



Universidad de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad Geología y Minas
Departamento de Geología

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Geólogo

Título: Modelación 3D del horizonte de grava de un sector del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei, municipio Mussende, provincia de Kwanza Sur, Angola.

Autor: Bruno Yonng De Fontes Pereira Leopoldo

Tutores: Ms. C Jorge Luis Urra Abaira

Ing. Daniel Núñez Elías

Colaborador: Ms. C Yorgenis Maceo Rustán

Moa, 2019

“Año 61 de la Revolución”

PENSAMIENTOS

“El verdadero propósito de la vida es la felicidad”.

Dalai Lama

“Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar”.

“Me gustan los amigos que tienen pensamientos independientes porque suelen hacerte ver los problemas desde todos los ángulos”.

Nelson Mandela

“Pregúntate si lo que estás haciendo hoy te acerca al lugar en el que quieres estar mañana”.

Walt Disney

“Procura ser tan grande que todos quieran alcanzarte y tan humilde que todos quieran estar contigo”.

Anónimo

“Las oportunidades están donde otros encuentran excusas”.

Jack Ma

“Lo único que está entre tu meta y tú, es la historia que te sigues contando a ti mismo de por qué no lo puedes lograr”.

Jordan Belfort

“Seamos la pesadilla de quienes pretenden arrebatarnos los sueños”.

Che Guevara

“Si quieres volverte sabio, primero tendrás que escuchar a los perros salvajes que ladran en tu sótano”.

Nietzsche

“Está bien celebrar el éxito, pero es más importante prestar atención a las lecciones del fracaso”.

Bill Gates

DEDICATORIA

❖ *Al *DIAMANTE* de mi vida, la señora Isabel María de Fontes Pereira, mi madre, por ser la piedra más preciosa, valiosa, y más hermosa que he tenido en toda mi vida. Su amor incondicional es lo que me dan fuerzas para tener una mejor percepción de la vida. Se lo debo todo, si hoy sigo aquí y soy así es por ella y por querer darle una mejor vida: más sana y llena de bendiciones. LA AMO.*

❖ *A Mis hermanitos Hugo Ma-Tí De Fontes Pereira Leopoldo y Rafaela Karina De Fontes Pereira Leopoldo por estar siempre conmigo dándome fuerzas en estas jornadas de mi vida y manteniéndome siempre con la cabeza erguida para llegar hasta aquí y seguir adelante. LOS AMO.*

❖ *A Mi sobrinito Anderson Rafael Leopoldo Paiva por llenar mi corazón de mucho cariño. LO AMO.*

❖ *A mi Padre Francisco Leopoldo (Fraio) que ya no está conmigo físicamente pero si está espiritual y mentalmente. Su ausencia me ha hecho más fuerte. Saber que no está en este mundo me ha permitido dedicarme lo suficiente para poder enseñarle, donde él se encuentra, donde puedo llegar y lo que alcanzaré de aquí para adelante en una nueva etapa de mi vida. Lo extraño.*

AGRADECIMIENTOS

- Primeramente, al señor Dios Todo Poderoso, si no fuera por su gracia y por su amor incondicional no me hubiera levantado, soportado y vencido las adversidades que la vida me ha aprontado, sois mi Universo.
- A mi país Angola por la beca y al gobierno cubano por albergarme como uno de sus hijos y darme la oportunidad de realizar los estudios universitarios en su territorio.
- A toda mi familia de parte de madre que me han dado fuerzas y han creído en mi potencial.
- A mis dos madrinas Ana Paula y São Martins no tengo palabras para describir el amor de persona que son para mí y para todos sus seres queridos.
- A la anfitriona, mi abuela Marcelina Fontes Pereira, por ser el árbol, el pilar más grande de enseñanza en mi familia.
- A mis tutores. El Ing. Daniel Elías Núñez además de ser mi tutor es como un hermano mayor para mí y el Ms. C Jorge Luis Urra Abaira es uno de los mejores maestros que he conocido por lo que le admiro bastante. Al Ing. Yorgenis Maceo Rustán agradecerle por la participación primordial que tubo en el trabajo de diploma.
- A todos mis compañeros de aula angolanos y cubanos, por los cinco años que convivimos y por haber me aturado. A todos Los estudiantes angolanos en cuba que de una forma u otra contribuyeron en mi formación, especialmente: Eudis, Elías, Wacalama, Walter, Cassinda, Kamilonga, Bartolomeu, Suely, Idicelma, Marinela, Fausto, Silva, Jessica, Zacarias, Ludovic, Marcus, Dumila, Ms.C Carnoth, Cameia, Gregor, Chipepe, Lufuakenda, Salvador, Tomás, Muangala, Culivila, Soki, Joaquim, Amarildo, Nicolau, Doctorino, Osvaldo, William, Da Silva.
- A los estudiantes angolanos graduados en los años anteriores.
- A los cubanos en especial: Pedro Dúnan, Carlos Matos, Carlos Flores, Familia Pérez, Familia Bernardo, mis ex–novias y amigas, Nereida Vinales, al Cirujano Juan Carlos, a la instructora Dania y la auxiliar de limpieza Omaris.
- A la dirección del Departamento de Geología y al Consejo de Dirección de la Facultad Geología y Minas, por la competencia, eficiencia, calidad y la credibilidad que han brindado a nuestra facultad por los buenos resultados que siguen presentando en la docencia. Especialmente a los profesores: M.s C. Yurisley Valdés (un padre que he ganado en Cuba), M.s C. Iván Barea, Dr. C Carlos Leyva, Ing. Luis A. Pérez, M.s C. Beatriz Riberón, M.s C. Moraima Rodríguez y Dr. C Alina Rodríguez.

