

Modelamiento geológico 3D de una posible cuenca cratérica reciente en el departamento de Vichada, Colombia, mediante la integración de sísmica 2D y datos de pozo, utilizando un framework de libre acceso

Luisa Fernanda Gómez Santamaría

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

William David Avellaneda Cáceres

Mgtr. en Geología

Codirector

Yesid Paul Goyes Peñafiel

Geólogo, PhD (c) en Ciencias de la Computación

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A las mujeres de mi familia y entorno, que con su dulzura y valentía han impulsado en mí
el espíritu de superación.

Y a mí misma, porque pocas veces me reconozco, pero hoy elijo hacerlo.

Agradecimientos

Agradezco al Proyecto de Paleoclimatología y Paleoambiente del Servicio Geológico Colombiano por permitirme ser parte de esta valiosa línea de investigación.

Al Semillero de Investigación en Geofísica Aplicada y Computacional SIGAC-UIS por brindarme el espacio y la guía que despertaron en mí el interés por la investigación.

A mi director de tesis, y a mi codirector, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A los profesores que transmiten con pasión su conocimiento.

A la Universidad Industrial de Santander, por garantizar una educación de calidad accesible a todas las personas.

A quien fue un apoyo constante, fuente de cariño y complicidad durante este proceso.

Y a mi familia, así como a todas las personas que he conocido y me han acompañado a lo largo de este arduo camino de aprendizaje y crecimiento.

Tabla de contenido

Introducción	12
Generalidades Geográficas	13
Generalidades Geológicas.....	15
2 Planteamiento y justificación del problema	18
3 Objetivos	21
3.1 Objetivo general.....	21
3.2 Objetivos específicos	21
4 Marco teórico	22
4.1 Estructuras de impacto meteórico	22
4.1.1. Formación de estructuras de impacto meteórico.....	23
4.1.2. Tipos de estructuras de impacto meteórico.....	25
4.1.3. Identificación de estructuras de impacto meteórico.....	27
4.2 Modelado Geológico 3D.....	28
4.3 Análisis de Incertidumbre	32
5 Metodología	34
5.1 Fase 1. Revisar y analizar información geológica y geofísica para el estudio de la posible estructura de impacto en el departamento de Vichada, Colombia.	34
5.2 Fase 2. Interpretar las secciones sísmicas procesadas en el dominio de la profundidad y correlacionadas con los datos de pozo.	34
5.3 Fase 3. Generar un modelo geológico 3D integrando datos de secciones sísmicas interpretadas, utilizando una biblioteca de código abierto basada en Python.....	35

5.4	Fase 4. Evaluar la fiabilidad del modelo mediante un análisis de incertidumbre, incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas.	36
6	Resultados	36
6.1	Revisión y análisis de información geológica y geofísica para el estudio de la posible estructura de impacto en el departamento de Vichada, Colombia.	36
6.1.1.	Recopilación y síntesis de información geológica y geofísica que respalde la hipótesis de un posible cráter de impacto.	36
6.1.2.	Modelo conceptual inicial de la posible cuenca cratérica.	46
6.1.3.	Análisis y revisión de ripios de pozo.	49
6.2	Interpretación de las secciones sísmicas procesadas en el dominio de la profundidad y correlacionadas con los datos de pozo.	50
6.2.1.	Análisis de la información sísmica y de pozo suministrada por el BIP.	50
6.2.2.	Conversión tiempo a profundidad de las secciones sísmicas.	54
6.2.3.	Interpretación de las secciones sísmicas en profundidad correlacionadas con la información de pozo.	57
6.3	Generación de un modelo geológico 3D integrando datos de secciones sísmicas interpretadas, utilizando una biblioteca de código abierto basada en Python.	59
6.3.1.	Recolección de los datos de entrada para el modelamiento geológico 3D.	59
6.3.2.	Modelamiento geológico 3D.	60
6.4	Evaluación de la fiabilidad del modelo mediante un análisis de incertidumbre, incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas.	65
6.4.1.	Análisis de incertidumbre del modelo geológico 3D.	65
6.4.2.	Cuantificación de la incertidumbre del modelo geológico 3D.	67
7	Conclusiones	68
	Referencias bibliográficas	70

Lista de Figuras

Figura 1 Ubicación geográfica del área de estudio en el departamento del Vichada, bajo influencia de la zona ITCZ	14
Figura 2 Mapa geológico y estratigrafía del área de estudio	16
Figura 3 Desarrollo progresivo de una estructura de impacto simple	24
Figura 4 Secciones transversales esquemáticas de los tipos de estructuras de impacto según parámetros morfológicos	26
Figura 5 Ejemplo de los datos de entrada y campo escalar	30
Figura 6 Ejemplo de modelos generados con la biblioteca GemPy.....	31
Figura 7 Resultados de programación probabilística en una sección transversal	33
Figura 8 Mapa de síntesis de posibles evidencias geológicas y geofísicas asociadas a la posible estructura de impacto del Río Vichada	38
Figura 9 Mapa de anomalías de gravedad que incluye efectos de gravedad del terreno compensados (CTGE) (tomado de Hernandez et al., 2009).....	41
Figura 10 Anomalías magnéticas 2D de Bouguer y RTP (tomado de Hernández et al., 2011) ...	42
Figura 11 Modelo digital de terreno y trazado de los perfiles de gravimetría y magnetometría (tomado de Torrado Pérez, 2019)	45
Figura 12 Esquema conceptual inicial de la evolución de la posible cuenca cratérica del Río Vichada	48

Figura 13 Mapa de la distribución espacial de la información sísmica y de pozo suministrada por el BIP	51
Figura 14 Modelos de velocidad RMS para las líneas BHP-CPE5-2010-01 y BHP-CPE5-2010-03	55
Figura 15 Funciones de velocidad intervállica	56
Figura 16 Secciones sísmicas interpretadas en el dominio de la profundidad.....	58
Figura 17 Representación esquemática de la extracción de los datos de entrada para el modelado geológico 3D a partir de una sección sísmica interpretada.....	60
Figura 18 Visualización 3D de las superficies/interfaces geológicas generadas mediante el algoritmo de interpolación de campos potenciales en GemPy	61
Figura 19 Modelo geológico 3D del área de estudio	63
Figura 20 Comparación cualitativa de algoritmos de interpolación en la generación de superficies	64
Figura 21 Visualización de secciones de probabilidad de ocurrencia para las unidades geológicas en el modelo geológico 3D	66
Figura 22 Visualización de sección 2D de la entropía de Shannon para el modelo geológico 3D	67

Lista de tablas

Tabla 1 Relación entre el diámetro del cráter de impacto y el diámetro aproximado del proyectil que lo generó, según French (1998a).....	23
Tabla 2 Características y dimensiones estimadas del posible cráter de impacto en Vichada, según estudios previos.....	37
Tabla 3 Inventario de la información sísmica suministrada por el BIP	52

Lista de apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Columna estratigráfica elaborada a partir de la caracterización litológica de ripios del pozo CPE-5 SC

Apéndice B. Columna estratigráfica elaborada a partir de la caracterización litológica de ripios del pozo CPE-5 SD

Apéndice C. Columna estratigráfica elaborada a partir de la caracterización litológica de ripios del pozo CPE-5 SE

Apéndice D. Descripción litológica de ripios del pozo CPE 5-SC

Apéndice E. Descripción litológica de ripios del pozo CPE 5-SD

Apéndice F. Descripción litológica de ripios del pozo CPE 5-SE

Resumen

Título: Modelamiento geológico 3D de una posible cuenca cratérica reciente en el departamento de Vichada, Colombia, mediante la integración de sísmica 2D y datos de pozo, utilizando un framework de libre acceso*

Autor: Luisa Fernanda Gómez Santamaría **

Palabras Clave: Estructura del Río Vichada, Estructuras de impacto meteórico, modelamiento geológico 3D, análisis de incertidumbre

Descripción: En la cuenca de los Llanos Orientales, en el departamento del Vichada, Colombia, se desarrolló un modelo geológico 3D de una posible cuenca cratérica reciente, mediante la integración de sísmica de reflexión 2D y datos de pozo, utilizando un framework de libre acceso. La metodología consistió en la revisión y análisis de información geológica y geofísica disponible, la interpretación de ocho líneas sísmicas de reflexión convertidas al dominio de la profundidad y correlacionadas con la información de cuatro pozos distribuidos en un área de 9200 km², así como la construcción del modelo geológico 3D mediante el método de interpolación de campo potencial. Posteriormente, se evaluó la fiabilidad del modelo mediante un análisis de incertidumbre incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas y cuantificando su entropía. Los resultados muestran que el modelamiento geológico 3D, realizado mediante el método de interpolación de campo potencial, permitió definir la geometría y la continuidad de las formaciones sedimentarias en el área de estudio, así como el patrón general de la cuenca y la relación espacial entre las unidades geológicas. El análisis de incertidumbre evidenció que el modelo es robusto frente a variaciones en los datos de entrada, con resultados estables incluso al introducir perturbaciones. Adicionalmente, la utilización de la librería de código abierto basada en Python permitió realizar un modelamiento reproducible y transparente, facilitando la integración y visualización de los datos geológicos.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: William David Avellaneda Cáceres. Magister en Ciencias – Geología. Co-director: Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD (c) en Ciencias de la Computación.

Abstract

Title: 3D geological modeling of a possible recent impact crater basin in the department of Vichada, Colombia, through the integration of 2D seismic and well data, using an open-source framework *

Author: Luisa Fernanda Gómez Santamaría **

Key Words: Vichada River structure, meteoric impact structure, 3D geological geomodeling, uncertainty analysis

Description: In the Llanos Orientales Basin, located in the Vichada department of Colombia, a 3D geological model of a potential recent crater-like basin was developed through the integration of 2D reflection seismic data and well information, using an open-source framework. The methodology included the review and analysis of available geological and geophysical data, the interpretation of eight depth-converted seismic reflection lines correlated with data from four wells distributed over an area of 9200 km², and the construction of the 3D geological model using the potential field interpolation method. Subsequently, the model's reliability was evaluated through an uncertainty analysis that incorporated the probabilistic distribution of geological formations and quantified its entropy. The results show that the 3D geological modeling, performed using the potential field interpolation method, allowed for defining the geometry and continuity of the sedimentary formations in the study area, as well as the general pattern of the basin and the spatial relationships between geological units. The uncertainty analysis demonstrated that the model is robust against variations in the input data, with stable results even when perturbations were introduced. Additionally, the use of the open-source Python-based library enabled reproducible and transparent modeling, facilitating the integration and visualization of geological data.

*Undergraduate thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: William David Avellaneda Cáceres. MSc of Science – Geology. Co-director: Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD Candidate in Computer Science.

Introducción

Al este de la cuenca de los Llanos Orientales en Colombia, surge la hipótesis de un posible cráter de impacto, ubicado específicamente en el municipio de Cumaribo, departamento del Vichada. Esta estructura potencial representa un notable interés tanto para la comprensión de dinámicas planetarias y procesos geológicos, como por su posible implicación económica en relación con mineralizaciones asociadas. La hipótesis ha sido abordada en estudios previos a partir de análisis geológicos y geofísicos, incluyendo gravimetría, magnetometría y sondeos eléctricos verticales; sin embargo, hasta el momento no se ha identificado evidencia geológica directa que permita su confirmación oficial. En el presente estudio se explora la posible existencia de esta estructura mediante la integración e interpretación de datos sísmicos 2D y de pozo, fuentes de información del subsuelo que no habían sido analizadas anteriormente en este contexto. Estos datos se integran en un modelo geológico 3D que revela la geometría del subsuelo. El modelamiento geológico 3D fue desarrollado bajo un framework de libre acceso, el cual corresponde a un marco de trabajo que emplea el método de interpolación de campo potencial que incorpora precisión y sentido geológico al modelado, complementando con una evaluación de su fiabilidad mediante un análisis de incertidumbre. Los resultados de este estudio podrían sentar las bases para futuras investigaciones de campo que permitan recolectar evidencias directas y verificar la naturaleza de esta posible estructura de impacto. Este análisis representa el primer acercamiento detallado con datos sísmicos y de pozo aplicado a esta hipótesis estructural.

Los datos utilizados en este estudio consisten en ocho secciones de reflexión sísmica terrestre 2D y cuatro pozos. Los datos sísmicos cubren un área de aproximadamente 9200 km², y con base en esta cobertura se delimitó el área de estudio. Las líneas sísmicas se encontraban en el dominio del tiempo, por lo que fue necesario realizar una conversión tiempo a profundidad con el fin de precondicionar los datos y obtener una interpretación más precisa. Esta conversión permite revelar o eliminar estructuras geológicas generadas en la adquisición y procesamiento en el dominio del tiempo; además, facilita la correlación con la información proveniente de los pozos.

Este trabajo se desarrolla bajo el marco de la línea de investigación de Paleoclima y Cambio Climático del Servicio Geológico Colombiano. La información sísmica y de pozo que se utilizarán en este análisis fue proporcionada por el Banco de Información Petrolera a través del Servicio Geológico Colombiano.

Generalidades Geográficas

El área de estudio se localiza al noroccidente de Sur América y se encuentra bajo influencia de la zona de convergencia intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés), una región cerca del ecuador de baja presión donde convergen los vientos alisios del norte y del sur, dominando el hidrocima regional en las regiones tropicales (Pendergrass et al., 2024). El área está ubicada al este de la cuenca de los Llanos Orientales en Colombia, específicamente en el municipio de Cumaribo, departamento del Vichada (Figura 1). La zona incluye las veredas Matagrande, El Tapón Sur, Chaparral, Chaparral Bajo, Nueva Colombia, El Diamante, Reforma, Vuelta del Venado, y los resguardos Santa Teresa del Tuparro y Selva de Mataben. El principal afluente de la región es el Río Vichada al Sur, seguido en importancia por el Río Tuparro al Norte, los cuales reciben las aguas de diversas quebradas del área y, a su vez, descargan sus aguas en el Río Orinoco.

Figura 1

The map displays the northern region of Colombia, with a focus on the Vichada department. A red box highlights the study area, which is bounded by the Rio Tuparro to the north and the Rio Vichada to the south. The map includes a legend for precipitation (mm/año) and elevation (m.s.n.m.), and a scale bar indicating 20 km. The map also shows the location of Vichada and the Rio Tuparro. The map is titled 'Mapa de la zona de estudio' and includes a north arrow.

Precipitación prom.(mm/año)

10451
-9999

Elevación m.s.n.m

222
69

Nota. Sistema de coordenadas proyectadas MAGNA-SIRGAS/Zona Central Este de Colombia
EPSG:3117; DEM ALOS PALSAR Hi Res 12.5 m; ráster tomado de *NASA's Global Precipitation
Measurement. (GPM) Mission.*

Generalidades Geológicas

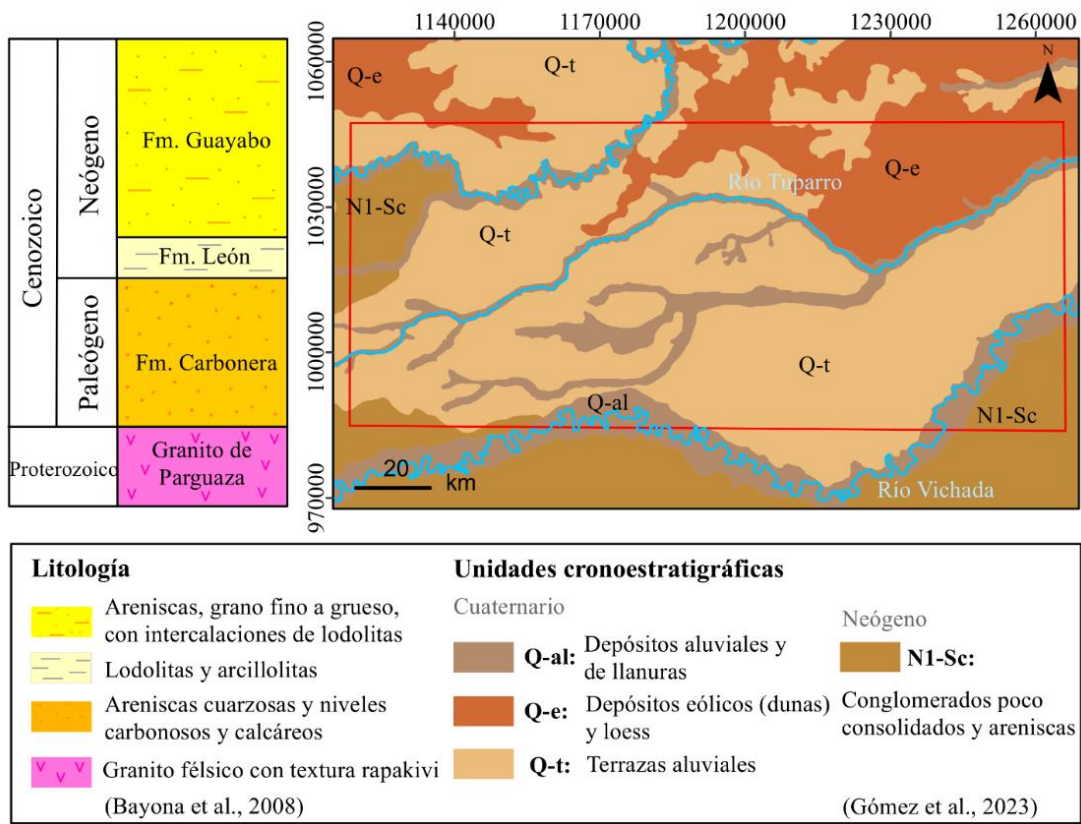
La cuenca de los Llanos es una cuenca de antepaís del Cretácico, formada por la subsidencia por flexión que causa la carga tectónica asociada a la Cordillera Oriental (Bayona et al., 2007). Esta cuenca tiene una superficie de 96000 km² y alberga una gruesa secuencia de sedimentos del Cretácico al Cenozoico, de aproximadamente 5800 m, depositados sobre un basamento cristalino que corresponde al escudo precámbrico de Guyana (Bayona et al., 2008; Moreno-López y Escalona, 2015). Específicamente, el área de estudio es una región tectónicamente estable, sin estructuras geológicas significativas expuestas en la superficie, ni de fallas visibles y corresponde a una llanura totalmente cubierta por sedimentos cuaternarios (Figura 2). Esta cobertura sedimentaria es resultado de la variabilidad climática experimentada por el flanco oriental de la Cordillera Oriental, que incrementó la erosión de las formaciones cretácicas y cenozoicas, incrementando así el flujo y transporte de sedimentos hacia la región (Servicio Geológico Colombiano., 2014a). Estas rocas sedimentarias disminuyen progresivamente en espesor hacia el este, como lo respaldan los modelos geológicos, basados en datos gravimétricos y magnetométricos, que muestran una disminución progresiva del espesor de las secuencias sedimentarias a medida que se alejan de las estribaciones de la cordillera (Graterol, 2009).

Según datos de pozos y estudios geológicos en áreas vecinas, las formaciones sedimentarias cenozoicas y el basamento cristalino constituyen el subsuelo en el área de estudio. La Formación Guayabo, datada del Mioceno-Plioceno, se depositó en un ambiente predominantemente continental y consiste en una intercalación de arenas y arcillas en la base, con predominio de arenas en la sección superior. La Formación León, de edad Miocena, es una secuencia homogénea de lutitas gris verdosas de grano fino, asociadas a depósitos de ambientes

lacustres influenciados por aguas salobres (Bayona, et al., 2008). La Formación Carbonera, datada en el Eoceno-Mioceno, consiste en areniscas cuarzosas con material calcáreo, depositadas en un ambiente de transición, y líticas de rocas ígneas intrusivas félsicas, correlacionadas con el Granito Parguaza (De La Espriella et al., 1990). El basamento cristalino está compuesto por el Granito Parguaza del Escudo Guayanés de edad Proterozoica, este es un granito alcalino que exhibe una textura rapakivi con características de exsolución, con predominio de feldespato potásico sobre plagioclasa y cuarzo (González y Pinto, 1990).

Figura 2

Mapa geológico y estratigrafía del área de estudio



Nota. El conjunto de datos geológicos fue tomado del Mapa Geológico de Colombia 2023 a escala 1:1M del Servicio Geológico Colombiano.

