-320
	3	8.6	320-340

Fuente: Los Autores.

SEV 4: Material con resistividad promedio de 200.975 Ω -m, interpretados como roca fracturada y Sapolito parcialmente saturado, el espesor promedio de este sondeo es de 17.301m.

7.2. TRS

El procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica y con la tabla de rango de velocidades de las ondas P [21], se pudo clasificar los estratos presentes en el subsuelo para la línea vial.

Capa 1: Presenta una velocidad que oscila entre 499m/s y 701m/s, se clasifica como una grava o arena seca.

Capa 2: Presenta una velocidad que oscila entre 701m/s y 1512m/s, se clasifica como una arena saturada o una grava seca.

Capa 3: Presenta una velocidad que oscila entre 1512m/s y 1714m/s, se clasifica como una arena saturada

Los resultados que fueron obtenidos por medio del MASW 1D y MASW 2D, sirven para poder clasificar el tipo de perfil de suelo utilizando la Tabla A.2.4-1 clasificación de los perfiles de suelo de la norma NSR10 [23].

7.3. MASW 1D

Línea 1: Se identifican 3 capas, la primera capa presenta unos contrastes de velocidades con un promedio entre ellas de 266.90m/s, con esta se clasifica un perfil de suelo Tipo D con una profundidad de 6.3m, la segunda capa tiene una velocidad promedio de 321.27 m/s con la cual se clasifica un perfil de suelo tipo D, con una profundidad que oscila entre 6.3m hasta 16.2m, en la tercera capa se obtiene una velocidad promedio de 466,113 m/s y se clasifica un perfil de suelo tipo C, con una profundidad de 16.2m hasta 25m.

Línea 2: Se logra identificar 3 capas, la primera de estas presenta una velocidad de 256.64 m/s, con esta se clasifica un perfil de suelo tipo D, una profundidad de 6.3m, la segunda capa presenta una velocidad de 283.458 m/s con un perfil de suelo Tipo D, con una profundidad que oscila entre