RESUMEN

Los depósitos secundarios son muy importantes a la hora de realizar estudios de prospección para la búsqueda de zonas perspectivas con acumulación de diamantes. La formación de estos depósitos en Angola es vital por constituir una de las mayores fuentes de riquezas del país. Estos depósitos se forman por desintegración de los depósitos primarios. En el territorio angolano se encuentran caracterizados por dos formaciones sedimentarias antiguas principales: la formación Calonda y la formación Kalahari. La Sociedad Minera de Catoca junto con el Departamento de Geología de la Universidad “Agostinho Neto” de Angola desarrolló trabajos de prospección geológica a pequeña y gran escala, con el objetivo de caracterizar y conocer el potencial diamantífero de estos depósitos en el territorio angolano. La Sociedad Minera de Catoca ha usado la modelación en geología para lograr mejor efectividad y orientación de los trabajos de prospección, pero esta información no fue adquirida por cuestiones profesionales y además por poseer informaciones confidenciales concerniente al depósito. Por falta de información surgió la necesidad en este trabajo de modelar en 3D el horizonte de grava para así conocer la distribución espacial, continuidad lineal o lateral y los mayores espesores de grava en un sector del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei, municipio Mussende, provincia de Cuanza Sur, Angola. Esto va a contribuir en mejorar la efectividad y orientación de los trabajos de prospección en las etapas siguientes de investigación geológicas, al fin de determinar las zonas pronosticas de acumulación de diamante en el depósito secundario y su explotación.

ABSTRACT

Secondary deposits are very important when conducting prospection studies for the search of prospects with accumulation of diamonds. The formation of these deposits in Angola is vital because it is one of the greatest sources of wealth in the country. These deposits are formed by the disintegration of the primary deposits. In Angolan territory they are characterized by two main ancient sedimentary formations: the Calonda formation and the Kalahari formation. The Mining Society of Catoca together with the Department of Geology of the "Agostinho Neto" University of Angola developed small and large-scale geological prospecting, with the objective of characterizing and knowing the diamond potential of these deposits in the Angolan territory. The Mining Society of Catoca has used modeling in geology to achieve better effectiveness and orientation of the prospecting work, but this information was not acquired due to professional issues and also because it has confidential information concerning the deposit. Due to lack of information, the need arose in this work to model the gravel horizon in 3D in order to know the spatial distribution, linear or lateral continuity and the greater gravel thickness in a sector of the secondary reservoir of the Lorelei kimberlite body, Mussende municipality, province of Cuanza Sur, Angola. This will contribute to the achievement of a better effectiveness and orientation of the prospection works in the following stages of geological investigation in order to determine the forecast zones of diamond accumulation in the secondary deposit and exploit them.