Con base en estudios previos y la cartografía geológica de la zona, se identifican lineamientos como rasgos estructurales a partir del análisis de los drenajes, en los cuales se observan cambios abruptos en la dirección de los principales afluentes del área. Torrado Pérez (2019) y Khurama (2007), reconocieron en campo una serie de bloques erráticos y depresiones con un patrón semicircular, que se atribuye a la posible presencia de zonas de fallas normales locales.

Por otra parte, esta área de estudio es de particular interés, ya que podría albergar una estructura de impacto meteórico propuesta por primera vez por Rocca (2004) a partir de estudios de teledetección, en los que se identificó una desviación inusual del río Vichada que sigue un patrón circular característico de este tipo de estructuras. La hipótesis ha sido abordada en investigaciones posteriores mediante análisis remotos, geofísicos y geológicos (Khurama, 2007; Hernandez et al., 2009; Hernandez et al., 2011; Torrado Pérez, 2019). Sin embargo, hasta el momento no ha sido confirmada oficialmente, ya que no se cuenta con evidencia geológica directa que la respalde.

1 Planteamiento y justificación del problema

El estudio de los cráteres de impacto contribuye al avance de la ciencia planetaria, permitiendo reconstruir eventos de colisión pasados y a comprender sus efectos en la dinámica geológica terrestre, desde la deformación de la corteza hasta cambios climáticos y ambientales globales (Yue et al., 2023). La comprensión de la variabilidad climática es posible mediante el análisis de fenómenos naturales que están influenciados por el clima y que, en su estructura, reflejan el grado de esta influencia (Bradley, 2015). Un ejemplo de esto son los archivos naturales representados en los sedimentos en una cuenca. Las cuencas sedimentarias se entienden como zonas en las que los sedimentos pueden acumularse, permitiendo un espesor considerable y conservándose durante largos períodos de tiempo geológico (Einsele, 2000), constituyendo robustos registros del paleoclima si se encuentran preservados adecuadamente.

En este contexto, el área de estudio ubicada en el municipio de Cumaribo en el departamento de Vichada, Colombia, representa un lugar de interés como archivo natural del paleoclima, debido a la hipótesis de un impacto meteórico, que configuraría una cuenca cratérea. Esta hipótesis se basa en ciertas características geofísicas y geológicas observadas en estudios previos, que sugieren una posible estructura de impacto reciente (Rocca, 2004; Khurama, 2007; Hernandez et al., 2009; Hernandez et al., 2011; Torrado Pérez, 2019). Adicionalmente, el área de estudio se encuentra influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical, un sistema climático que controla la dinámica de precipitaciones en las bajas latitudes del planeta. Esto es relevante

dado que la comprensión paleoambiental en los trópicos es generalmente irregular en algunas áreas e inexistente en otras (Metcalf y Nash, 2012).

No obstante, la identificación de cráteres de impacto en la Tierra representa un desafío debido a los procesos geológicos dinámicos que afectan su preservación. Según Earth Impact Database (2018), solo se han identificado oficialmente 190 impactos meteóricos en el planeta. Muchos de estos cráteres de impacto son sepultados por espesas capas de sedimentos, lo que dificulta que sean identificados. Esta situación se refleja en el área de estudio, ubicada en una región completamente cubierta por sedimentos del Cuaternario, producto de la intensa dinámica fluvial en la cuenca de los Llanos Orientales (Servicio Geológico Colombiano, 2014b). Ante esto, el modelamiento geológico juega un papel importante, ya que se encarga de representar la geometría del subsuelo a partir del conocimiento geológico previo que es extraído de distintas fuentes de información (Calcagno et al., 2008).

Con base en esto, en este trabajo se integran por primera vez secciones sísmicas y datos de pozo para el estudio de esta posible estructura, a través de un modelamiento geológico 3D. En primer lugar, se interpretan horizontes de las secciones sísmicas convertidas al dominio de la profundidad y correlacionadas con los topes y bases de formaciones definidas en los datos de pozo, para generar los datos de entrada del modelo geológico. Generalmente este modelamiento se realiza en software comerciales, los cuales limitan el acceso a la investigación debido a sus altos costos. Para superar esta limitación, el modelamiento geológico 3D en este estudio se desarrolla bajo un framework de libre acceso basado en una biblioteca de código abierto en Python. Este framework corresponde a un marco de trabajo que utiliza el método de interpolación de campo potencial, el cual proporciona mayor precisión y sentido geológico, utilizando además de puntos

de superficie, los datos de orientación de estas. Su enfoque de modelamiento permite realizar un análisis de incertidumbre, lo que aporta al conocimiento de la fiabilidad de los modelos. Adicionalmente, proporciona interoperabilidad permitiendo integrarse fácilmente con otras herramientas y algoritmos de modelado.

En un país como Colombia, que se encuentra en transición energética, el uso de estas herramientas accesibles se vuelve fundamental para democratizar el conocimiento, permitiendo que más investigadores participen en el desarrollo, análisis y evaluación de modelos geológicos, con el fin de identificar áreas aptas para la explotación de recursos naturales (Thema y García, 2023).

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo geológico 3D de una posible cuenca cratérica reciente en el departamento de Vichada, Colombia, mediante la integración de sísmica 2D y datos de pozo, utilizando un framework de libre acceso.

2.2 Objetivos específicos

1. Revisar y analizar información geológica y geofísica para el estudio de la posible estructura de impacto en el departamento de Vichada, Colombia.
2. Interpretar las secciones sísmicas procesadas en el dominio de la profundidad y correlacionadas con los datos de pozo.
3. Generar un modelo geológico 3D integrando datos de secciones sísmicas interpretadas, utilizando una biblioteca de código abierto basada en Python.
4. Evaluar la fiabilidad del modelo mediante un análisis de incertidumbre, incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas.

3 Marco teórico

3.1 Estructuras de impacto meteórico

Los impactos meteóricos son procesos planetarios de gran importancia que han modificado la superficie del planeta Tierra. El impacto de los proyectiles planetarios sobre la superficie terrestre genera estructuras de impacto que son formas de relieve (cráter/cuenca) generalmente circulares a elípticas, dependiendo del ángulo del impacto (Hargitai y Kereszturi, 2015). Anteriormente, no se tenía la visión de que los impactos meteóricos pudieran producir efectos geológicos importantes, se consideraban un proceso astronómico menor que se limitaba a pequeños y efímeros cráteres, generalmente ubicados en zonas desérticas (Ormö y Llobet, 2013). Sin embargo, con el paso del tiempo, se han reconocido como un factor clave en la historia geológica y biológica de la Tierra. En esencia, la comprensión de los impactos como un factor clave en la historia de la Tierra se consolidó gracias a las exploraciones del sistema solar, que han establecido la importancia de la formación de cráteres de impacto en la configuración de todos los planetas (Taylor, 2001) y la capacidad de identificar con precisión las estructuras de impacto terrestres, mediante la presencia de criterios petrológicos y geoquímicos únicos generados por las intensas ondas de choque en eventos de impacto (French, 1998b). La geología de impacto se enfoca ahora en la exploración de estas estructuras, con el fin de determinar cómo los grandes impactos generan efectos geológicos y biológicos, y entender las transformaciones químicas y mineralógicas que ocurren bajo las condiciones físicas extremas de un impacto (Yue et al., 2023b).

3.1.1. Formación de estructuras de impacto meteórico

El proceso de craterización es complejo, muchos detalles aún son inciertos y no se pueden realizar cálculos ni predicciones con total certeza. Todo el conocimiento sobre las estructuras de impacto es indirecto y proviene de la combinación de estudios teóricos y experimentales (Melosh, 1989) que proporcionan la base esencial para comprender cómo se forman los cráteres de impacto y para descifrar las características geológicas que presentan.

Las estructuras de impacto pueden ocurrir en una amplia variedad de tamaños. El tamaño del cráter depende de las dimensiones del cuerpo impactante, y del sustrato impactado. El diámetro de un cráter es de 10 a 15 veces más grande que el meteorito que lo crea (Tabla 1) (French, 1998a).

Tabla 1

Relación entre el diámetro del cráter de impacto y el diámetro aproximado del proyectil que lo generó, según French (1998a)

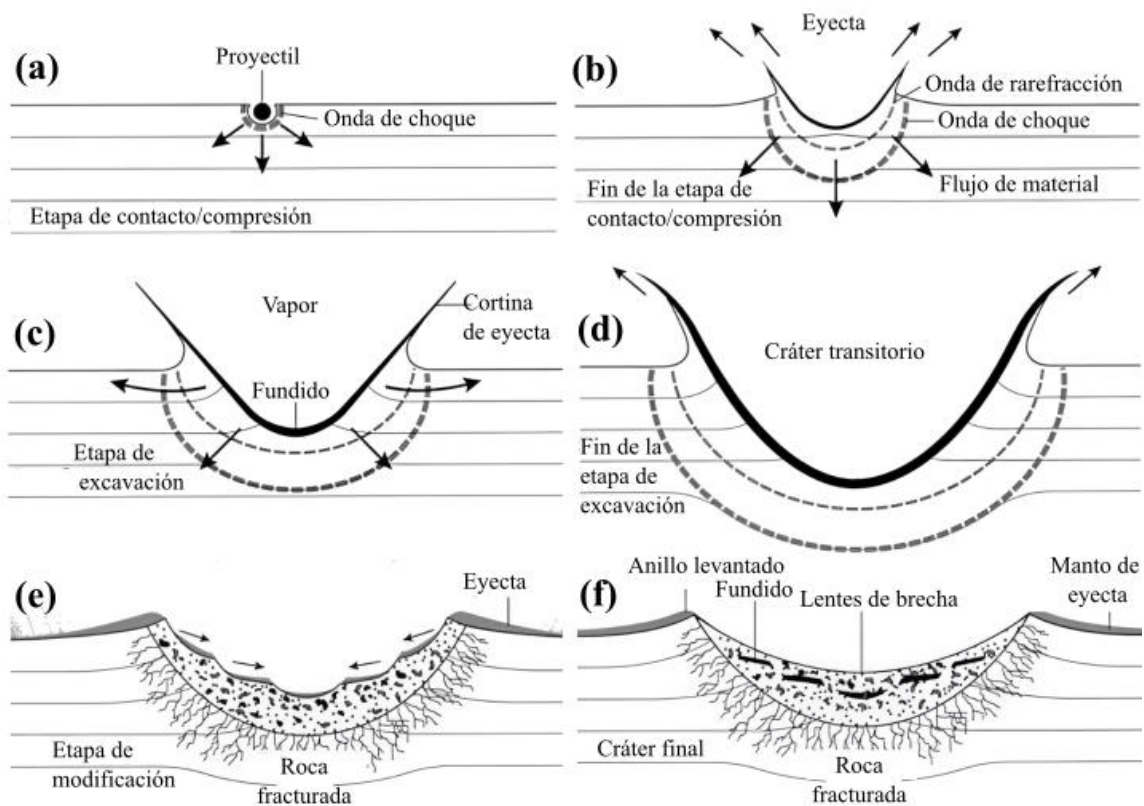
Diámetro del cráter (m)	Diámetro aproximado del proyectil (m)
35	2
75	4
120	6
450	23
1000	50
5000	250
10000	500
20000	1000

La formación de un cráter de impacto es compleja y continua (Figura 3), y se divide en tres etapas: contacto/compresión, excavación y modificación (Gault et al., 1968). La etapa de

contacto/compresión comienza en el instante en que el proyectil en movimiento hace contacto con la superficie del suelo. El área del impacto se divide en zonas concéntricas, cada una con diferentes rangos de presión y efectos metamórficos específicos en las rocas (Melosh, 1989). Durante la etapa de excavación de un cráter de impacto, el cráter se amplía debido a las interacciones entre las ondas de choque en expansión y la superficie del terreno. Cerca de la superficie, las tensiones de la onda de liberación fracturan las rocas objetivo, e impulsando fragmentos de roca hacia afuera a altas velocidades, esto crea un cráter transitorio (French, 1998a). Esta fase es crucial para definir las características del cráter, como su diámetro, profundidad, energía del impacto, y la cantidad de material fundido y expulsado (Grieve et al., 1977).

Figura 3

Desarrollo progresivo de una estructura de impacto simple



Nota. (a) Etapa de contacto/compresión: penetración inicial del proyectil, emisión de las ondas de choque hacia el exterior; (b) Inicio de la etapa de excavación: expansión continua de la onda de choque hacia el objetivo; (c) Etapa intermedia de la excavación: expansión continua de la onda de choque; flujo de eyecta hacia el exterior; (d) Fin de la etapa de excavación: la cavidad transitoria alcanza su extensión máxima. Se desarrolla un borde de cráter elevado; (e) Etapa de modificación: las paredes empinadas del cráter transitorio colapsan, se forman depósitos de brecha mixta (lente de brechas) dentro del cráter. Modificado de French (1998a).

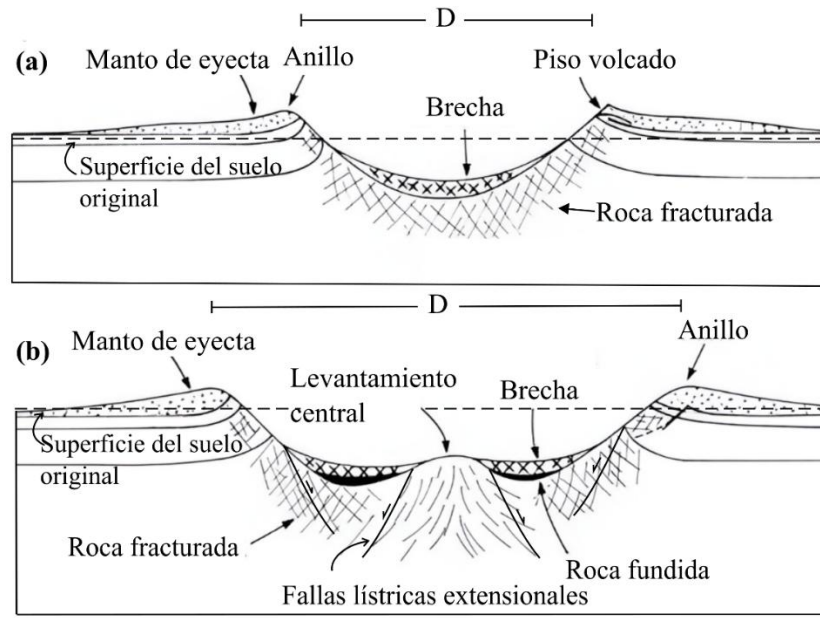
El cráter transitorio al alcanzar su tamaño máximo comienza a modificarse inmediatamente por factores como la gravedad y la mecánica de rocas. La parte de esta etapa de modificación, durante la cual se producen los principales cambios relacionados con el impacto, no tiene un final claramente definido, los procesos de modificación de levantamiento y colapso se fusionan gradualmente con los procesos geológicos normales (Kenkmann et al., 2014).

3.1.2. Tipos de estructuras de impacto meteórico

Dependiendo del grado de modificación del cráter transitorio, se pueden formar tres tipos distintos de estructuras de impacto, que se clasifican con base a su morfología dependiendo de parámetros como: diámetro, profundidad, estructuras del borde y del fondo, entre otras. Estas son cráteres simples, cráteres complejos y cuencas multi-anillo (French, 1998b). Los cráteres de impacto simple son las estructuras de impacto más pequeñas y se presentan como depresiones en forma de cuenco de unos pocos kilómetros de diámetro (Figura 4 (a)). A medida que los cráteres son más grandes, acostumbran a tener un pico central y la pared del cráter en terrazas debido al colapso gravitacional de la cavidad transitoria inicial. Las rocas alrededor del cráter transitorio colapsan hacia abajo y hacia adelante a lo largo de fallas concéntricas para formar grabens deprimidos y una serie de terrazas a lo largo de la estructura final, el cráter resultante se denomina cráter complejo (Figura 4 (b)).

Figura 4

Secciones transversales esquemáticas de los tipos de estructuras de impacto según parámetros morfológicos



Nota. (a) Cráter de impacto simple y (b) Cráter de impacto complejo. Modificado de Glass y Simonson (2013).

En la mayoría de los cráteres de doble anillo, la zona central coincide con una anomalía gravimétrica positiva, y el diámetro de esta anomalía corresponde al diámetro interior del anillo central (von Frese et al., 2009). Las estructuras de impacto de múltiples anillos se forman por el impacto de proyectiles de decenas a cientos de kilómetros de diámetro, y se originan principalmente en los primeros periodos del sistema solar mayores a 3.9 Ga, cuando los objetos de gran tamaño eran más abundantes y las colisiones más frecuentes (Urrutia-Fucugauchi y Pérez-Cruz, 2009).

3.1.3. Identificación de estructuras de impacto meteórico

La identificación de las estructuras de impacto en la Tierra es más difícil e incierta, ya que las partes superiores, especialmente las críticas, suelen ser eliminadas por la erosión o enterradas por sedimentos posteriores. En otros planetas, donde la erosión y la tectónica no afectan la preservación, se pueden observar todas las características propias que permiten identificar y clasificar la estructura de impacto con base a su morfología. El registro de impactos en la Tierra es de 190 estructuras geológicas identificadas oficialmente (Earth Impact Database, 2018). Las estructuras de impacto conocidas implicaron perturbaciones tanto en la corteza terrestre, como en la historia geológica de las regiones donde se generaron. Además, dieron lugar a diversas formaciones geológicas con un valor económico considerable (James et al., 2022).

En Suramérica, los cráteres de impacto identificados son muy escasos, e incluso inexistentes en el caso de Colombia (Crósta et al., 2019). Esto se debe a factores como la poca exploración debido a la espesa cubierta de selva tropical que dificulta el acceso. Además, considerando la dinámica de levantamiento y plegamiento en el territorio nacional, que no permite una buena preservación de estas estructuras. Ante estas limitaciones, se recurren a los datos geofísicos, como sísmica de reflexión, gravimetría, magnetometría y métodos eléctricos, para identificar estas estructuras enterradas (Sturkell y Ormö, 1998; von Frese et al., 2009; Torrado Pérez, 2019; Pereira et al., 2024). A pesar de la posible erosión o enterramiento de estas estructuras, sus firmas geofísicas únicas pueden facilitar su reconocimiento, incluso en regiones de difícil acceso. En este sentido, los métodos geofísicos juegan un papel fundamental en el descubrimiento de estructuras de impacto. Un ejemplo emblemático es el cráter de Chicxulub en México, identificado inicialmente mediante anomalías circulares detectadas por gravimetría y magnetometría durante la exploración petrolera

(Hildebrand et al., 1991). El método sísmico, en particular, proporciona imágenes de litologías contrastantes en el subsuelo, permitiendo identificar características diagnósticas de impactos de meteoritos. Estas características pueden incluir bloques derrumbados, rocas elevadas tanto en el borde como en el centro, relleno de brechas y láminas de fusión, entre otras (Mazur et al., 2000).

Estos métodos, aunque proporcionan información útil, no constituyen una evidencia directa de una estructura de impacto meteórico. Los criterios indispensables para catalogar oficialmente un cráter de impacto se refieren a evidencias físicas de impacto como la presencia in situ de estructuras geológicas denominadas conos estriados de choque (shatter cones), características de deformación planar en minerales y la presencia de polimorfos de alta presión dentro de los minerales en rocas in situ (Osinski et al., 2012).