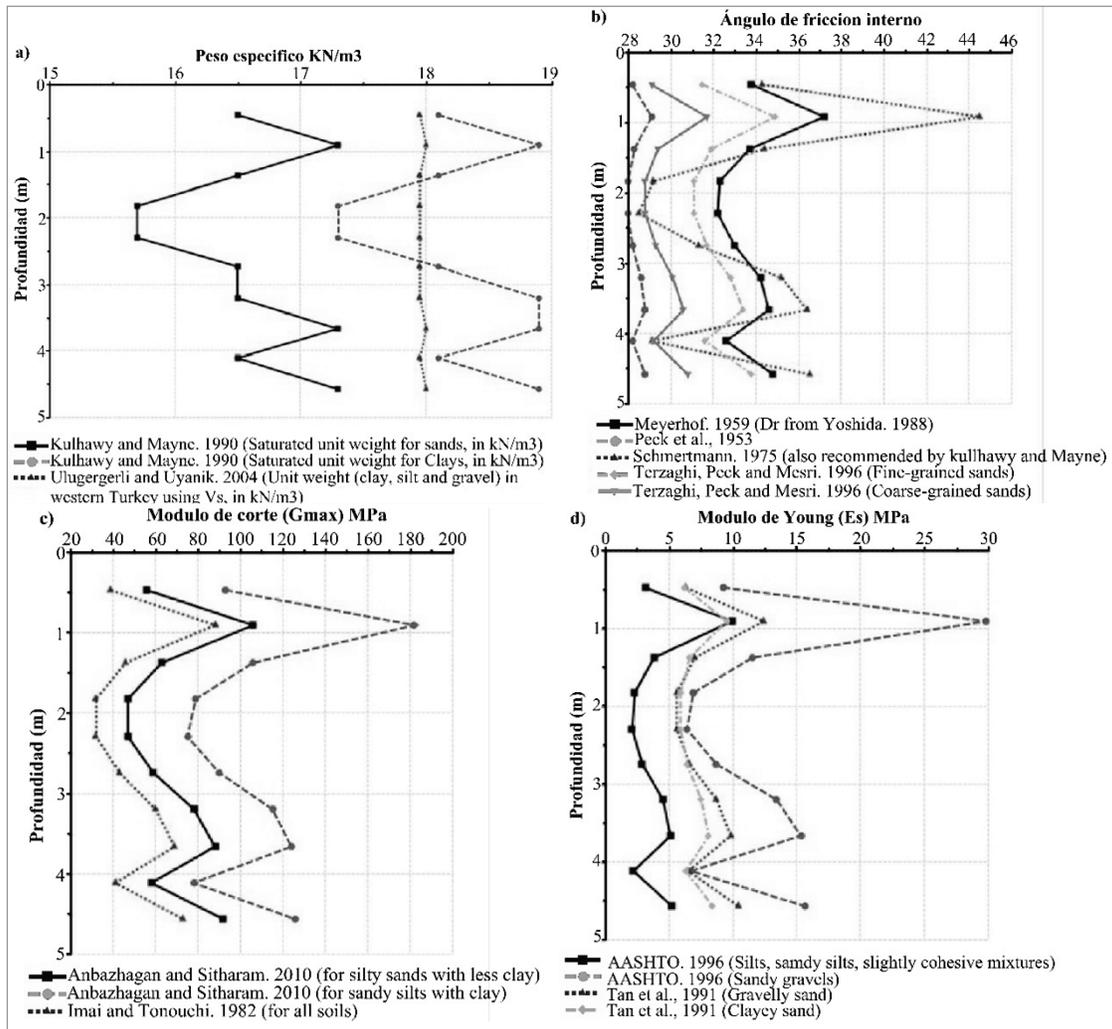


Figura 13. Parámetros del suelo en función de la profundidad (sondeo 2), a) Peso Específico, b) Angulo de Fricción Interno, c) Modulo de Corte, d) Modulo de Young.

Fuente: Los Autores.

Tabla 5. Resultados NovoSPT

SPT	Estrato	profundidad (m)	Peso específico (KN/m ³)	Angulo de fricción interno	Módulo de corte (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Sondeo 1	1	0 - 1.83	18.04	35.20	114.67	7.33
	2	1.83 - 4.11	17.88	32.90	97.67	6.21
Sondeo 2	1	0 - 0.91	17.79	34.03	94.00	10.80
	2	0.91 - 2.29	17.16	30.53	58.56	5.80
	3	2.29 - 2.74	17.52	30.60	64.00	6.15
	4	2.74 - 3.2	17.78	31.90	84.33	8.53
	5	3.2 - 4.57	17.88	31.88	83.22	8.30

Fuente: Los Autores.

Tabla 6. Correlación de resultados.

Línea	Capa	Profundidad promedio (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso específico (KN/m ³)	Módulo de corte (Mpa)	Coficiente de Poisson	Módulo de Young (Mpa)
L1	1	6.3	600	261.76	17.96	125.44	0.38	34.68
	2	14.35	1065	302.36	18.13	168.96	0.46	69.98
	3	22.5	1613	432.55	18.48	352.46	0.46	103.01

Fuente: Los Autores.

6.3m hasta 12.5m y la tercera capa una velocidad de 399.00m/s con la cual se clasifica un perfil de suelo tipo C, con una profundidad entre 12.5m hasta 20m.

7.4. MASW 2D

Las velocidades de onda S se encuentran presentes en la zona de estudio de la siguiente manera: se tienen 3 capas, la primera capa presenta contrastes de velocidades entre 210m/s y 280m/s, la segunda capa velocidades de 280m/s y 320m/s y la tercera capa presenta velocidades de 320m/s y 340m/s, como las tres capas presentan un rango de velocidades que oscilan entre 180m/s y 360m/s, se pueden clasificar como un perfil de suelo tipo D.

7.5. SPT

Sondeo 1: Este obtuvo una profundidad máxima alcanzada de 4.11m debido a rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo; un taponamiento que estas generan en la punta del muestreado de tubo partido. Se obtuvo un Limo Inorgánico.

Sondeo 2: Se alcanzó una profundidad máxima de 4.57m debido a rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo, ya que el tubo de muestreo no siguió perforando las capas del suelo. Se obtuvo una Arcilla con Arena.