3.2 Modelado Geológico 3D

El modelado geológico 3D ayuda a comprender la geometría del subsuelo y se basa en la capacidad de representar con precisión la realidad incluso en escenarios donde los datos disponibles son escasos, además de usarse para cuantificar procesos físicos (Calcagno et al., 2006). El método tradicional para comprender la estructura geológica de una región son los mapas geológicos, los cuales incluyen secciones transversales que permiten obtener una perspectiva tridimensional, que permite la extrapolación de contactos y discontinuidades geológicas en profundidad (Winchester y Morris, 2002). Los modelos geológicos 3D también son creados mediante la integración de múltiples fuentes de datos que proporcionan un conocimiento directo (datos de pozo) e indirecto (información geofísica) del subsuelo (Calcagno et al., 2008). Con mucha frecuencia no se dispone de datos suficientes debido al costo de adquirir datos en profundidad, pero de igual manera es necesario realizar un modelo 3D preciso para diversos

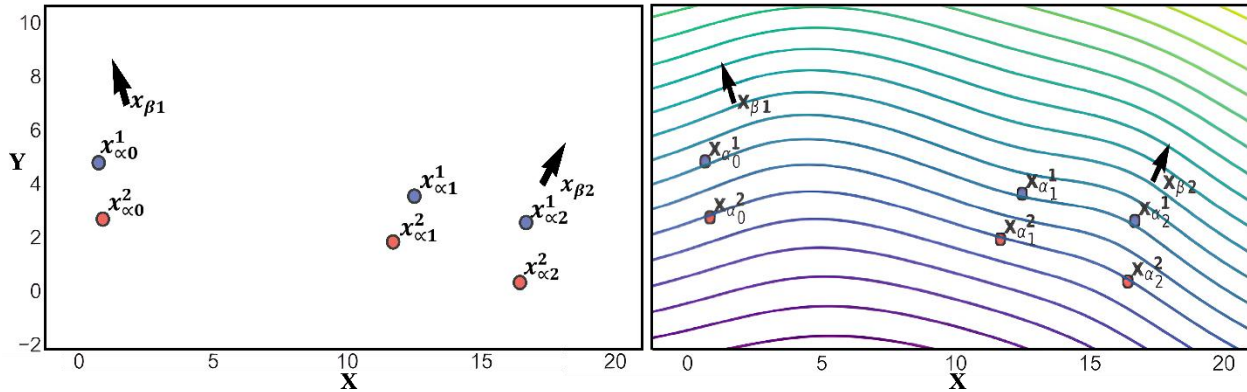
estudios de exploración, prospección, desarrollo ambiental, de riesgos y recursos (McInerney et al., 2005).

El modelamiento geológico 3D implica la representación de propiedades físicas o geológicas como volúmenes continuos en el subsuelo. Para ello, se recurre a la interpolación espacial, un proceso que permite estimar el valor de un atributo en ubicaciones no muestreadas, a partir de datos conocidos en puntos específicos del área de estudio (Hernández-Stefanoni et al., 2004). Los algoritmos de interpolación comúnmente utilizados en el geomodelado 3D modelan horizontes separados, pero no volúmenes 3D intrínsecos, estos son la Ponderación de Distancia Inversa (IDW), Lineal, Spline y Kriging (Yamamoto, 1998; Qu et al., 2021). Sin embargo, aunque han demostrado su utilidad en aplicaciones de exploración, a menudo no representan con precisión las propiedades reales del subsuelo (Castro et al., 2017).

Como alternativa, Lajaunie et al. (1997) proponen un método de interpolación que tiene en cuenta tanto las ubicaciones de contacto como los datos de orientación. El método de interpolación de campos potenciales define interfaces I_k ($K = 1, 2, \dots$) entre unidades geológicas utilizando datos de superficies geológicas, y estas interfaces son guiadas por el campo de orientación inferido a partir de los datos de orientación de las superficies (Lajaunie et al., 1997). Ambos tipos de datos (puntos de superficie y mediciones de orientación) se interpolan mediante cokriging creando una función escalar 3D continua de campo potencial $T(x)$ para cualquier punto $x = (x, y, z)$ (Chilès et al., 2004). La ubicación de la interfaz define la posición de los isovalores de referencia, es decir, el conjunto de puntos x que satisface $T(x) = I_k$ alineados con el campo de orientación (Figura 5). Los datos de orientación se representan como vectores unitarios 3D normales para cada plano estructural, determinando el gradiente del campo potencial (Calcagno et al., 2008).

Figura 5

Ejemplo de los datos de entrada y campo escalar



Nota. Los datos de entrada están formados por seis puntos distribuidos en dos capas ($\mathbf{x}_{\alpha i}^1$ y $\mathbf{x}_{\alpha i}^2$) y dos orientaciones ($\mathbf{x}_{\beta i}$). Una isosuperficie conecta los puntos de interfaz (superficie) y el campo escalar es perpendicular al gradiente de foliación. Modificado de de la Varga et al. (2018).

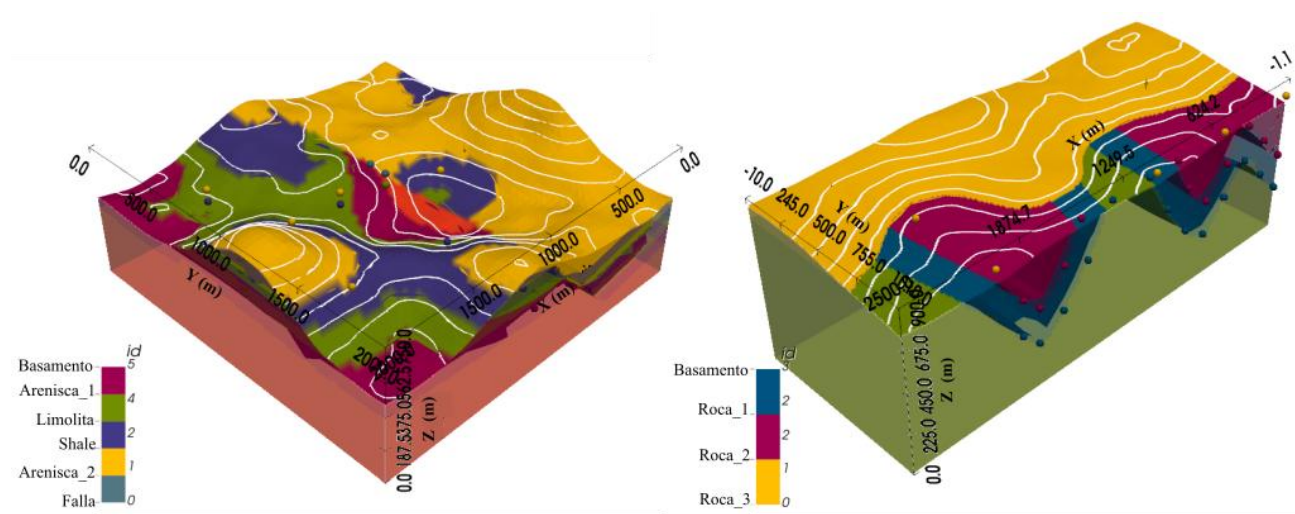
La división de este espacio en regiones distintas, según los valores del campo escalar, se denomina bloque litológico. A los puntos superficiales se les puede asignar una formación o un rasgo estructural, como fallas (Wu y Sun, 2021). Este enfoque permite representar la geometría de las formaciones en un marco estrechamente alineado con el sentido geológico. Este método ha sido una herramienta muy eficiente en el modelamiento geológico 3D en distintos contextos, desde cuencas sedimentarias (Calcagno et al., 2004), dominios orogénicos (Calcagno et al., 2007), ambientes intrusivos (Talbot et al., 2004), estudios mineros (McInerney et al., 2005) y geotécnicos (Calcagno et al., 2006).

Por otra parte, las herramientas disponibles para el modelado 3D se dedican principalmente a la industria petrolera, lo que implica elevados costos asociados a su adquisición y uso. Entre estos softwares se destacan Petrel, JewelSuite y Leapfrog Geo (Gunnarsson Niklas, 2011; Šram et

al., 2015; Braga et al., 2019). No obstante, en los últimos años han surgido alternativas de código abierto que permiten realizar modelamiento geológico 3D con menor costo y mayor accesibilidad, como GMSH, GeoMeshPy y GemPy (Wu y Sun, 2021; Dashti et al., 2023; Liu et al., 2024). GemPy, en particular, es una biblioteca de código abierto basada en Python para el modelamiento geológico 3D e inversión. Su enfoque estocástico permite incorporar la variabilidad inherente de los sistemas geológicos, lo que facilita la realización de análisis de incertidumbre orientados a evaluar la fiabilidad de los modelos generados. Una de sus principales fortalezas es la implementación del método de interpolación de campo potencial (de la Varga et al., 2018). Para construir un modelo en GemPy, se requieren como datos de entrada (a) puntos de superficie con coordenadas cartesianas posicionales (x, y, z) y (b) mediciones de orientación con coordenadas cartesianas posicionales (x, y, z), acimut, inclinación y polaridad (Figura 6).

Figura 6

Ejemplo de modelos generados con la biblioteca GemPy



Nota. Las esferas y las flechas representan los datos de entrada. Modificado de GemPy: Tutorials – Basics of geological modeling with GemPy; Modeling step by step.

3.3 Análisis de Incertidumbre

Los modelos geológicos 3D han desempeñado un papel esencial en múltiples áreas, desde la exploración minera y la industria petrolera hasta la planificación urbana, la evaluación de riesgos geológicos y la investigación científica (Jessell et al., 2010). Debido a esto, es de gran importancia generar modelos que sean una representación fiel y precisa de la geometría del subsuelo. La fiabilidad de los modelos es esencial para una toma de decisiones asertiva y se puede conocer a través del análisis de incertidumbre, al integrar un enfoque de modelamiento estocástico o también conocido como probabilístico (Høyer et al., 2024).

El análisis de incertidumbre es un proceso que permite evaluar y cuantificar el grado de fiabilidad en los modelos, con base en las variaciones de los datos de entrada, que es un factor condicionante del modelamiento geológico 3D. La incertidumbre evaluada en estos modelos es de tipo estocástica y se encuentra relacionada a la variabilidad inherente de un sistema, como lo es la heterogeneidad de las propiedades litológicas, la distribución espacial de las unidades geológicas y la disponibilidad de datos que funcionen como puntos de control (Wellmann y Regenauer-Lieb, 2012). Esta aproximación estocástica genera modelos con una distribución probabilística de litologías dentro de cada vóxel tras múltiples iteraciones. Esto significa que, en lugar de asumir una distribución determinista de litologías, un enfoque estocástico incorpora variabilidad e incertidumbre (Bonakdari y Zeynoddin, 2022).

El método de simulación de Monte Carlo para la propagación de la incertidumbre (MCUP) es un enfoque bayesiano que propaga la incertidumbre inicial de los datos de entrada en los modelos geológicos 3D (Raeside, 1976). Introduce la variabilidad geológica mediante una distribución normal, perturbando aleatoriamente la coordenada Z de los puntos de la superficie en

cada modelo inicial, lo que resulta en múltiples modelos estadísticamente válidos (Pakyuz-Charrier et al., 2019). Obteniendo modelos de incertidumbre donde se aprecia la probabilidad de ocurrencia de cada unidad geológica para cada vóxel del modelo geológico 3D (Figura 7).

Para cuantificar la incertidumbre se utiliza el modelo de la entropía de Shannon propuesto por Shannon (1948), el cual introduce una medida de incertidumbre basada en la probabilidad de ocurrencia de eventos (Figura 7). Esta formulación permite estimar la cantidad de incertidumbre asociada a un sistema, y es aplicada en diversos contextos, como el análisis espacial y la evaluación de incertidumbre en modelos geológicos. Para cada vóxel del modelo, al que se le ha asignado mediante simulaciones de Monte Carlo una probabilidad de ocurrencia para cada unidad geológica, se calcula la entropía de Shannon:

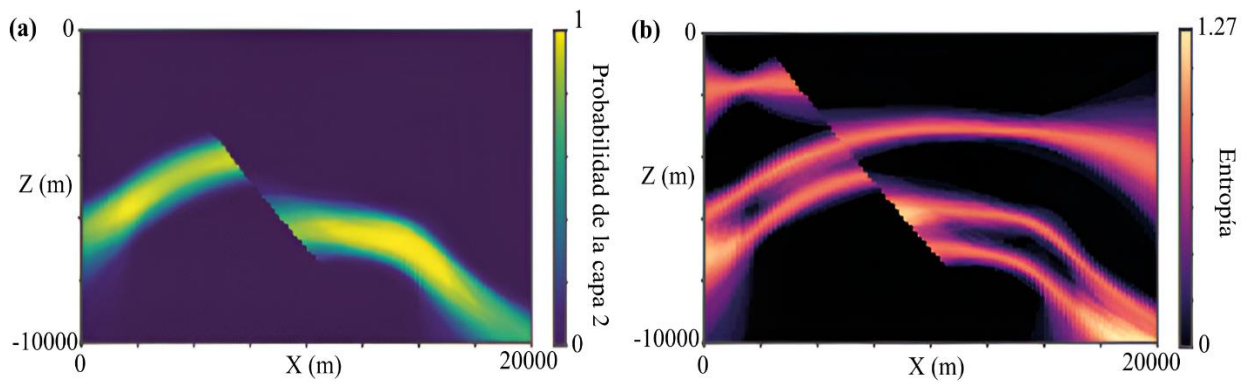
$$H = -\sum p_i \log(p_i) ,$$

Donde p_i es la probabilidad de ocurrencia litológica en cada vóxel (Brisson et al., 2023).

Por lo tanto, valores altos de entropía indican zonas con mayor incertidumbre geológica.

Figura 7

Resultados de programación probabilística en una sección transversal



Nota. La figura muestra la incertidumbre en los modelos geológicos dados valores estocásticos en la posición Z de los datos de entrada: (a) Probabilidad de ocurrencia para la capa 2; (b) Medida cuantitativa de la incertidumbre o aleatoriedad en el modelo. Modificado de de la Varga et al. (2018).

4 Metodología

Para el cumplimiento del alcance de los objetivos propuestos, se plantea la siguiente metodología dividida en tres fases, donde en cada fase se describen las actividades necesarias para cumplir cada objetivo específico y su producto sobre el cual se verificará el cumplimiento de la fase.

4.1 Fase 1. Revisar y analizar información geológica y geofísica para el estudio de la posible estructura de impacto en el departamento de Vichada, Colombia.

Actividad 1.1. Recopilar y sintetizar información geológica y geofísica disponible en estudios previos que respalden la hipótesis de un posible cráter de impacto y permitan establecer sus parámetros, basados en el marco teórico sobre los procesos de impacto y la evolución de las cuencas cratéricas.

Actividad 1.2. Elaborar un modelo conceptual inicial de la posible cuenca cratérica, integrando la información geológica y geofísica recopilada en la actividad 1.1.

4.2 Fase 2. Interpretar las secciones sísmicas procesadas en el dominio de la profundidad y correlacionadas con los datos de pozo.

Actividad 2.1. Analizar e inventariar la información sísmica y de pozo, empleando software de libre acceso como OpendTect¹ y Seissee². La información corresponde a 8 líneas sísmicas de reflexión 2D: BHP-CPE5-2010-01, BHP-CPE5-2010-02, BHP-CPE5-2010-03, BHP-CPE5-2010-04A, BHP-CPE5-2010-04, BHP-CPE5-2010-05, BHP-CPE5-2010-06, BHP-CPE5-2010-07; y 4 pozos: CPE-5 SC, CPE-5 SD, CPE-5 SE y CPE-5 SG.

Actividad 2.2. Convertir las secciones sísmicas del dominio del tiempo al dominio de la profundidad empleando el algoritmo de conversión basado en velocidades interválicas derivadas de la sísmica y la técnica de estiramiento vertical, seleccionado según aspectos técnicos y geológicos. La conversión se realizará en el software Promax (SeisSpace) con la licencia educativa de Landmark asignada a la Universidad Industrial de Santander.

Actividad 2.3. Interpretar los horizontes registrados en las secciones sísmicas producto de la actividad 2.2 y correlacionadas con los topes y bases de las formaciones definidas en los datos de pozo, analizando su continuidad lateral y aplicando atributos sísmicos que permitan resaltar la continuidad de estos en el software de libre acceso OpendTect.

4.3 Fase 3. Generar un modelo geológico 3D integrando datos de secciones sísmicas interpretadas, utilizando una biblioteca de código abierto basada en Python.

Actividad 3.1. Recolección de datos de entrada para el modelamiento geológico 3D, a partir de los horizontes interpretados en las secciones sísmicas producto de la Fase 2 y las mediciones de orientación de estos en OpendTect.

¹ <https://dgbes.com/software/opendtect>

² <https://seissee.software.informer.com/>

Actividad 3.2. Creación del modelo geológico 3D a partir de los datos de entrada recopilados en la actividad 3.1, empleando el método de interpolación de campo potencial y utilizando la biblioteca GemPy de código abierto basada en Python.

4.4 Fase 4. Evaluar la fiabilidad del modelo mediante un análisis de incertidumbre, incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas.

Actividad 4.1. Realizar simulaciones aleatorias utilizando el método de Monte Carlo en Python, para analizar la propagación de incertidumbre en los datos de entrada del modelo geológico 3D.

Actividad 4.2. Cuantificar la incertidumbre del modelo geológico 3D utilizando el modelo de entropía de Shannon en Python, aplicando los resultados de probabilidad de ocurrencia para cada unidad geológica obtenidos mediante las simulaciones de Monte Carlo de la actividad 4.1.

5 Resultados

5.1 Revisión y análisis de información geológica y geofísica para el estudio de la posible estructura de impacto en el departamento de Vichada, Colombia.

5.1.1. Recopilación y síntesis de información geológica y geofísica que respalda la hipótesis de un posible cráter de impacto.

Los estudios realizados por distintos autores, tanto en escalas regionales como locales, han examinado la estructura del río Vichada, estableciendo modelos geológicos y geofísicos que respaldan la hipótesis de un posible cráter de impacto. Estos modelos fueron establecidos a partir

de evidencias geológicas y geofísicas, cuyas características se sintetizan en la Tabla 2, se desarrollan a mayor detalle en los párrafos siguientes y se representan espacialmente en la Figura 8.

La estructura del Río Vichada fue mencionada por primera vez por el autor Rocca (2004), al analizar imágenes Landsat en color (resolución espacial de 200 m) con el objetivo de identificar rastros de impactos meteóricos en Sur América. Realizando esta tarea, llamó su atención la particular curvatura que describe el cauce del río Vichada en el municipio de Cumaribo ($4^{\circ}30'N$ - $69^{\circ}15'W$). Esta forma, considerada anómala, no presenta evidencias de estructuras superficiales que expliquen su origen y, de ser clasificada como un impacto meteórico, correspondería al cráter de mayor dimensión registrado en Sur América (Crósta et al., 2019). Mediante técnicas de teletección, Rocca (2004) definió una estructura con núcleo central de 30 km de diámetro, rodeado por una depresión de 20 km de diámetro y de anillos concéntricos de colinas con alturas máximas de 200 m. Además, la clasificó morfológicamente como una estructura de impacto de anillo de pico central, un tipo de cráter de grandes dimensiones asociado a grandes cantidades de energía liberadas en el impacto (Melosh, 1989). Según su propuesta, el río Vichada fluiría alrededor de un semicírculo perfecto, que se encuentra siguiendo los límites externos del anillo exterior. No obstante, el autor recomendó realizar un reconocimiento de la estructura en campo, con el fin de hallar evidencias geológicas directas que permitan clasificarla oficialmente como una estructura de impacto.

Tabla 2

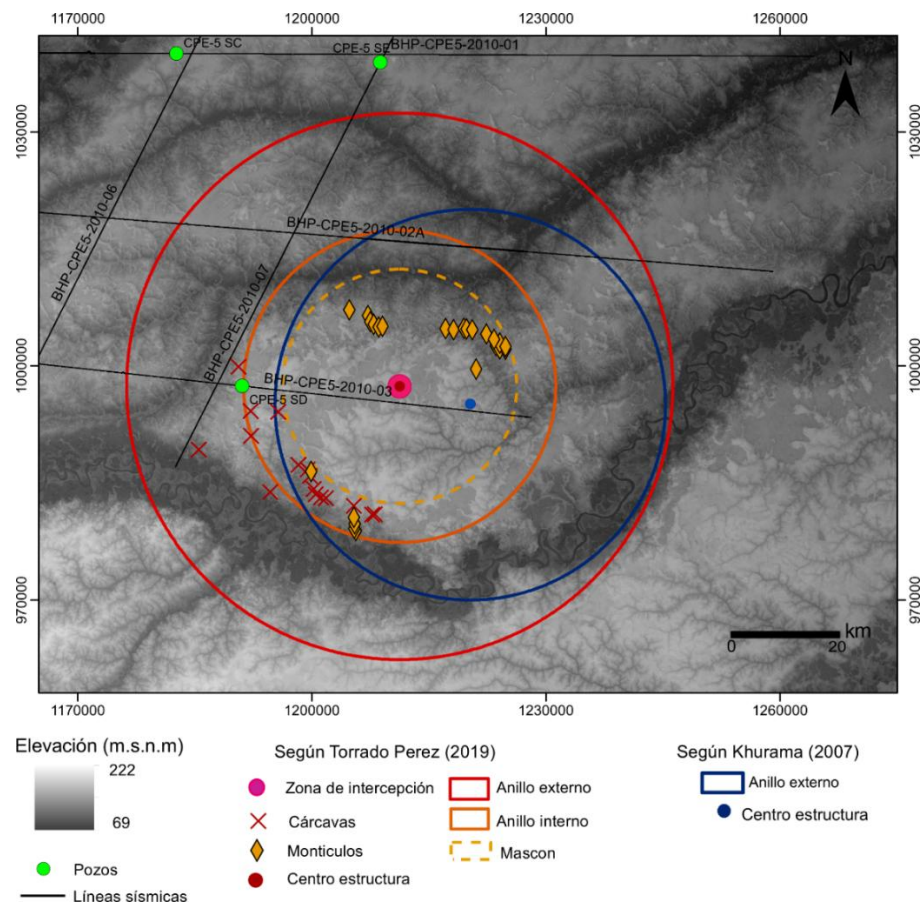
Características y dimensiones estimadas del posible cráter de impacto en Vichada, según estudios previos

Autor	Coordenadas	Tipo de estructura de impacto	Diá. estructura (km)	Diá. anillo interno (km)	Diá. anillo externo (km)	Mascon (km)	Diá. pico central (km)	Prof. máxima (km)
Rocca (2004)	$4^{\circ}30'N$, $69^{\circ}15'W$	De anillo de pico central	50	30	20	-	-	-
Khurama (2007)	$4^{\circ}32'58''N$, $69^{\circ}5'32''E$	Multi-anillo	50	30	20	-	-	-

Hernandez et al. (2009)	4°30'N, 69°15'W	Multi-anillo	50	30	20	30	-	-
Hernandez et al. (2011)	4°30'N, 69°15'W	Multi-anillo	50	30	20	Según Hernandez et al. (2009)	-	1
Hernández y Alexander (2018)	4°30'N, 69°15'W	Multi-anillo	50	30	20	Según Hernandez et al. (2009)	-	0.961
Torrado Pérez (2019)	4°34'12" N, 69°10'26.4" W	Multi-anillo	70	20	50	Según Hernandez et al. (2009)	6 a 8	1.4

Figura 8

Mapa de síntesis de posibles evidencias geológicas y geofísicas asociadas a la posible estructura de impacto del Río Vichada



Nota. Evidencias geológicas (montículos y cárcavas) y geofísicas (mascon, zona de intercepción anillo interno y externo), según los autores Khurama (2007) y Torrado Pérez (2019).

Luego de un par de años, el autor Khurama (2007) realizó en su tesis de maestría una caracterización geológica y geofísica de la estructura del Río Vichada. El autor define las coordenadas del centro de la estructura en N 4°32'58'' y E 69°5'32'' e identificó además del trazo circular del Río Vichada, un patrón similar en otros drenajes, entre ellos el Río Tuparro, al norte del Río Vichada, formando entre ellos una silueta de forma ovoide.

Mediante la elaboración de modelos teóricos de gravimetría y magnetometría, considerando las litologías conocidas en el sector, el autor redujo la posibilidad de diferentes fenómenos causativos para la génesis de la estructura circular, como diatremas e intrusivos y propuso un modelo compatible con un cráter de impacto de tipo multianillo con anillo central. En la zona que correspondería a los anillos de la estructura, Khurama (2007) observó promontorios que no superan los 200 m de altura y fallamiento evidenciando zonas de inestabilidad. A partir de estas observaciones, planteó la hipótesis de posible material de eyecta asociado a la estructura. Dichos promontorios están compuestos principalmente por areniscas ferruginosas intercaladas con sedimentos más friables. Los análisis de susceptibilidad magnética revelaron valores altos, para los rangos estándar de rocas sedimentarias, lo que indica alta concentración de hierro.

En la adquisición de datos gravimétricos se identificó una anomalía positiva (Figura 9), que describe una concentración anómala de masa (Mascon) asociada al plegamiento hacia arriba de la corteza inferior y un empuje ascendente del manto superior en respuesta a un fuerte estrés externo. Esto muestra un desbalance isostático, que según Khurama (2007) concuerda con un impacto meteórico relativamente joven (<30 m.a.), como el propuesto en la hipótesis de Rocca

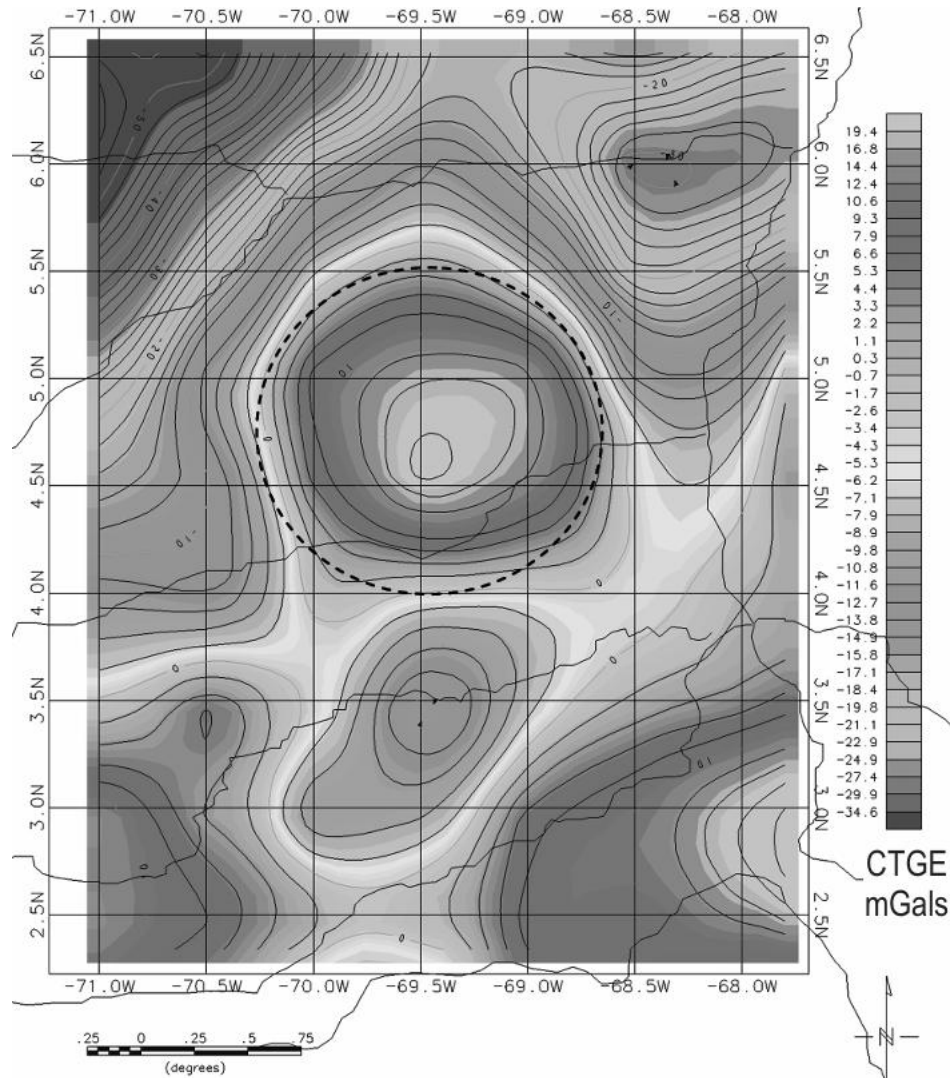
(2004), en el cual no habría transcurrido el tiempo suficiente para reestablecer el equilibrio isostático.

Finalmente, Khurama (2007) realizó un modelamiento físico-matemático del fenómeno asociado al impacto de un meteorito, a partir de supuestos específicos. Consideró como datos de entrada un diámetro de la estructura de 50 km, una densidad del meteorito de 8000 kg/m^3 , una velocidad de impacto de 17 km/s con un ángulo de 45° , y una densidad del objetivo de 8000 kg/m^3 . Bajo estas condiciones, el autor modeló un meteorito de aproximadamente 2 km de diámetro.

En 2009, Hernandez et al., en su estudio sobre evidencias geofísicas de un cráter de impacto en Vichada, realizaron correlaciones espectrales que permitieron separar las anomalías superficiales, relacionadas con la topografía, de las que se originan en estructuras más profundas, como los cráteres de impacto, facilitando la interpretación de las anomalías gravitacionales en el subsuelo. Este procedimiento permitió encontrar una prominente anomalía positiva en la cuenca de la estructura Vichada (Figura 9), la cual consiste en una anomalía positiva central circular rodeada por una anomalía anular negativa. Esta anomalía, conocida como “sombrero mexicano” por su forma característica, es típica de cráteres complejos de grandes dimensiones y se asocia a concentraciones de masa no compensadas en la corteza, originadas por el impacto. Este patrón ha sido identificado en cráteres de la Luna, Marte y la Tierra, como es el caso del cráter de Chicxulub en México (Gulick et al., 2013). Esta anomalía se atribuye a una concentración de masa (Mascon) bajo la cuenca de impacto, que se caracterizó con unos 30 km de ancho y 5 km de espesor. Con base en los resultados obtenidos, Hernandez et al. (2009) propone una estructura de impacto anular múltiple, cubierta por una secuencia sedimentaria de espesor variable (200 m a 1600 m), que afectó rocas del basamento precámbrico y unidades sedimentarias cenozoicas.

Figura 9.

Mapa de anomalías de gravedad que incluye efectos de gravedad del terreno compensados (CTGE) (tomado de Hernandez et al., 2009).



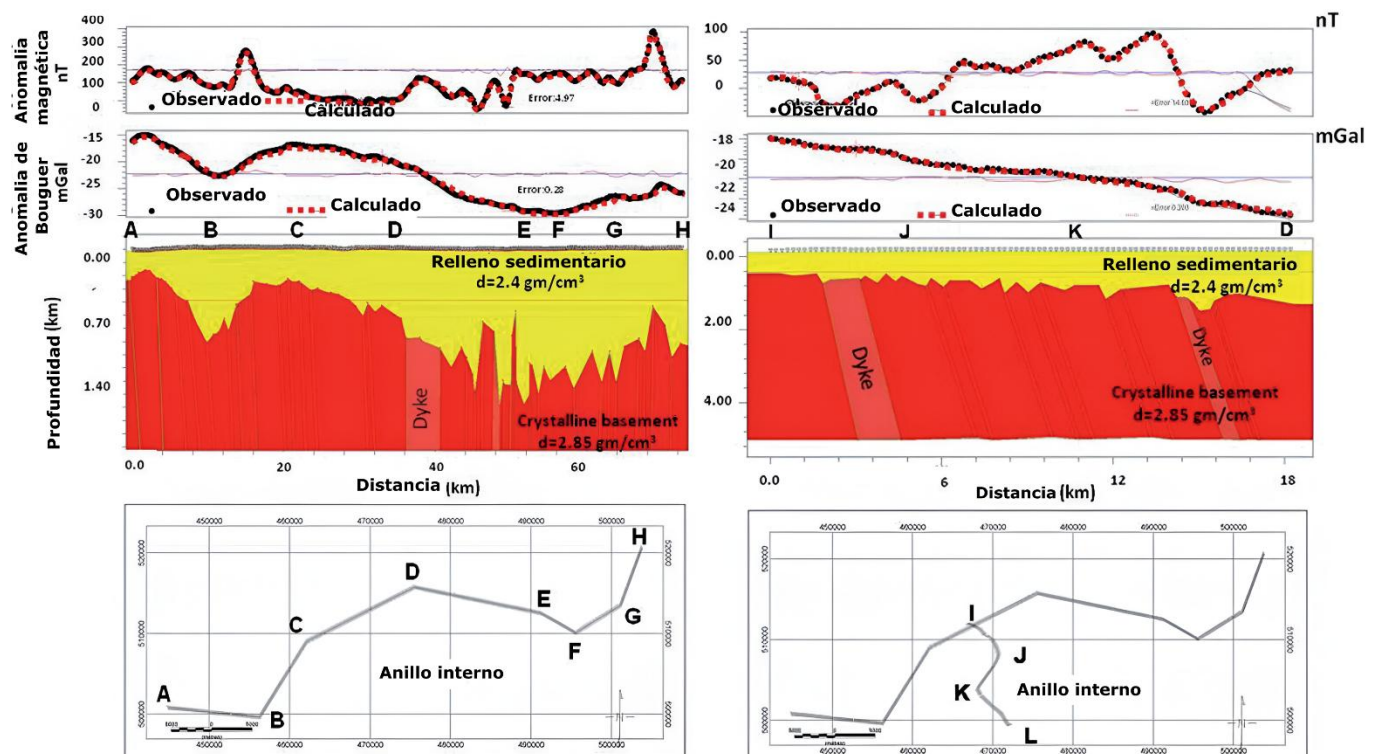
Nota: Mapa de anomalías gravimétricas, incluyendo efectos de gravedad del terreno compensados (CTGE por sus siglas en ingles) tomado de Hernandez et al. (2009). Datos adquiridos mediante aerogravimetría. La línea negra punteada corresponde al área del posible impacto meteórico.

En 2011, Hernández et al. publicaron un nuevo estudio sobre el modelamiento estructural de la estructura de impacto en Vichada, con base en la interpretación de anomalías terrestres de

gravedad y magnetismo. Los autores definieron una cuenca sedimentaria concéntrica, cuyo espesor varía entre 100 a 500 m en los anillos más externos, hasta unos 700 a 1000 m en el centro de la estructura. A partir de las anomalías magnéticas Hernández et al. (2011), infirió la presencia de un basamento precámbrico cristalino intensamente afectado por fallamiento (fallas normales) e intruído por diques mineralizados y/o vetas hidrotermales, lo cual habría generado una serie de bloques tectónicos que buzan hacia el centro de la estructura, configurando una típica estructura de impacto denominada “dominó” (Figura 10). Las fallas normales serían locales y afectarían las unidades litológicas del Cenozoico desde el anillo exterior hasta el centro de la estructura, interpretadas como bordes aterrazados o estructuras de colapso, características que suelen presentarse en el centro de cráteres de impacto.

Figura 10

Anomalías magnéticas 2D de Bouguer y RTP (tomado de Hernández et al., 2011)



Nota: Anomalías magnéticas 2D de Bouguer y de campo total reducidas al polo (RTP) modeladas inversamente de los perfiles 1 y 2 adquiridos por Hernández et al. (2011). También se presenta la interpretación geológica del subsuelo a partir de las anomalías según los autores (Hernández et al., 2011).

En un trabajo posterior, Hernández y Alexander (2018) abordaron los efectos del impacto del meteorito en Vichada a partir de la simulación de las consecuencias ambientales regionales. Calculando un diámetro y profundidad transitorios del cráter de 31,7 km y 11,2 km, respectivamente, y un diámetro y profundidad finales del cráter de 50 km y 961 m. El volumen del material fundido se estimó en 93,1 km³, de los cuales aproximadamente la mitad permanece en el cráter con un espesor promedio de 118 m. La deformación local, la disrupción de las unidades litológicas y el material eyectado podrían preservarse en un radio de hasta 100 km desde la ubicación del impacto, y en los primeros 50 km desde el probable cráter de impacto, se espera un espesor de material de eyecta de 20 m y fragmentos con un diámetro medio mayor a 1 m. Estos datos permiten delimitar un área para la búsqueda de evidencias geológicas directas.

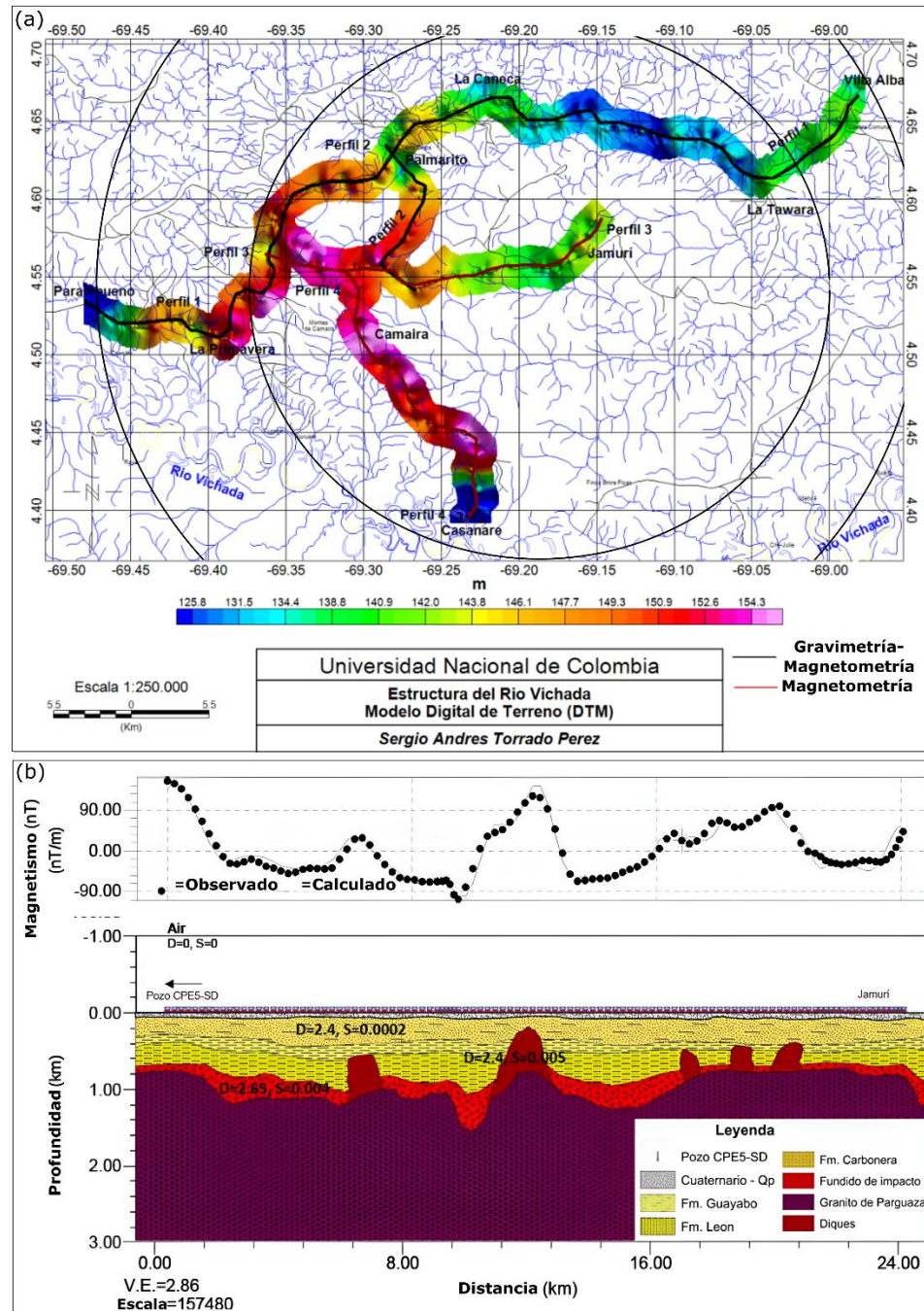
Como último estudio en torno a la estructura del Río Vichada, se encuentra la tesis de maestría de Torrado Pérez (2019). En este trabajo el autor realiza un modelamiento de la estructura a partir de anomalías gravimétricas, magnéticas y de resistividad eléctrica. En su trabajo de campo encontró afloramientos de costras ferruginosas asociadas a la unidad geomorfológica que el denominó montículos (Figura 8), de 4 a 8 m de altura. Estos son bloques dispuestos de manera aleatoria y compuestos de arenitas conglomeráticas, que se manifiestan en patrón radial principalmente en el cuadrante NE del área de estudio, con algunas apariciones esporádicas en el sector NW y en menor proporción en la zona sur. Además, encontró una serie de cárcavas de

aproximadamente 1 m de profundidad, de las cuales el trazado de sus tendencias apunta hacia un mismo sitio, indicando que se generaron por una fuente común. Esta es un área de 3 km de diámetro con coordenadas $4^{\circ} 34' 12''$ N, $69^{\circ} 10' 26.4''$ W, y se estima como el sector de impacto (zona de intercepción), esta zona fue desplazada 7 km al NW de la propuesta por el investigador Rocca. A partir de estos resultados, el autor Torrado Pérez (2019) interpretó una dirección de caída del posible meteorito de SW-NE, esto debido a que hacia el sur hay menor expresión morfológica, indicando que la fuerza de empuje de material producida por el impacto estaba orientada hacia el NE, impulsando la mayor cantidad de material en esta misma dirección.