8. Espectro de respuesta según la norma NSR-10

La forma del espectro elástico de aceleraciones (S_a), expresada como fracción de la gravedad, para un coeficiente de cinco por ciento (5%) del amortiguamiento crítico, que se debe utilizar en el diseño [22]. La representación gráfica del espectro de respuesta muestra los valores de la aceleración producida por las ondas sísmicas durante un periodo de vibración, teniendo en cuenta los parámetros y coeficientes que dependen del tipo de perfil de suelo.

8.1. Clasificación de los perfiles de suelo

Según la norma NSR-10 en el artículo A.2.4.4 – DEFINICIÓN DEL TIPO DE PERFIL DE SUELO [22], se clasifica como tipo D, ya que la velocidad media de onda de corte (V_s) es de 323.59 m/s y coincide dentro los límites y cumple con la condición $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$ dando lugar a perfiles de suelos rígidos que cumplen con el criterio de velocidad de la onda cortante.

8.2. Condiciones de la zona de estudio

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado en una zona de amenaza de sísmica alta según NSR-10 – Apéndice A-4- Valores de A_a , A_v , A_e y A_d y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos, donde $A_a=0.30$ y $A_v=0.25$ [22].

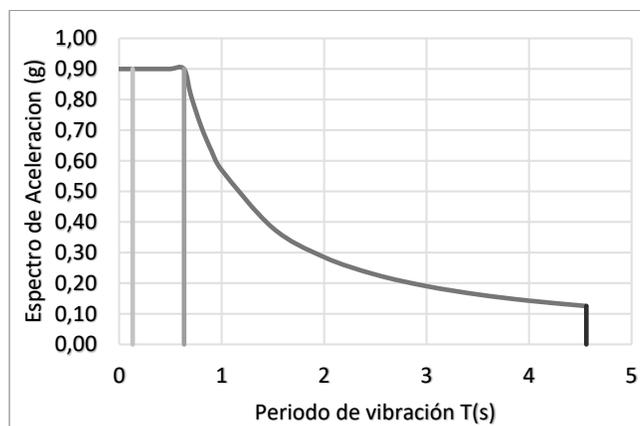


Figura 14. Espectro de respuesta
Fuente: Los Autores.

8.3. Valores de los coeficientes F_a y F_v

F_a es el coeficiente de amplificación del suelo para la zona de periodos cortos del espectro se dan en la Tabla A.2.4-3 de la NSR-10 y F_v coeficiente de amplificación del suelo para la zona de periodos intermedios del espectro, donde estos valores son $F_a=1.2$ y $F_v=1.5$ [22].

8.4. Coeficiente de importancia

El coeficiente de importancia I es de 1.5 según la Tabla A.2.5-1 de la NSR-10, el cual corresponde al numeral A.2.5.1.4-Grupo I-Estructuras de ocupación normal, tomado en cuenta para futuras construcciones de baja complejidad en la zona [22].

9. Recomendaciones

- La geología e hidrogeología de la zona de estudio debe ser estudiada, para conocer sus efectos, junto a esto las características hidráulicas del terreno adyacente el cual incurre en el área de estudio.
- Se recomienda realizar estudios adicionales, así como Traslante Electromagnético (SEDT), la implementación de Tomografía Eléctrica con Polaridad Inducida (IP), mayor extensión de líneas sísmicas al igual que aumentar el número de ensayos SPT tal como lo fija el reglamento NSR-10 capítulo H.3- Caracterización Geotécnica del Subsuelo, Tabla H.3.2-1-Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción, categoría de la unidad de construcción. Categoría Baja: Profundidad Mínima de sondeos: 6m. Número Mínimo de Sondeos: 3 [23].
- De acuerdo con el numeral H.3.3.3.1, se debe determinar la resistencia de los materiales [23], así mismo realizar ensayos de Proctor para determinar la capacidad portante del suelo.
- Tener en cuenta que el estudio se realiza al costado de una vía y por lo tanto existe un flujo de tránsito de vehículos, sobre todo a horas pico, lo cual puede

registrarse como fuente de propagación de las ondas en TRS, MASW 1D y MASW 2D.

- Se recomienda no tomar datos de Geoelectrica cuando existe una alta probabilidad de precipitación o después de la misma, ya que los datos que se tomen estarán alterados y la resistividad aumentara.