La información geofísica adquirida por Torrado Pérez (2019) (Figura 11) coincide con los estudios previos mencionados anteriormente, anomalías gravimétricas positivas que sugirieron un basamento deformado y paleoaltos que coinciden con los anillos de la estructura, mientras que anomalías gravimétricas negativas, se asocian a una cuenca concéntrica cuyo espesor es de 400 m en el anillo externo, hasta 1.4 km en las zonas más profundas. Los datos magnéticos corroboran estas anomalías, indicando según el autor, un fundido de impacto acumulado en los anillos y en gran parte del área y comprueba la presencia de un levantamiento de pico central de aprox. 6 km de diámetro (Figura 11). Los valores de resistividad se presentan en un rango entre los 1000 y 12000 ohm.m, el cual no se ajusta a lo esperado para una cuenca sedimentaria. Esta interpretación geoeléctrica fue basada en las litologías reportadas en el pozo CPE-5 SD, mostrando la forma cóncava del cráter, relleno por sedimentos eólicos, aluviales, fluviales y de movimientos en masa. Por último, Torrado Pérez (2019) propone anillos internos y externos, a 20 y 35 km de radio respectivamente, proponiendo un nuevo tamaño real de la estructura de 70 km de diámetro; con un levantamiento de pico central de 6-8 km de diámetro.

Figura 11

Modelo digital de terreno y trazado de los perfiles de gravimetría y magnetometría (tomado de Torrado Pérez, 2019)



Nota: (a) ubicación de perfiles de gravimetría y magnetometría adquiridos por Torrado Pérez (2019) dentro del área de estudio de este trabajo. Los círculos negros representan los anillos de la posible estructura de impacto. (b) Modelo magnético 2D y modelo geológico del subsuelo según modelo magnético para el perfil 3, realizado por Torrado Pérez (2019). El perfil 3 se encuentra intersectando en dirección W-E la posible estructura de impacto.

5.1.2. Modelo conceptual inicial de la posible cuenca cratérica.

A partir de la síntesis de las evidencias recopiladas en el anterior apartado resumidas en la Tabla 2, se realiza la integración de los modelos propuestos por los distintos autores mencionados, los cuales fueron creados a partir de evidencias que surgieron de sus estudios directos e indirectos, y que respaldan una hipótesis que creen ser la más asertiva para explicar las anomalías observadas en la estructura del Río Vichada. Se recalca que el modelo es esquemático y no mantiene una escala uniforme en profundidad; a partir del segmento en blanco, la escala vertical se reduce para resaltar las unidades más profundas.

Con base en la integración de la información, se realizaron modelos gráficos teórico-hipotéticos de la evolución de la estructura de impacto. El modelo conceptual inicial se observa en la Figura 12, construido mediante una hipótesis que considera el impacto meteórico en el área de estudio, modelando así una cuenca cratérica y representando tres etapas en la evolución del cráter de impacto: pre-impacto, impacto y post-impacto.

Teniendo en cuenta que el área de estudio corresponde a una llanura sin rasgos geomorfológicos o estructuras superficiales relevantes, y considerando la información disponible del subsuelo, se infiere que en la etapa pre-impacto (Figura 12 (a)), las unidades geológicas presentaban una configuración predominantemente horizontal, las cuales habrían constituido el

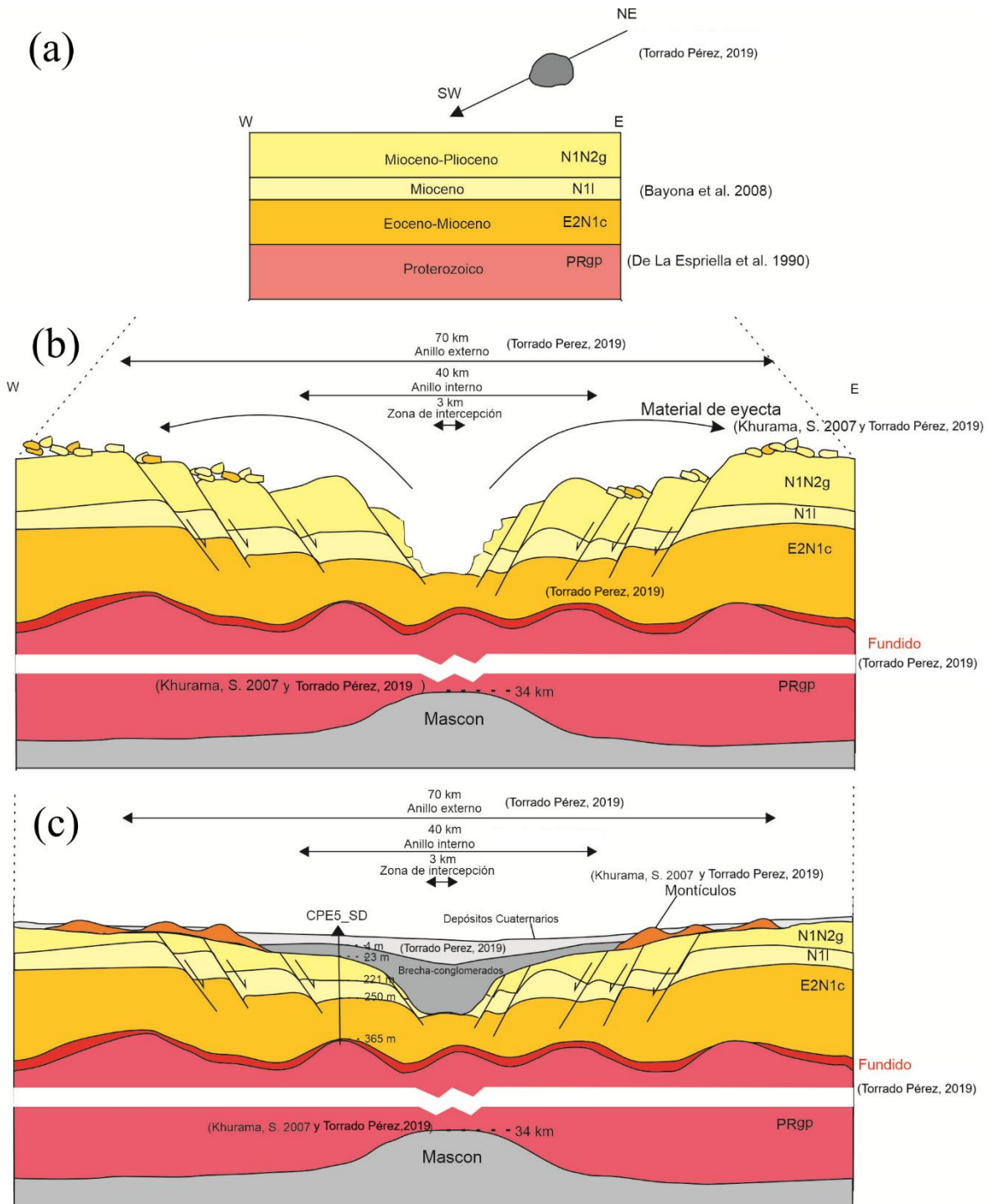
objetivo del impacto. Luego, durante la etapa de impacto (Figura 12 (b)), las unidades geológicas del subsuelo habrían sido removidas, fracturadas o incluso fundidas, mientras que parte del material se expulsó en forma de eyecta. La propagación de ondas de choque habría provocado un rebote elástico del basamento, lo que llevó a la creación de paleoaltos y a su fracturamiento. En esta etapa también se habría formado la concentración de masa (Mascón) como una acumulación de material del manto en la corteza terrestre, junto con una capa de material fundido.

Por último, en la etapa post-impacto (Figura 12 (c)), parte de este material eyectado cae sobre la cuenca generada, junto con el material proveniente del colapso de las paredes del cráter, dando origen a depósitos de brechas y conglomerados. El material eyectado se consolida en montículos en distribución radial y, posteriormente son depositados sedimentos del Cuaternario. Este modelo siendo especialmente relevante para la preservación de los sedimentos, los cuales adquieren un valor significativo como registros paleoclimáticos de la región.

Al contrastar las profundidades finales propuestas por los autores mencionados y recopiladas en la Tabla 2, con los datos del pozo CPE5-SD, ubicado cerca de la cuenca central del posible cráter, se evidenció una discrepancia significativa. Mientras que los modelos previos planteaban valores cercanos o mayores a 1 km de profundidad máxima para la cuenca, en el área central, la información del pozo registraba una posición mucho más somera para el basamento (Granito de Parguaza), en 365 m. Esta diferencia llevó a reconsiderar las dimensiones inicialmente propuestas y, en consecuencia, a elaborar un modelo de cuenca cratérica con menor profundidad máxima, ajustado a la evidencia proporcionada por los datos de pozo.

Figura 12

Esquema conceptual inicial de la evolución de la posible cuenca cratérica del Río Vichada



Nota. Elaborado a partir de la síntesis de modelos previos e información geológica de superficie y del subsuelo, y el pozo CPE5-SD. Se representan las etapas (a) pre-impacto, (b) impacto y (c) post-impacto. N1N2g: Fm. Guayabo; N1l: Fm. León; E2N1c: Fm. Carbonera; PRpg: Granito de Parguaza. El modelo no mantiene una escala uniforme en profundidad.

5.1.3. Análisis y revisión de ripios de pozo.

Adicionalmente, se realizó un análisis y revisión macroscópica de ripios de tres pozos estratigráficos adquiridos por la empresa BHP *Billinton Petroleum* en el departamento del Vichada, en una campaña de perforación estratigráfica en 2011 y proporcionados por el Banco de Información Petrolera (BIP) a través del Servicio Geológico Colombiano. El objetivo de esta revisión era encontrar evidencias físicas de impacto meteórico en el área de estudio como tectitas, conos estriados de choque, fundidos y minerales de alta presión (French, B., 1998b). Los ripios analizados pertenecían a los pozos más cercanos a la estructura del Río Vichada CPE-5 SC, CPE-5 SD y CPE-5 SE, presentados en la Figura 8. Una descripción más detallada de la localización y su relación con la información sísmica se presenta en el siguiente apartado.

Los ripios de pozo presentan profundidades entre 378.8 y 479.9 m. El pozo CPE-5 SC alcanzó la mayor profundidad, con 479.9 m y un total de 78 intervalos analizados, lo que corresponde a 472.1 m caracterizados. El pozo CPE-5 SE registró una profundidad de 432.8 m, con 70 intervalos, para un total de 426.72 m caracterizados. Finalmente, el pozo CPE-5 SD presentó la menor profundidad, con 378.8 m, donde se caracterizaron 61 intervalos, correspondientes a 366.6 m.

La caracterización litológica de los ripios reveló una secuencia sedimentaria compuesta por alternancias de niveles predominantemente arenosos y arcillosos, con intercalaciones locales de capas limosas y delgadas capas carbonosas. Las arenas mostraron un alto grado de madurez textural, mientras que en la base del pozo CPE-5 SC se reconoció un aporte de rocas ígneas intrusivas félsicas, en correlación con el Granito de Parguaza. Asimismo, en los niveles basales de los pozos se observó un notable contenido calcáreo, principalmente en forma de glauconita, lo que sugiere condiciones de sedimentación en un ambiente marino transicional o de plataforma continental. La distribución de materiales y variaciones mineralógicas apunta a un predominio de ambientes marinos transicionales en profundidad, con un gradiente hacia condiciones continentales en los niveles superiores, evidenciado por la abundancia de óxidos de hierro. Estas

litologías se asociaron a las formaciones sedimentarias Guayabo, León y Carbonera, y al basamento correspondiente al Granito de Parguaza. A partir de esta información se elaboraron las columnas estratigráficas, las cuales se presentan en los apéndices A, B y C. Adicionalmente, se incluye una descripción litológica de los ripios por intervalo para cada pozo en los Apéndices D, E y F.

Cabe resaltar que los ripios de pozo presentan un desfase en la profundidad, inherente a su forma de obtención durante la perforación, por lo que la caracterización resultante constituye una aproximación. Finalmente, en cuanto al objetivo principal de la revisión, no se identificaron evidencias físicas de impacto en los materiales analizados.

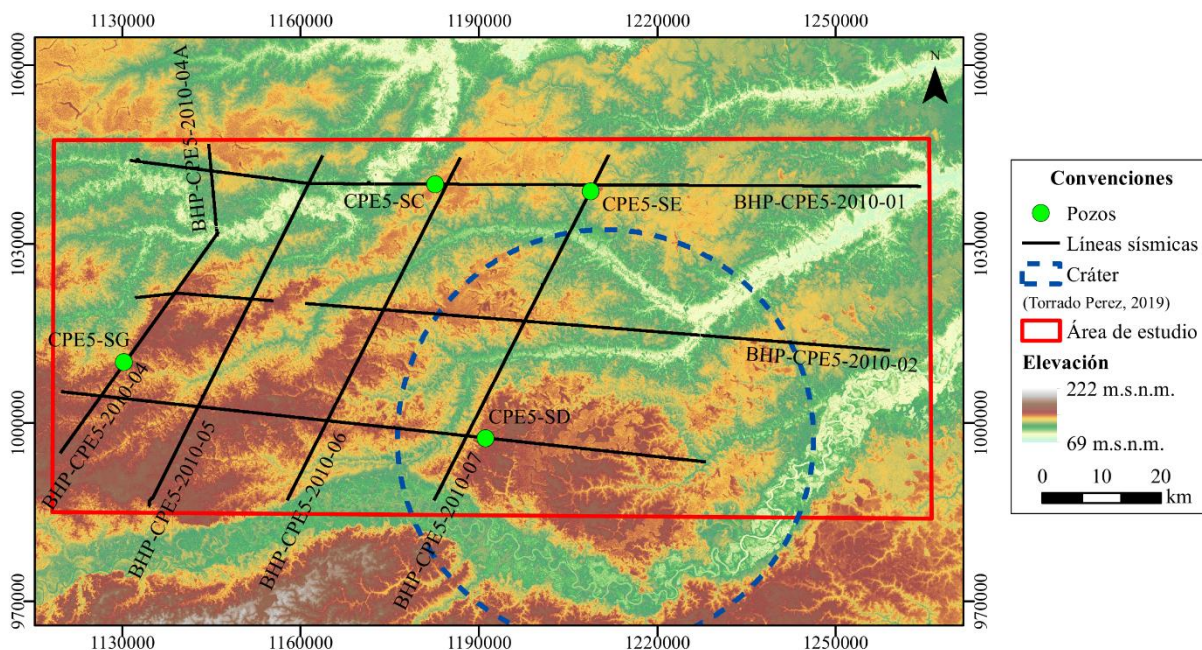
5.2 Interpretación de las secciones sísmicas procesadas en el dominio de la profundidad y correlacionadas con los datos de pozo.

5.2.1. Análisis de la información sísmica y de pozo suministrada por el BIP.

El análisis de la información sísmica y de pozo suministrada representa una base fundamental para el desarrollo y la implementación de la metodología planteada en este trabajo. Para esto se realizó la descarga, visualización, revisión e inventariado de la información, estableciendo a través de este, los alcances del proyecto con base al estado de dicha información. La información es proporcionada por el Banco de Información Petrolera (BIP) a través del Servicio Geológico Colombiano, y corresponde a ocho líneas sísmicas terrestres de reflexión 2D: BHP-CPE5-2010-01, BHP-CPE5-2010-02, BHP-CPE5-2010-03, BHP-CPE5-2010-04A, BHP-CPE5-2010-04, BHP-CPE5-2010-05, BHP-CPE5-2010-06, BHP-CPE5-2010-07; y cuatro pozos (registros, informes y el acceso a los ripios de los pozos SC, SD y SE): CPE-5 SC, CPE-5 SD, CPE-5 SE y CPE-5 SG.

Figura 13

Mapa de la distribución espacial de la información sísmica y de pozo suministrada por el BIP



Nota. La información del BIP se encuentra en el sistema de coordenadas proyectadas para Colombia MAGNA-SIRGAS/ Colombia East Central Zone EPSG:3117.

Para el desarrollo de este trabajo se cuenta con la información de ocho líneas sísmicas terrestres de reflexión 2D en el dominio del tiempo, adquiridas en la campaña sísmica del 2010-2011 realizada por la empresa BHP Billiton Petroleum dentro del Bloque Colombia CPE 5, en el departamento del Vichada (BHP Billiton Petroleum, 2011). El procesamiento de las líneas sísmicas de esta campaña fue adjudicado a las empresas Geokinetics y Lumina, siendo proporcionados productos de ambas empresas. En la Tabla 3 se presenta el inventario realizado para las ocho secciones sísmicas 2D de reflexión del BIP. Los productos del procesamiento por la empresa Lumina corresponden a los archivos de geometría, secciones migradas de cada línea

sísmica, además de modelos de velocidad RMS para las líneas BHP-CPE5-2010-01 y BHP-CPE5-2010-03. Por otra parte, los productos de la empresa Geokinetics corresponden solo a los modelos de velocidad RMS e interválica para las mismas líneas BHP-CPE5-2010-01 y BHP-CPE5-2010-03.

Tabla 3

Inventario de la información sísmica suministrada por el BIP

Línea	Información	Descripción	Dominio
BHP-CPE5-2010-01 Lumina Geokinetics	Archivos de geometría	No. Trazas: 26646	Tiempo
	Post-stack	No. CDP's: 26646	
	Pre-stack	Tasa de muestreo (ms): 2	
	Velocidades inter.	No. Muestras por traza: 1501	
	Velocidades RMS	Longitud total (km): 133.40	
BHP-CPE5-2010-02 Lumina	Archivos de geometría	No. Trazas: 24410	Tiempo
	Post-stack	No. CDP's: 25468	
	Pre-stack	Tasa de muestreo (ms): 2	
		No. Muestras por traza: 1501	
BHP-CPE5-2010-03 Lumina Geokinetics	Archivos de geometría	Longitud total (km): 98.8	Tiempo
	Post-stack	No. Trazas: 21813	
	Pre-stack	No. CDP's: 21812	
	Velocidades inter.	Tasa de muestreo (ms): 2	
	Velocidades RMS	No. Muestras por traza: 1501	
BHP-CPE5-2010-04 Lumina	Archivos de geometría	Longitud total (km): 77.8	Tiempo
	Post-stack	No. Trazas: 9124	
	Pre-stack	No. CDP's: 9123	
		Tasa de muestreo (ms): 2	
		No. Muestras por traza: 1501	
BHP-CPE5-2010-04A Lumina	Archivos de geometría	Longitud total (km): 45.6	Tiempo
	Post-stack	No. Trazas: 3120	
	Pre-stack	No. CDP's: 3119	
		Tasa de muestreo (ms): 2	
BHP-CPE5-2010-05 Lumina	Archivos de geometría	No. Muestras por traza: 1501	Tiempo
	Post-stack	Longitud total (km): 15.5	
	Pre-stack	No. Trazas: 13150	
		No. CDP's: 13149	
		Tasa de muestreo (ms): 2	
BHP-CPE5-2010-06 Lumina	Archivos de geometría	No. Muestras por traza: 1501	Tiempo
	Post-stack	Longitud total (km): 66.4	
	Pre-stack	No. Trazas: 12894	
		No. CDP's: 12893	
		Tasa de muestreo (ms): 2	
BHP-CPE5-2010-07 Lumina	Archivos de geometría	No. Muestras por traza: 1501	Tiempo
	Post-stack	Longitud total (km): 64.52	
	Pre-stack	No. Trazas: 12990	
		No. CDP's: 12989	
		Tasa de muestreo (ms): 2	

No. Muestras por traza: 1501

Longitud total (km): 65

Nota. La información se encuentra en archivo tipo SEG-Y.

También se dispone de la información de cuatro pozos, los cuales fueron adquiridos por la empresa *BHP Billiton Petroleum* en una campaña de perforación estratigráfica en 2011. El objetivo principal de la campaña de perforación fue penetrar toda la sección sedimentaria hasta el basamento cristalino y recopilar datos geofísicos, geoquímicos, bioestratigráficos y petrofísicos (BHP Billiton Petroleum, 2012). Los pozos registran profundidades entre 378 a 550 metros, estos cuentan con registros geofísicos (Check shot, gamma ray, concentraciones de uranio, torio, y potasio, potencial espontáneo, porosidad de neutrones térmicos y resistividad), además de informes técnicos en los que se encuentra información relevante sobre la profundidad de las formaciones geológicas en el subsuelo (marcadores de formación), inferidas mediante los registros de pozo y la interpretación preliminar de los ripsos de perforación.

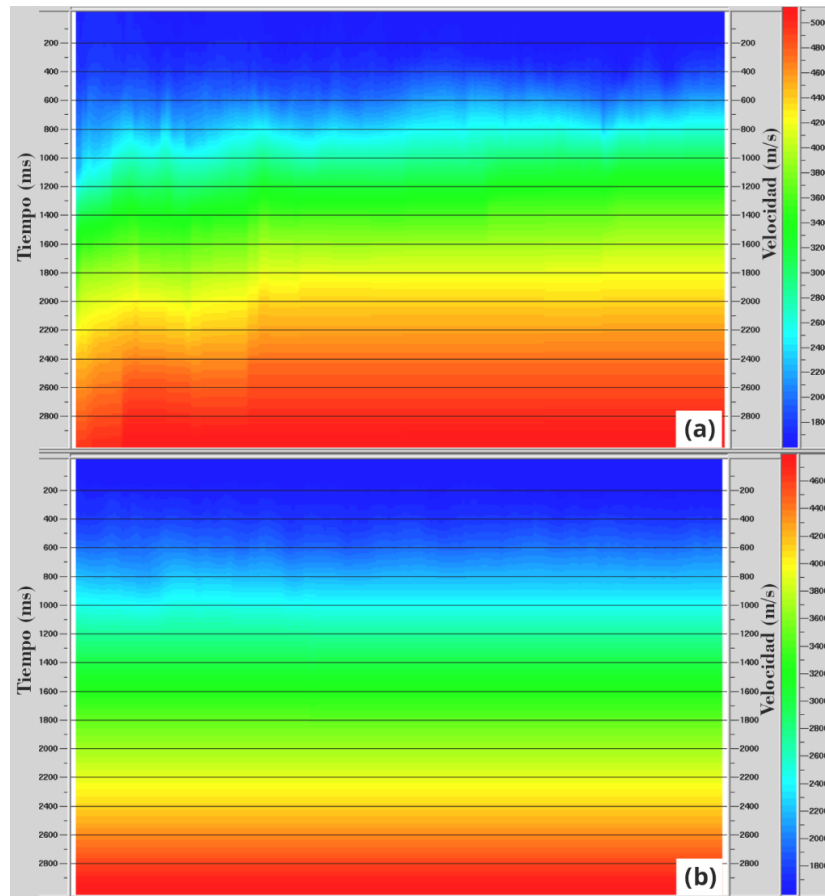
Seguido de la descripción e inventariado de la información, se realiza la selección entre las líneas sísmicas procesadas. Como se indica en la Tabla 3, se proporcionan líneas sísmicas con migración en tiempo post-stack y pre-stack, productos del procesamiento desarrollado por la empresa Lumina. El proceso de migrado pretende aumentar la resolución espacial, reposicionando las reflexiones con inclinación a sus posiciones reales en el subsuelo y colapsando las difracciones que suelen ser un factor de ruido (Yilmaz, 2001). Las líneas sísmicas suministradas que nos permiten la mejor visualización de los eventos sísmicos corresponden a las líneas sísmicas con migración pre-stack. Debido a esto, el desarrollo de este trabajo se realizó con la información de las secciones sísmicas con migración pre-stack.

5.2.2. Conversión tiempo a profundidad de las secciones sísmicas.

La conversión de tiempo a profundidad se realiza con el objetivo de eliminar y revelar las estructuras generadas durante la adquisición y el procesamiento de datos sísmicos en el dominio del tiempo. Esto permite obtener imágenes sísmicas que representan con mayor fidelidad la realidad del subsuelo y facilitan una interpretación más precisa (Herron, 2011). La conversión se calibra utilizando los marcadores de formación registrados en los pozos, lo que valida la calidad del proceso. Este procesamiento se realiza en el software ProMax, para cada una de las secciones sísmicas, aplicando el algoritmo de estiramiento vertical, que utiliza velocidades de intervalo que se consideran representativas de la velocidad real de las ondas sísmicas y se definen como la velocidad de propagación promedio dentro de un intervalo unitario (Al-Chalabi, 2014). Las velocidades de intervalo se derivan de las velocidades RMS mediante el método de estimación de gradiente suavizado, que permite generar una función de velocidad de intervalo que varía suave y continuamente, sin presentar cambios bruscos repentinos (Landmark Graphics Corporation, 2004). El algoritmo de conversión se seleccionó a partir de un análisis de aspectos técnicos relacionados a los insumos y aspectos geológicos que indican una baja complejidad en la configuración geológica del subsuelo y, por lo tanto, sus modelos de velocidad no presentan cambios laterales significativos (como se observa en la Figura 14), un fenómeno que sí se esperaría en presencia de una estructura de impacto. Esto condujo a la elección del algoritmo de estiramiento vertical, adecuado para casos de baja complejidad geológica y que utiliza únicamente velocidades RMS (Yilmaz, 2001).

Figura 14

Modelos de velocidad RMS para las líneas BHP-CPE5-2010-01 y BHP-CPE5-2010-03



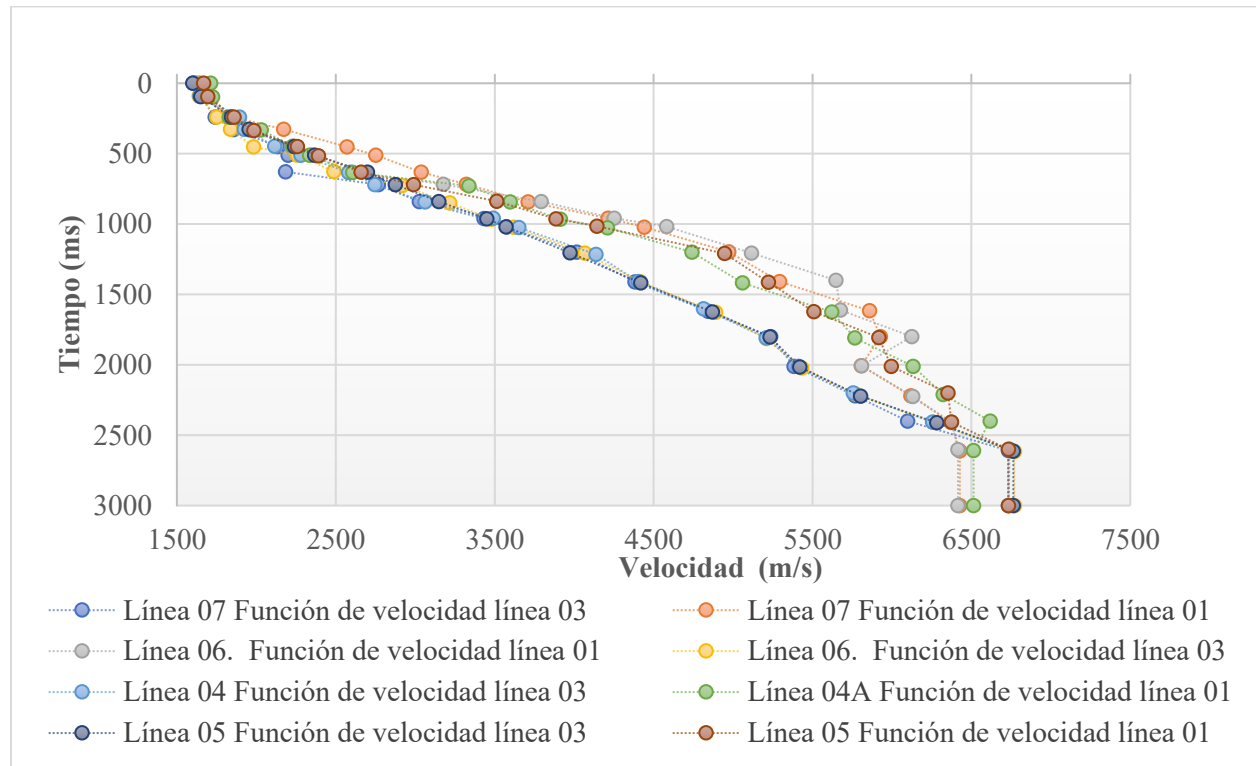
Nota. (a) BHP-CPE5-2010-01 y (b) BHP-CPE5-2010-03. Visualización en el software ProMax.

No se evidencian cambios laterales abruptos de velocidad en las capas del subsuelo, indicando una configuración simple.

Durante el cálculo de las velocidades de intervalo, en las secciones sin modelo de velocidad RMS, se construyó una función de velocidad de intervalo para cada traza donde las secciones sin modelo se intersectaban con las que sí lo tenían. Estas funciones se basaron en un muestreo puntual en los modelos de velocidad interválica, del cual se extrajeron los valores de tiempo y velocidad (Figura 15).

Figura 15

Funciones de velocidad intervállica



Nota. Las funciones de velocidad intervállica para cada línea sísmica se calcularon a partir de puntos de muestreo en los modelos de velocidad intervállica ya calculados en el software para las líneas 01 y 03.

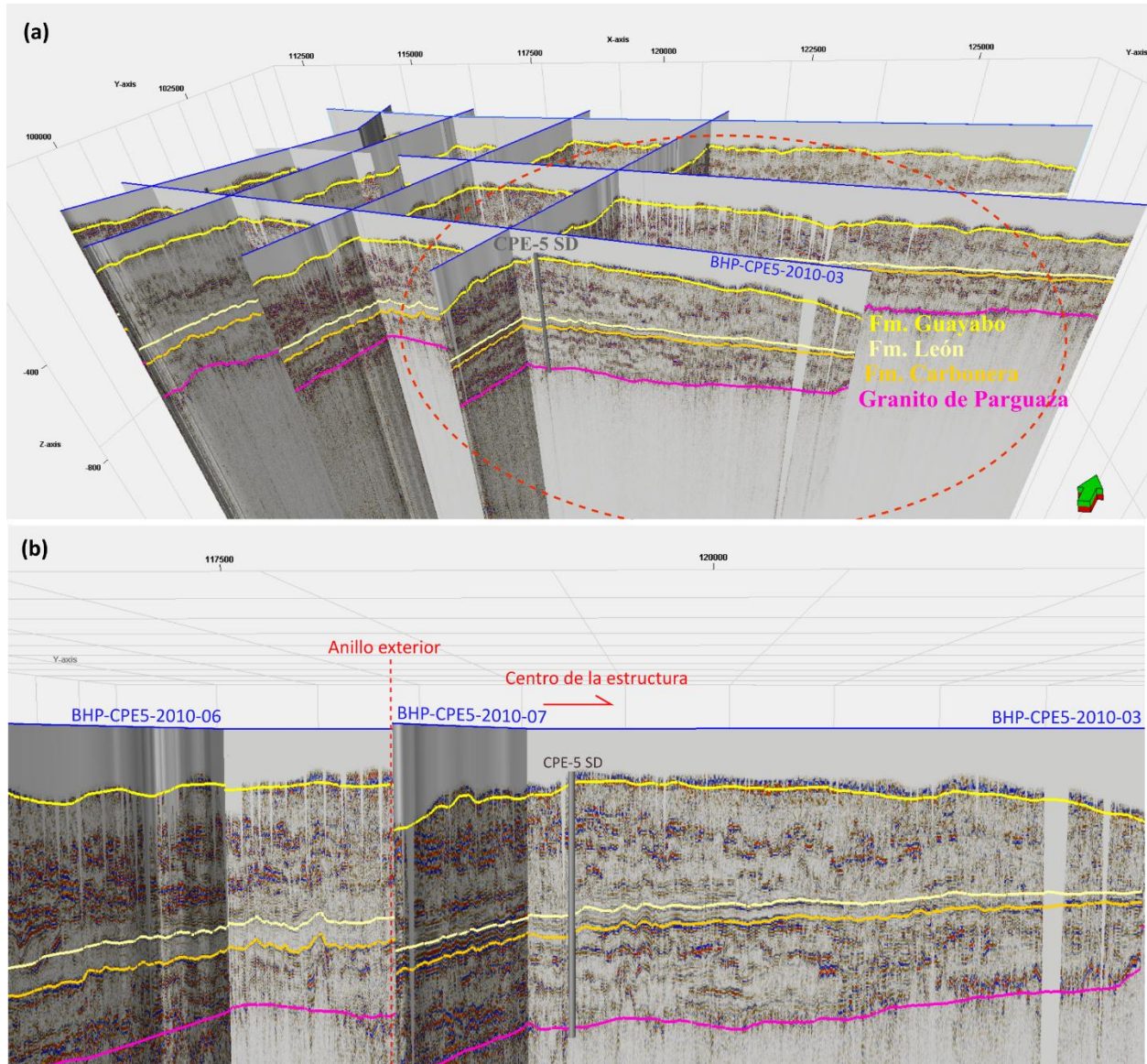
El software ProMax permite ingresar varias funciones de velocidad al momento de realizar la conversión tiempo a profundidad, asegurando un mejor ajuste. El método de estiramiento vertical se basa en pares tiempo-velocidad y hace una conversión interna al formato VAT (“Average Velocity in Time”) (Landmark Graphics Corporation, 2004). Este procedimiento resultó ser eficaz, logrando una conversión correcta, validada mediante la correlación con los marcadores de formación registrados en los pozos. En las secciones sísmicas que se intersectan con pozos, se emplearon los topes de formación como puntos de control adicionales, lo que

permitió realizar una calibración manual y asegurar la coincidencia entre las secciones convertidas y la información de pozo. Los resultados obtenidos en esta fase constituyen una base sólida y altamente confiable para avanzar hacia las siguientes etapas.

5.2.3. Interpretación de las secciones sísmicas en profundidad correlacionadas con la información de pozo.

La correlación de la información sísmica y de pozo, además de validar los resultados de la conversión tiempo a profundidad, nos garantiza una interpretación más robusta al integrar los dos tipos de datos. Las secciones sísmicas en profundidad fueron cargadas en el software OpendTect junto con los marcadores de formación, interpretados en los informes a partir de los registros de pozo y relacionados a las formaciones sedimentarias Guayabo, León, Carbonera y el basamento cristalino (Granito de Parguaza). El objetivo de la interpretación fue identificar reflectores guía, los cuales evidenciaran un cambio significativo en la impedancia indicado así un cambio en las propiedades de la roca en el subsuelo, y que además se ajustaran en profundidad con los marcadores de formación.

Las líneas sísmicas interpretadas corresponden a una polaridad europea, donde los picos representan coeficientes de reflexión positivos producidos por incrementos en la impedancia acústica (BHP Billiton Petroleum, 2011). Siguiendo la continuidad de estos reflectores guía se trazaron los topes de las unidades geológicas en cada sección sísmica, identificando así las formaciones Guayabo, León, Carbonera y el Granito de Parguaza, misma configuración del subsuelo que se establece en la información de pozo y geológica del área (Figura 16).

Figura 16*Secciones sísmicas interpretadas en el dominio de la profundidad*

Nota. (a) La figura muestra la configuración espacial interpretada de los topes de las unidades geológicas del subsuelo en el área de estudio. (b) Zoom sobre la línea BHP-CPE5-2010-03 que pasa por el centro de la estructura. Las coordenadas del proyecto se encuentran reescaladas en un factor de 10.

Se interpretaron en total alrededor de 560 km de información sísmica con profundidad máxima de registro de 1 km y resolución vertical de 9.51 m. A partir de la relación entre escala vertical y horizontal, se define una configuración relativamente horizontal para las unidades geológicas en el subsuelo, sin cambios abruptos o estructuras relevantes que se evidenciaran en el momento de la interpretación (Figura 16 (b)).

5.3 Generación de un modelo geológico 3D integrando datos de secciones sísmicas interpretadas, utilizando una biblioteca de código abierto basada en Python.

5.3.1. Recolección de los datos de entrada para el modelamiento geológico 3D.

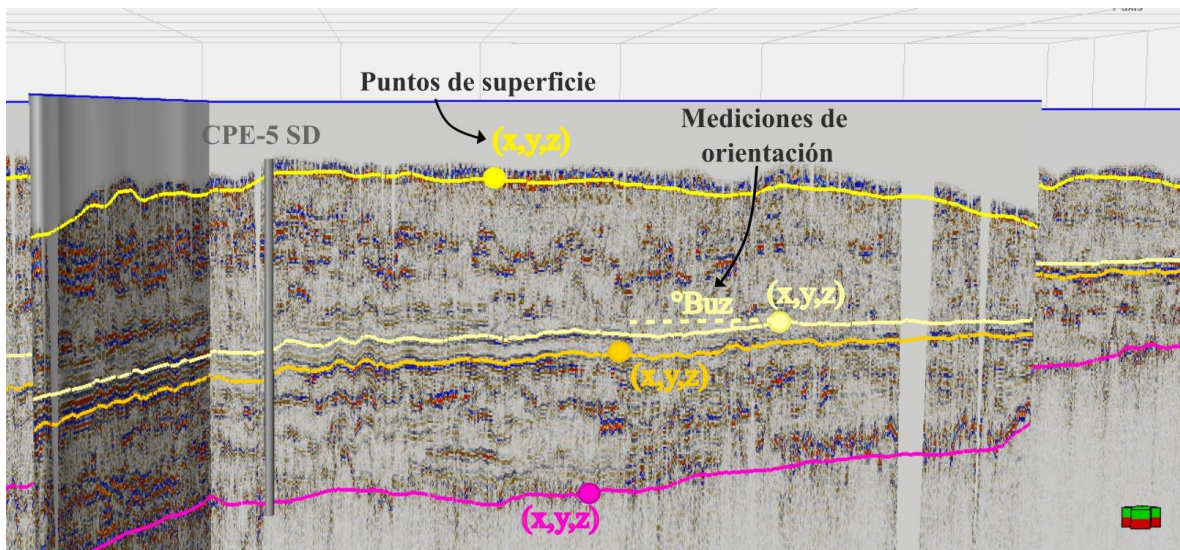
Los reflectores interpretados y debidamente trazados representan los toques de las unidades geológicas del subsuelo. Estos toques al ser representados en un entorno 3D, definen las superficies de dichas unidades. A partir de cada reflector trazado, se extrajeron “puntos de superficie” con la información de posición en coordenadas X, Y, y la profundidad Z. Adicionalmente, el método de interpolación de campos potenciales utilizado en el modelado geológico 3D, implementa un enfoque que incorpora, además de los puntos de superficie geológica (posición) utilizados en los algoritmos de interpolación tradicionales, “vectores polo” que representan la orientación de la capa en puntos específicos. Cada vector polo incluye el grado de inclinación local de la superficie, lo que le otorga un sentido geológico a la interpolación y proporciona restricciones adicionales al proceso (Aug et al., 2005).

La Figura 17 muestra un ejemplo de la extracción de datos de entrada para el modelado geológico 3D a partir de los reflectores sísmicos interpretados. Sobre la sección sísmica se representan los “puntos de superficie” (coordenadas X, Y, Z) y las mediciones de orientación

asociadas a “vectores polo”, que incluyen el ángulo de buzamiento aparente local ($^{\circ}\text{Buz}$). Cada punto de superficie y vector polo se encuentra asociado a una unidad geológica en específico, para el caso de los puntos de superficie, se registran las coordenadas X, Y, Z y la unidad correspondiente; para los vectores polo, se registran las coordenadas X, Y, Z, el ángulo de buzamiento y la unidad geológica a la que pertenecen.