10. Conclusiones

- Con los datos obtenidos en el procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica y haciendo uso de una tabla de rango de velocidades de las ondas P, se pudo clasificar los estratos que están presentes en el subsuelo para la línea vial, los principales materiales que se observaron fueron grava, arena seca, grava seca.
- Del MASW 2D las velocidades halladas son primordiales ya que con estas es como se logra clasificar el tipo de suelo que se presenta en la zona de estudio. En la zona se encontraron 3 capas en las cuales las velocidades oscilan en un rango de 180m/s y 340m/s y gracias a esto se pudo decir que existe un perfil de suelo tipo D de acuerdo a la Tabla A.2.4-1” clasificación de los perfiles de suelo” de la norma NSR10.
- Los datos procesados en el MASW 1D y según la norma NSR-10, los valores de la velocidad superficial (Vs) que se encontraron están entre 210m/s y 466m/s, las profundidades máximas en cada línea fueron de 21.5m, finalmente se logró identificar perfiles de suelo Tipo C y Tipo D, los cuales corresponden a materiales rígidos y arenas con presencia de arcilla y arcilla limosa saturada respectivamente.
- En el ensayo de SPT se realizaron dos sondeos a lo largo de la línea vial, gracias a los ensayos realizados en el laboratorio y los demás análisis correspondientes se logró encontrar materiales como Limo Inorgánico y Arcilla con Arena.
- En concordancia con lo expuesto acerca de la formación Tibú y el Mercedes y el material encontrado por medio de los estudios realizados se concluyó que existe material suelto, incluyéndose gravas y arenas que podrían relacionarse con material de tipo detrítico y material aluvial depositado por las corrientes de agua superficiales que han circulado por el terreno objeto de estudio.
- De acuerdo con las velocidades de ondas de corte y la resistividad del subsuelo posiblemente exista presencia de nivel freático a partir de los 6-6.3 m de profundidad.
- La grafica del espectro de respuesta expresa las aceleraciones generadas por las ondas de un sismo, donde la máxima aceleración horizontal de diseño esta dada como una fracción de de la gravedad con un valor de 0.9 la cual afectara a la estructura durante un periodo de oscilación de la ondas de sismo de 0.63 segundos para construcciones o edificaciones de baja complejidad.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Pamplona, la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, al Grupo de investigación en Geofísica y Geología (PANGEA), al Grupo de investigación del programa de Ingeniería Civil (ETENOHA), a los ingenieros civiles Julián Cruz, Royman Ramírez y Leider Bolívar.

Referencias

- [1] Hernández-Gutiérrez, L.E. y Santamarta, J.C, Ingeniería geológica en terrenos volcánicos, métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid, 2000. ISBN: 978-84-608-5072-4
- [2] Campano-Calvo, J.L., del Rio, M., Farfán, A. y Campano-Aguirre, J.L., Los métodos geofísicos en los estudios previos del terreno para la rehabilitación de edificios, La iglesia del Monasterio de Santa Maria de Moreruela (Zamora), Informes de la Construcción, 65(529) pp. 17-26, 2013. DOI: 10.3989/ic.11.135
- [3] Álvarez, J.E., Estudio de resultados ensayo de penetración estándar (spt) para el factor de corrección (cn) y el ángulo de fricción (θ) del suelo usando diferentes tipos de correlaciones. Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2014.
- [4] Ulloa y Diez, Anexo E, Informe de la exploración geofísica realizada para el proyecto ruta del Sol sector Villeta - Guaduas - Guaduaero, Bogotá, D.C. - Colombia, GMAS Ltda. Laboratorio de Geología, Geofísica y Geoquímica, s.a., 57 P.
- [5] Gutierrez-Pico, K.D. y Buitrago-Huertas, L.G., Caracterización geofísica del subsuelo mediante las técnicas de refracción sísmica, reflexión sísmica, Masw y Remi en depósitos superficiales y zonas críticas de la Universidad de Pamplona, Trabajo de grado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Pamplona, Norte de Santander, Colombia, 2016.
- [6] Sánchez-Duarte, J.A., Contreras, M.A. y Torres, J.A., Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional “la Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) a partir de datos geofísicos, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2(36), pp. 9-17, 2020. DOI: 10.24054/16927257.v36.n36.2020.3991
- [7] Villamil, W., Pamplona, Norte de Santander, Geología y Morfología, [en línea]. 2020. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/347602237/Pamplona-Norte-de-Santander-Geologia-y-Morfologia>.
- [8] Ward, D.E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H. y Gómez, E., Mapa geológico de Colombia cuadrángulo H-12 Bucaramanga Planchas 109 Rionegro - 120 Bucaramanga Cuadrángulo H-13 Pamplona Planchas 110 Pamplona - 121 cerrito, Ministerio de Minas y Energía Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas, Colombia, 1973, 144 P.
- [9] Vázquez, V., Solución topografía [en línea]. 2020, [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.soluciontopografia.com/GPS-STONEX-S800-GNSS#DESCRIPCION>
- [10] Geotem Ingeniería S.A. de C.V., Tomografía de resistividad eléctrica, caracterización geofísica-litológica detallada del subsuelo Alhelí Mz.7 Lt.13-A Col. Ejidos San Pedro Mártir C.P. 14640, [en línea]. Tlalpan, México D.F. 2020. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://www.geotem.com.mx/electrico4.php>
- [11] Auge, M., Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2008, 30 P.
- [12] Subsuelo3D, SeismeX16 y SeismeX24 [en línea], Bogotá D.C – Colombia, 2020. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://www.subsuelo3d.com/productos/>
- [13] Subsuelo3D, GeoAmp303, Manual de usuario V1.2 ©2018, [en línea], Bogotá D.C – Colombia, 30 P. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://www.subsuelo3d.com/descargas/>
- [14] IPI2win - 1D interpretation of VES profile 119899, Russia, Moscow,

- Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. V.A. Shevnin, I.N.Modin [en línea]. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>
- [15] Geometrics, Simplyfy your search, Geode Exploration Seismograph, [en línea], San José, CA, U.S.A., 2020. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.geometrics.com/product/geode-exploration-seismograph/>
- [16] SeisImager/SWTM Manual, Windows Software for Analysis of Surface Waves, Including explanation of surface wave data acquisition using Geometrics Seismodule Controller Software for ES-3000, SmartSeis ST, Geode, and StrataVisor NZ seismographs [en línea]. [Consulta 17 de febrero de 2020], 2009, V 3.0, 314 P. Disponible en: https://geometrics.com/wp-content/uploads/2019/04/SeisImagerSW_Manual_v3.0.pdf
- [17] Rivera, M., Piedra, R. y Paripanca, Y., Ensayos geofísicos de refracción sísmica y de medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. Civilizate. [en línea]. 1(6), 2016. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/18630>
- [18] Normas y especificaciones INVIAS. Ensayo de penetración normal y muestreo con tubo partido de los suelos, I.N.V. E – 111 [en línea]. [Consulta 18 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-industrial-de-Santander/mecánica-de-sólidos/otros/seccion-100-inv-seccion-100-suelos/4897092/view>
- [19] Geotechnical Engineering Software, NovoTech, SPT Correlations Software-NovoSPT [en línea]. North Vancouver, BC, Canadá V7P 3P9. [Consulta 18 de febrero de 2020]. Disponible en internet: <https://novotechsoftware.com/geotechnical-software/spt-correlations-software/>
- [20] Arias, D., Echeverri, O. y Hoyos, F., Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica, Boletín de Ciencias de la Tierra, [en línea], (31), pp. 39-50, 2012. [Consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31252/43363>
- [21] ASTM International, Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation. Designation: D 5777 [en línea]. 4(9). 2000. [consulta 17 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D5777.htm>
- [22] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, Título A — Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, D.C., Colombia, 2010, 186 P.
- [23] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Título H — Estudios Geotécnicos. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, D. C., 2010, 66 P.

A.J., Moya-Gutiérrez, es Ingeniero Civil en 2020 de la Universidad de Pamplona, Colombia.
ORCID: 0000-0002-9341-9876.

J.A. Torres-Peña, es investigador del Grupo de Investigación en Geología y Geofísica (PANGEA), profesor TCO, del Departamento de Física y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Pamplona, Colombia.
ORCID: 0000-0003-1867-003X.

M.A. Contreras-Martínez, es Director de Departamento Ingeniería Civil y Ambiental. Director del Grupo de Investigación en Ingeniería Civil (ETENOHA), profesor adscrito al Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, Colombia.
ORCID: 0000-0002-2856-7768.