Figura 17

Representación esquemática de la extracción de los datos de entrada para el modelado geológico 3D a partir de una sección sísmica interpretada



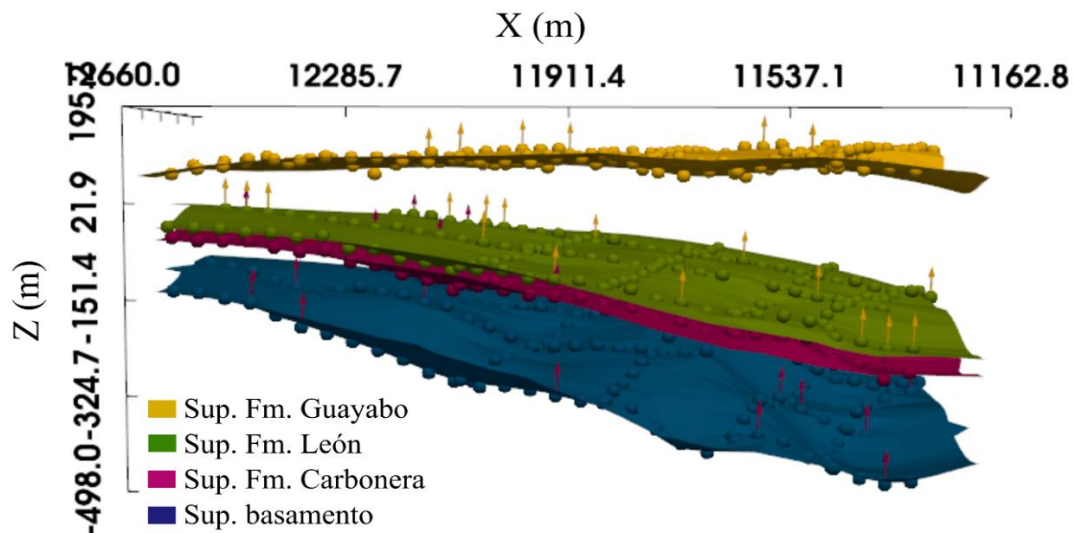
5.3.2. Modelamiento geológico 3D.

Para el modelamiento geológico 3D no existe en la literatura un número definido de puntos de superficie o vectores polo a utilizar; lo que podemos intuir es que mayor cantidad de información contribuye a obtener modelos más asertivos. La cantidad de datos empleados dependerá de la disponibilidad de insumos, la extensión del dominio de modelamiento y la complejidad del subsuelo (Calcagno et al., 2008). Se recomienda iniciar con un número reducido

de puntos y aumentarlo progresivamente, evaluando que los resultados tengan una coherencia geológica. En este caso en particular, el subsuelo presenta una configuración simple, de acuerdo con las observaciones en superficie y los estudios geológicos realizados por distintos autores anteriormente. El dominio de modelamiento abarca 9200 km², para el cual se emplearon 643 puntos de superficie distribuidos de la siguiente manera: 150 para la Fm. Guayabo, 168 para la Fm. León, 164 para la Fm. Carbonera y 161 para el basamento. Adicionalmente, se utilizaron 77 vectores polo en total: 26 para el basamento, 25 para la Fm. Carbonera, 34 para la Fm. León, y únicamente 6 para la Fm. Guayabo, dado que esta última es prácticamente horizontal y presentó menor complejidad. En contraste, las superficies de las Fm. León y Carbonera se encontraban muy próximas debido al escaso espesor de la Fm. León, lo que requirió el uso de un mayor número de vectores polo con el fin de preservar la tendencia estructural de las superficies y que no se intersectaran (Figura 18).

Figura 18

Visualización 3D de las superficies/interfaces geológicas generadas mediante el algoritmo de interpolación de campos potenciales en GemPy



Nota. Los puntos representan los puntos de superficie y las flechas los vectores polos que brindan información de la orientación de la superficie. Las coordenadas se encuentran reescaladas en un factor de 100.

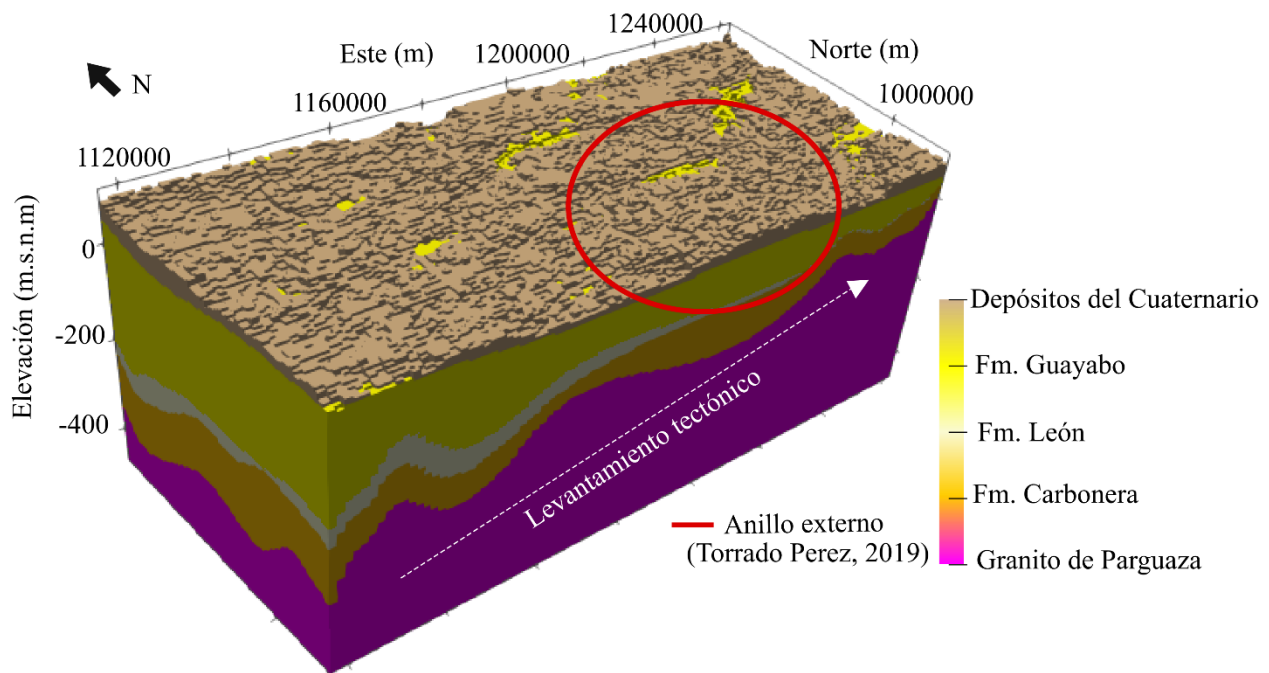
El modelo 3D se construyó en GemPy a partir de la ubicación de los puntos de superficie y de los datos estructurales que definen la orientación de las superficies/interfaces entre formaciones. Ambos conjuntos de datos se integraron mediante cokriging para interpolar una función escalar continua del campo potencial 3D, que describe la geometría del subsuelo: la posición de los contactos define los isovalores de referencia, mientras que los datos de orientación corresponden a los gradientes de la función escalar (Aug et al., 2005). El modelo cubre una extensión de $151 \text{ km} \times 65 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, con una resolución media de $100 \times 100 \times 100$, lo que da como resultado a 1.000.000 de vóxeles. Se observó que las formaciones sedimentarias presentaron interfaces relativamente planas, con inclinaciones mínimas ($<5^\circ$), mientras que el interfaz del basamento exhibe una morfología más irregular (ondulaciones suaves), aunque con buzamientos igualmente mínimos.

En la Figura 19 se observa el modelo resultante, el cual evidenció un levantamiento tectónico del basamento cristalino (Granito de Parguaza), que redujo el espacio de acomodación y generó un acunamiento hacia el sureste de las formaciones del Cenozoico (Guayabo, León y Carbonera). Este modelo respalda el típico modelo de generación de cuencas de antepaís, donde la carga tectónica de un orógeno, en este caso la Cordillera Oriental, produce subsidencia flexural seguida de levantamiento flexural (Catuneanu, 2004). Por ende, el levantamiento del basamento controla la acomodación y la arquitectura de la depositación. Estos resultados coinciden con estudios gravimétricos y magnetométricos previos que también identifican el levantamiento del

basamento y el acuñamiento de las formaciones en dirección sureste en la Cuenca de los Llanos Orientales (Graterol, 2009).

Figura 19

Modelo geológico 3D del área de estudio



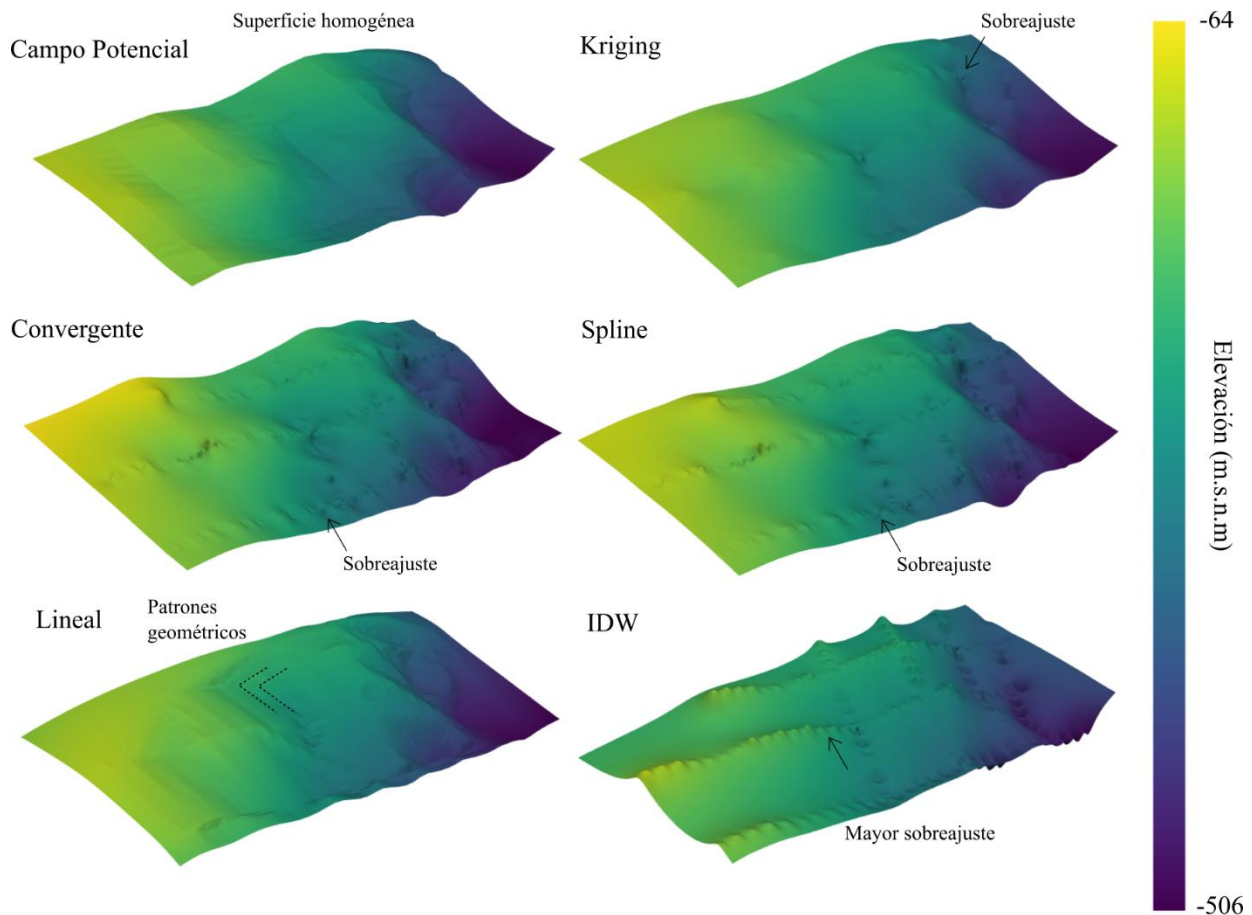
Nota. En la figura se muestra en rojo el anillo externo del cráter propuesto por Torrado Pérez (2019). El modelo presenta una exageración vertical de 60.

Las formaciones sedimentarias evidenciaron una disminución progresiva en su espesor hacia el este, en dirección a la estructura. La Formación Guayabo presenta espesores que varían de 340 m en el oeste a 53 m en el este; la Formación León, de 62 m a 20 m; y la Formación Carbonera, de 235 m a 79 m, respectivamente. Por otra parte, en la zona del posible cráter las formaciones presentan sus menores espesores, con un total de espesor de las formaciones sedimentarias menor a 200 m.

Adicionalmente, se realizó una comparación cualitativa con el objetivo de evaluar el desempeño del algoritmo de interpolación de campo potencial, frente a otros métodos como kriging, convergente, spline, lineal e IDW. Para ello, se comparó una superficie del modelo geológico 3D presentado anteriormente, con las generadas mediante estos algoritmos, utilizando los mismos datos de entrada. En la Figura 20 se observa que el algoritmo de interpolación de campo potencial empleado en este estudio generó una superficie más homogénea sin cambios locales anómalos. En contraste, los otros algoritmos tienden a sobreajustarse a la posición de los datos de entrada, creando estructuras anómalas que van desde picos muy marcados hasta patrones geométricos.

Figura 20

Comparación cualitativa de algoritmos de interpolación en la generación de superficies



5.4 Evaluación de la fiabilidad del modelo mediante un análisis de incertidumbre, incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas.

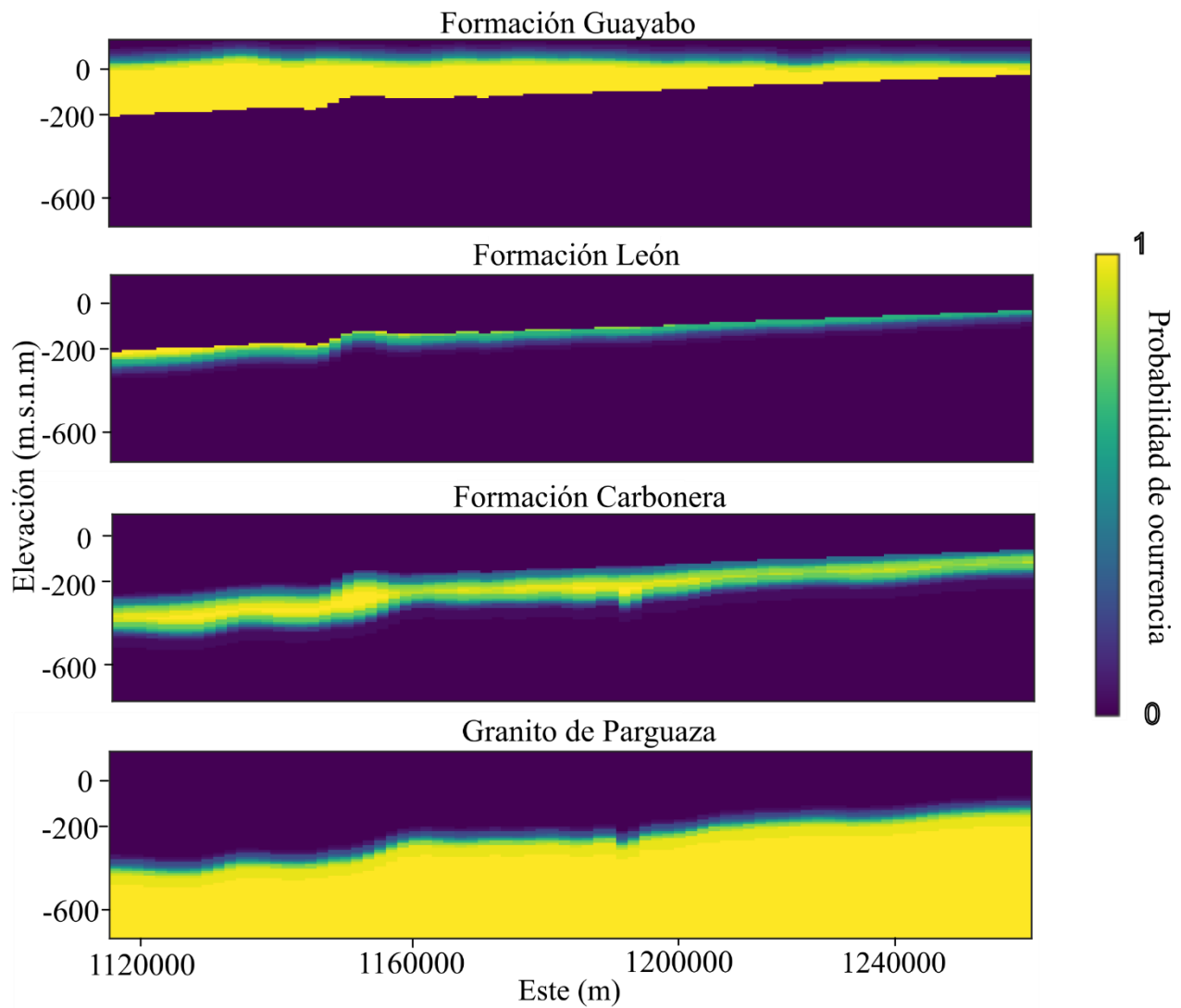
5.4.1. Análisis de incertidumbre del modelo geológico 3D.

Los modelos geológicos en GemPy se generan con una distribución estocástica de litologías dentro de cada vóxel tras múltiples iteraciones del modelo (de la Varga et al., 2018). La probabilidad de encontrar una unidad geológica específica en un vóxel puede calcularse mediante el método de simulación de Monte Carlo para la propagación de la incertidumbre (MCUP). Este método de Monte Carlo bayesiano permite propagar la incertidumbre de los datos iniciales en modelos geológicos 3D, introduciendo variabilidad geológica mediante una distribución normal y perturbando la coordenada Z de los puntos de superficie en cada modelo inicial, lo que genera múltiples modelos estadísticamente válidos (Pakyuz-Charrier et al., 2019).

En la Figura 21 se presenta la evaluación de la fiabilidad del modelo, a partir de secciones 2D de probabilidad de ocurrencia para cada unidad geológica en el modelo geológico 3D generado del área de estudio. Los resultados de la simulación de Monte Carlo muestran que las formaciones sedimentarias (Guayabo, León y Carbonera) y el basamento (Granito de Parguaza) presentan probabilidades altas de ocurrencia en las zonas de mayor continuidad lateral. La mayor incertidumbre se concentra en la ubicación de las superficies/interfaces geológicas, mostrando transiciones graduales. Estos resultados evidencian que el modelo geológico 3D reproduce las geometrías esperadas para las unidades del subsuelo, sin presentar anomalías o incoherencias geológicas.

Figura 21

Visualización de secciones de probabilidad de ocurrencia para las unidades geológicas en el modelo geológico 3D



Nota. Se asigna 1 a la mayor probabilidad de ocurrencia de la capa y 0 a la menor probabilidad.

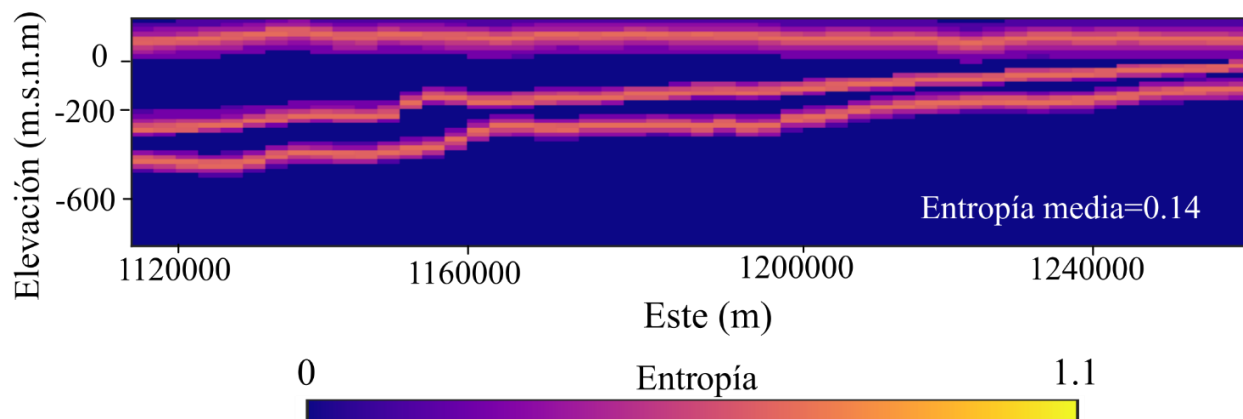
La visualización tiene una relación de aspecto de 3:1.

5.4.2. Cuantificación de la incertidumbre del modelo geológico 3D.

La simulación de Monte Carlo realizada anteriormente evidenció que la mayor variabilidad se concentra en las superficies/interfaces definidas. Sin embargo, se visualiza una geometría estable de las unidades geológicas, manteniendo formas consistentes y coherentes geológicamente en todo el dominio. La cuantificación de esta incertidumbre o variabilidad se obtiene de la entropía de Shannon (Figura 22), la cual cuantificó una entropía media de 0.146 y una entropía máxima de 0.769 para el modelo geológico 3D del área de estudio. La baja entropía media refleja que el modelo presenta un bajo nivel de incertidumbre y una alta coherencia interna. La entropía máxima se asocia a las interfaces de contacto, lo cual confirma que la mayor variabilidad del modelo está localizada en los límites entre formaciones sedimentarias (Guayabo, León, Carbonera) y el basamento (Granito de Parguaza).

Figura 22

Visualización de sección 2D de la entropía de Shannon para el modelo geológico 3D



Nota. La visualización tiene una relación de aspecto de 3:1.

6 Conclusiones

1. Al analizar de manera crítica los estudios geológicos y geofísicos realizados en el área de estudio y compararlos con los criterios diagnósticos establecidos para cráteres de impacto, no se identifican elementos concluyentes que respalden de manera definitiva dicho modelo. Asimismo, la revisión de los ripios provenientes de los pozos estratigráficos perforados en el área no evidenció la presencia de indicadores físicos de impacto macroscópicos.

2. Con base en la interpretación de los insumos aportados por el BIP, los cuales correspondieron a 560 km de información sísmica 2D, con registro de eventos significativos hasta aproximadamente 1 km de profundidad y resolución vertical de 9.51 m, además de datos de pozo, se observó una configuración sencilla de capas horizontales en el subsuelo, identificando 4 unidades geológicas correlacionadas a las formaciones sedimentarias del Cenozoico Fm. Guayabo, Fm. Carbonera y Fm. León, y el basamento Proterozoico de la cuenca constituido por el Granito de Parguaza. En la zona del posible cráter, las formaciones sedimentarias Guayabo, León y Carbonera no superan los 200 m de espesor y presentan sus valores mínimos de 53 m, 20 m y 79 m, respectivamente, en el sector más oriental del área de estudio.

3. El modelamiento geológico 3D realizado con GemPy, contribuye a la comprensión de la estructura del río Vichada, proporcionando a través del método de campo potencial una representación consistente de la geometría de las capas en el subsuelo. Los resultados muestran capas horizontales y un levantamiento tectónico del basamento cristalino de la cuenca, correspondiente a el Granito de Parguaza. Estos resultados son consistentes con el modelo de

génesis de las cuencas de antepaís, lo cual es coherente con el contexto de la cuenca de los Llanos Orientales, donde la carga tectónica de la Cordillera Oriental produce subsidencia flexural seguida de un levantamiento del basamento de la cuenca.

4. Las simulaciones de Monte Carlo muestran que, incluso al introducir perturbaciones en los datos de entrada, los resultados del modelo se mantienen bastante estables, indicando que el modelo es robusto frente a la incertidumbre y su precisión no se ve significativamente comprometida. La cuantificación de la incertidumbre confirma que el modelo es relativamente estable y coherente, con una entropía media de 0.14. Estos resultados evidencian que el modelo geológico 3D reproduce las geometrías esperadas para las unidades del subsuelo.

5. La librería de libre acceso Gempy permitió realizar el modelamiento geológico 3D del área de estudio y evaluar la fiabilidad del modelo, proporcionando un marco de trabajo transparente y reproducible. Además, facilitó la interoperabilidad con otras herramientas de análisis y visualización, potenciando el intercambio y la integración de datos.

6. Con el alcance de este estudio, no fue posible verificar/refutar la existencia de una cuenca con las dimensiones propuestas por distintos autores (50–70 km de diámetro y aproximadamente 1 km de profundidad final). La información sísmica y de pozo disponible no muestra evidencias concluyentes que respalden un cráter con tales características.

7. Se recomienda integrar información gravimétrica y magnetométrica, junto con otros datos geofísicos que se encuentren disponibles en el área de estudio, con el objetivo de enriquecer el modelo geológico 3D, contribuyendo a una comprensión más completa del subsuelo, mejorando la interpretación y reduciendo la incertidumbre.

Referencias Bibliográficas

- Al-Chalabi, M. (2014). *Principals of Seismic Velocities and Time-To-Depth Conversion*. EAGE Publications by Houten, the Netherlands. <https://doi.org/10.3997/9789462820098>
- Aug, C., Chilès, J.P., Courrioux, G. y Lajaunie, C. (2005). 3D Geological Modelling and Uncertainty: The Potential-field Method. In: Leuangthong, O., y Deutsch, C. V. (Eds.). *Geostatistics Banff 2004* (pp. 145–154). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_15
- Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J.J. y Reyes-Harker, A. (2008). An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. *Bulletin of the Geological Society of America*, 120(9–10), 1171–1197. <https://doi.org/10.1130/B26187.1>
- Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Reyes-Harker, A. y Torres, V. (2007). Paleocene-middle miocene flexural-margin migration of the nonmarine Llanos foreland and basin of Colombia. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3), 51–70. <https://doi.org/10.29047/01225383.475>
- Bayona, G., Valencia, A., Mora, A., Rueda, M., Montenegro, O., y Ortiz, J. (2008). Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la Cuenca antepaís de los Llanos de Colombia. *Geología Colombiana*, 33, 23–46.
- BHP Billiton Petroleum. (2011). *Processing of the CPE 5 2D land seismic lines Llanos Orientales – Colombia, final processing report*. [Informe interno no publicado]

- BHP Billiton Petroleum. (2012). *Results analysis report CPE-5 Block Vichada, Colombia*. [Informe interno no publicado]
- Bonakdari, H. y Zeynoddin, M. (2022). Chapter 4 - Stochastic modeling. In: H. Bonakdari; M. Zeynoddin (Eds.). *Stochastic modeling* (pp. 133–187). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91748-3.00005-7>
- Bradley, R. S. (2015). *Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary* (3.^a ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-18310-1>
- Braga, F.C.S., Rosiere, C.A., Santos, J.O.S., Hagemann, S.G. y Salles, P.V. (2019). Depicting the 3D geometry of ore bodies using implicit lithological modeling: An example from the Horto-Baratinha iron deposit, Guanhões block, MG. *REM-International Engineering Journal*, 72(3), 435–443. <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720167>
- Brisson, S., Wellmann, F., Chudalla, N., von Harten, J. y von Hagke, C. (2023). Estimating uncertainties in 3-D models of complex fold-and-thrust belts: A case study of the Eastern Alps triangle zone. *Applied Computing and Geosciences*, 18, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2023.100115>
- Calcagno, P., Chilès, J.P., Courrioux, G. y Guillen, A. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1–4), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.013>
- Calcagno, P., Courrioux, G., Guillen, A., Fitzgerald, D. y Mcinerney, P. (2006). How 3D implicit geometric modelling helps to understand geology: the 3D GeoModeller methodology. In *XIth International Congress, Society for Mathematical Geology* (p. 27).

- Calcagno, P., Lazarre, J., Courrioux, G. y Ledru, P. (2007). 3D geometric modelling of an external orogenic domain: a case history from the western Alps (massif de Morges, Pelvoux). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 178 (4), 263–274.
- Calcagno, P., Thinon, I., Courrioux, G., Guillen, A. y Guenoc, P. (2004). 3D geometric modelling: A tool for margin and basin interpretation illustrated with the eastern Corse case-study (NW Mediterranean sea). In *Réunion des Sciences de la Terre, Joint Earth Sciences Meeting*. Société Géologique de France-Geologische Vereinigung Strasbourg.
- Castro, M., García, D. y Jiménez, A. (2017). Comparison of spatial interpolation techniques to predict soil properties in the colombian piedmont eastern plains. *Tecnura*, 21(53), 78-95.
<https://doi.org/10.14483/22487638.11658>
- Catuneanu, O. (2004). Retroarc foreland systems-evolution through time. *Journal of African Earth Sciences*, 38(3), 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.01.004>
- Chilès, J.P., Aug, C., Guillen, A. y Lees, T. (2004). Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: the potential-field method. In *proceedings of international symposium on orebody modelling and strategic mine planning, Perth, Australia* (Vol. 22, p. 24).
- Crósta, A.P., Reimold, W.U., Vasconcelos, M.A.R., Hauser, N., Oliveira, G.J.G., Maziviero, M.V. y Góes, A.M. (2018). Impact cratering: the South American record– Part I. *Chem. Erde-Geochem*, 79(1), 1-61. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.001>.
- Raeside, D.E. (1976). Monte Carlo principles and applications. *Physics in Medicine & Biology*, 21(2), 181–197. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/21/2/001>

- Dashti, A., Korzani, M.G., Geuzaine, C., Egert, R. y Kohl, T. (2023). Impact of structural uncertainty on tracer test design in faulted geothermal reservoirs. *Geothermics*, 107, 102607. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102607>
- De La Espriella, R., Flórez, C., Galvis, J., Gonzales, C. F., Mariño, J., y Pinto, H. (1990). Geología regional del norte de la Comisaría del Vichada. *Geología Colombiana*, 17, 93–106.
- de la Varga, M.; Schaaf, A.; Wellmann, F. (2018). GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development*, 12(6), 1-32. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-61>
- Earth Impact Database. (2018). *Earth Impact Database*. Planetary and Space Science Centre, University of New Brunswick. <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/>
- Einsele, G. (1992). Basin evolution and sediments. In: Einsele, G. (Ed.), *Sedimentary Basins*. Springer-Verlag (pp. 429–484). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04029-4>
- French, B. (1998a). Formations of impact craters. In *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Features in Terrestrial Meteorite Impact Structures* (pp. 17-30). LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- French, B. (1998b). Shock-metamorphic effects in rocks and minerals. In *Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures* (pp. 31-60). LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Gault, D., Quaide, W., y Oberbeck, V. (1968). Impact cratering mechanics and structures. In B. French y N. Short (Eds.), *Shock Metamorphism of Natural Materials* (pp. 177-189).

- Glass, B. P., y Simonson, B. M. (2013). Distal Impact Ejecta Layers: A Record of Large Impacts in Sedimentary Deposits. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88262-6>
- González, C. F., y Pinto, H. (1990). Petrografía del Granito de Parguaza y otras rocas precámbricas en el Oriente de Colombia. *Geología Colombiana*, 17, 107–121.
- Graterol, V. (2009). Levantamiento aerogravimétrico y aeromagnético de los sectores norte y oriental de la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia: Contrato n.º 034 (Informe final de interpretación, 51 pp.). Agencia Nacional de Hidrocarburos, Bogotá. Recuperado de https://www.academia.edu/10029262/LEVANTAMIENTO_AEROGRAVIMETRICO_Y_AEROMAGNETICO_Elaborado_por#loswp-work-container
- Grieve, R., Dence, M., y Robertson, R. (1977). Cratering process: As interpreted from the occurrence of impact melts. In D. Roddy, R. Pepin, y R. Merrill (Eds.), *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial implications*. (p. 791-814). New York, Pergamon Press, Inc.
- Gulick, S. P. S., Christeson, G. L., Barton, P. J., Grieve, R. A. F., Morgan, J. V. y Urrutia-Fucugauchi, J. (2013). Geophysical characterization of the chicxulub impact crater. *Reviews of Geophysics*, 51(1), 31–52. <https://doi.org/10.1002/rog.20007>
- Gunnarsson, N. (2011). 3D modeling in Petrel of geological CO2 storage site. Master thesis, Uppsala University. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Aanbn%3Ase%3Auu%3Adiva-162124>
- Landmark Graphics Corporation. (2004). *ProMAX Seismic Processing and Analysis Training Manual* (Vol. 1, Part No. 162382 Rev A). Landmark Graphics Corporation.
- Hargitai, H., y Kereszturi, Á. (Eds.). (2015). *Encyclopedia of planetary landforms* (pp. 1-2460). New York, NY, USA: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3134-3>

- Hernández, O., y Alexander, G. C. (2018). Vichada asteroid impact effects from simulation of regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Earth Sciences Research Journal*, 22(1), 7–12. <https://doi.org/10.15446/esrj.v22n1.65459>
- Hernandez, O.; Khurama, S. y Alexander, G.C. (2011). Structural modeling of the vichada impact structure from interpreted ground gravity and magnetic anomalies. *Boletín de Geología*, 33(1), 15-26. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/2469>
- Hernández, O., von Frese, R.R.B. y Khurama, S. (2009). Geophysical evidence for an impact crater in Vichada, northwestern South America and its economic potential. *Earth Sciences Research Journal*, 13(2), 97-107. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/21104/36378>
- Hernández-Stefanoni, J. L., del Carmen Delgado-Carranza, M., y Espadas-Manrique, C. (2004). Métodos de Interpolación Espacial y Geoestadística. En *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (pp. 705-734).
- Herron, D. A. (2011). *First Steps in Seismic Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802938>
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo Z., A., Jacobsen, S. B., y Boynton, W. V. (1991). Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, 19(9), 867. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0867:CCAPCT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0867:CCAPCT>2.3.CO;2)
- Høyer, A. S., Sandersen, P. B. E., Andersen, L. T., Madsen, R. B., Mortensen, M. H., y Møller, I. (2024). Evaluating the chain of uncertainties in the 3D geological modelling workflow. *Engineering Geology*, 343, 107792. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107792>

James, S., Chandran, S. R., Santosh, M., Pradeepkumar, A. P., Praveen, M. N., y Sajinkumar, K. S. (2022).

Meteorite impact craters as hotspots for mineral resources and energy fuels: A global review.

Energy Geoscience, 3(2), 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.12.006>

Jessell, M. W., Ailleres, L., y de Kemp, E. A. (2010). Towards an integrated inversion of geoscientific

data: What price of geology?. *Tectonophysics*, 490(3–4), 294–306.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.020>

Kenkmann, T., Poelchau, M. H., y Wulf, G. (2014). Structural geology of impact craters. *Journal of*

Structural Geology, 62, 156–182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.015>

Khurama, S. 2007 Caracterización geológica y geofísica de la estructura del Rio Vichada, Inspección de

Palmarito, Departamento de Vichada. Tesis de maestría, Departamento de Geociencias,

Universidad Nacional de Colombia, 164p.

Lajaunie, C., Courrioux, G. y Manuel, L. (1997). Foliation fields and 3d cartography in geology: principles

of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, 29, 571–584.

<https://doi.org/10.1007/BF02775087>

Liu, M., Sun, H.; Liu, R., Hu, L., Kong, R. y Liu, S. (2024). Efficient geo-electromagnetic modeling

techniques for complex geological structures: A karst MT example. *Computers & Geosciences*,

185, 105557. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105557>

Mazur, M., Stewart, R., y Hildebrand, A. (2000). The seismic signature of meteorite impact craters.

Canadian Society of Exploration Geophysicists, 25(06).

McInerney, P., Guillen, A., Courrioux, G., Calcagno, P., y Lees, T. (2005). Building 3D Geological

Models Directly from the Data? A new approach applied to Broken Hill, Australia. *Digital*

Mapping Techniques '05; Workshop Proceedings. Open-File Report– U.S. Geological Survey OF 2005, 119–130.

Melosh, H. J. (1989). *Impact Cratering, A Geologic Process*. Oxford University Press, New York, 253 p.

Metcalf, S.E., y Nash, D.J. (Eds.). (2012). *Quaternary Environmental Change in the Tropics*. John Wiley and Sons, Ltd., Oxford. <https://doi.org/10.1002/9781118336311>

Moreno-López, M.C.; Escalona, A. (2015). Precambrian–Pleistocene tectono-stratigraphic evolution of the southern Llanos basin, Colombia. *AAPG Bulletin*, 99(08), 1473–1501. <https://doi.org/10.1306/11111413138>

Ormö, J., y Llobet, O. (2013). La formación de cráteres de impacto. Un proceso fundamental en el Sistema Solar. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 21(3), 310–320.

Osinski, G. R., Grieve, R. A. F., y Tornabene, L. L. (2012). Excavation and Impact Ejecta Emplacement. In Osinski, G. R. y Pierazzo, E. (Eds.), *Impact Cratering: Processes and Products* (pp. 43–59). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118447307.ch4>

Pakyuz-Charrier, E., Jessell, M., Giraud, J., Lindsay, M. y Ogarko, V. (2019). Topological Analysis in Monte Carlo Simulation for Uncertainty Estimation. *Journal Solid Earth*, 10(5), 1663–1684. <https://doi.org/10.5194/se-2017-115>

Pendergrass, A. G., Byrne, M. P., Watt-Meyer, O., Maher, P., y Webb, M. J. (2024). Impact of ITCZ width on global climate: ITCZ-MIP. *Geoscientific Model Development*, 17(16), 6365–6378. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-6365-2024>

- Pereira, F. L., Crósta, A. P., Avona, P. D., Vasconcelos, M. A. R., y Goés, A. M. (2024). Magnetometric and seismic investigation of the Nova Colinas impact structure, Parnaíba Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 149, 105215. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105215>
- Qu, H., Liu, H., Tan, K. y Zhang, Q. (2021). Geological feature modeling and reserve estimation of uranium deposits based on multiple interpolation methods. *Processes*, 10(1), 67. <http://dx.doi.org/10.3390/pr10010067>
- Rocca, M. (2004). Rio vichada: A possible 50 km wide impact structure in Colombia, South America. *67th Annual Meteoritical Society Meeting*.
- Servicio Geológico Colombiano. (2014a). *Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico de las Planchas 237 y 256 Departamento de Vichada*. Memoria explicativa. Recuperado de <https://siig.sgc.gov.co/>
- Servicio Geológico Colombiano. (2014b). *Estudios de Cartografía Geológica a Escala 1:100.000 Bloque 8 en el Vichada; Plancha 238 - Palmarito*. Memoria explicativa. Recuperado de <https://siig.sgc.gov.co/>
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Šram, D., Rman, N., Rižnar, I. y Lapanje, A. (2015). The three-dimensional regional geological model of the Mura-Zala Basin, northeastern Slovenia. *Geología*, 58(2), 139–154. <https://doi.org/10.5474/geologija.2015.011>
- Sturkell, E. F. F., y Ormö, J. (1998). Magnetometry of the marine, Ordovician Lockne impact structure, Jämtland, Sweden. *Journal of Applied Geophysics*, 38(3), 195–207. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00031-1)

- Talbot, J.-Y., Martelet, G., Courrioux, G., Chen, Y., y Faure, M. (2004). Emplacement in an extensional setting of the Mont Lozère–Borne granitic complex (SE France) inferred from comprehensive AMS, structural and gravity studies. *Journal of Structural Geology*, 26(1), 11–28. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00083-X)
- Taylor, S. (2001). *Solar System Evolution: A New Perspective*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Thema, J. y Roa García, M.C. (2023). The energy transition in Colombia. Current situation, projections, challenges, narratives and public policies – in relation to the energy transition in Germany (Wuppertal Paper no. 200). Wuppertal Institute. <https://wupperinst.org/a/wi/a/s/ad/8143>
- Torrado Pérez, S.A. (2019). Modelamiento de la estructura del río Vichada a partir de la interpretación de anomalías gravimétricas, magnéticas y eléctricas. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77222>
- Urrutia-Fucugauchi, J., y Pérez-Cruz, L. (2009). Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces. *International Geology Review*, 51(12), 1079–1102. <https://doi.org/10.1080/00206810902867161>
- von Frese, R. R. B., Potts, L. V., Wells, S. B., Leftwich, T. E., Kim, H. R., Kim, J. W., Golynsky, A. V., Hernandez, O., y Gaya-Piqué, L. R. (2009). GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2). <https://doi.org/10.1029/2008GC002149>
- Wellmann, J. F., y Regenauer-Lieb, K. (2012). Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics*, 526–529, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.05.001>

- Winchester, S., y Morris, M. D. (2002). The map that changed the world: William Smith and the birth of modern geology. *Leadership and Management in Engineering*, 2(2), 12–13.
- Wu, J. y Sun, B. (2021). Discontinuous mechanical analysis of manifold element strain of rock slope based on open source Gempy. *E3S Web of Conferences*, 248, 03084. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124803084>
- Yamamoto, J.K. (1998). A review of numerical methods for the interpolation of geological data. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 70(1), 91–116.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>
- Yue, Z., Shi, K., Di, K., Lin, Y., y Gou, S. (2023). Progresses and prospects of impact crater studies. *Science China Earth Sciences*, 66(11), 2441–2451. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1009-0>