ÍNDICE

PENSAMIENTOS.....	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
ÍNDICE	7
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Grado de investigación geológica del área de estudio.	13
1.3 Regularidades de los estudios geoestadísticos.	14
1.4 Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio.	17
1.4.1 Ubicación geográfica del área de estudio.....	17
1.4.2 Vegetación y clima.....	18
1.4.3 Hidrografía.....	19
1.4.4 Características geológicas de la provincia Cuanza Sur.....	20
1.4.5 Características geológicas del municipio Mussende	24
1.5 Generalidades de los depósitos diamantíferos	27
1.6 Encuadramiento geológico relacionado con las génesis de los diamantes en Angola.....	30
1.7 Conclusiones.....	37
CAPITULO II: METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS	38
2.1 Introducción.....	38
2.2 Metodología de trabajo.....	38
2.3 Materiales.....	41

2.4	Origen de los datos de exploración.....	41
2.5	Método geoestadístico aplicado.....	44
2.6	Metodología para la construcción del modelo 3D de grava, según algoritmo el Krigeado de indicatrices.....	45
2.7	Conclusiones.....	46
CAPÍTULO III: MODELACIÓN 3D DEL HORIZONTE DE GRAVA EN EL DEPÓSITO SECUNDARIO, CUERPO KIMBERLÍTICO LORALEI		47
3.1	Introducción	47
3.2	Datos de la exploración.....	47
3.3	Regularización de la base de datos	49
3.4	Análisis exploratorio de los datos.....	50
3.4.1	Despliegue de los datos.....	51
3.4.2	Estadística básica	53
3.4.3	Análisis de los valores extremos en la distribución	54
3.5	Análisis variográfico	55
3.6	Estimación 3D del horizonte de arena y grava.....	58
3.7	Conclusiones.....	64
CONCLUSIONES		66
RECOMENDACIONES		67
BIBLIOGRAFÍA		68
ANEXOS		72

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad los diamantes han sido reconocidos por su elevada calidad y valor comercial. Su fama como la joya más brillante, dura y bella que existe, no solamente los hace importantes, sino también su uso industrial. Baste señalar que sin él muchas actividades industriales se verían seriamente limitadas. Desde las civilizaciones orientales, donde la India destaca como principal productor, pasando por la Europa clásica de los tiempos de Alejandro Magno donde los reyes lucubran con las gemas preciosas, hasta llegar a la actualidad, todos hemos admirado su belleza y brillantez.

La explotación de mantos diamantíferos constituye hoy en día un firme renglón para la minería a nivel mundial situando a los países mayores exportadores en un punto cimero en el mercado de las piedras preciosas. En el globo terráqueo las zonas más enriquecidas en diamantes son las ocupadas por la India, Brasil y Sudáfrica distinguiéndose cada una por sus particularidades geológicas en la formación de las mismas.

En la India se encuentran principalmente asociados a areniscas y conglomerados antiguos (silúricos) y arenas de los ríos. En el caso de Brasil se distinguen dos regiones geológicas mayormente enriquecidas que son el estado de Minas Gerais donde se encuentran en metaconglomerados antecambrianos y en aluviones recientes; y la comprendida en los estados de Bahía, Goiás y Mato Grosso donde se haya en depósitos sueltos de aluviones y en arenas de los ríos. En el sur de África por su parte el diamante se encuentra en las arenas de los ríos y en depresiones crateriformes del suelo constituidas por partículas de una roca eruptiva análoga a la serpentina procedente de la descomposición de una roca de olivino llamada kimberlita.

En este mismo contexto geológico se encuentra la República de Angola. Este país posee kimberlitas y depósitos aluviales diamantíferos ya identificados y muchas de estas formaciones aguardan un desarrollo respecto al estudio y eventual exploración minera. Es probable que muchos depósitos aún estén por descubrirse.

En Angola, una parte significativa de los diamantes explorados provienen de depósitos secundarios o aluviales. Estos depósitos concentran diamantes de pequeñas dimensiones, pero con una elevada calidad. Los diamantes están intercalados con gravas asociados a las redes hidrográficas antiguas y actuales, encontrándose generalmente cubiertos por capas detríticas aluviales (arenas, limos y arcillas).

Este enriquecimiento ha convertido al país africano en uno de los más importantes en el mercado mundial de los diamantes debido al volumen y calidad de las gemas recuperadas en su territorio. Es probable que esta posición se mantenga en un futuro, una vez que aún posee recursos probables y medidos de dimensiones considerables.

Dado el conocimiento de que los depósitos primarios y secundarios de diamantes no ocurren solamente en la parte noreste del país sino también en la parte sudeste y en el centro, en esta última década la empresa Sociedad Minera de Catoca ha tenido la necesidad de hacer un estudio detallado de prospección geológica basado en estudios hechos anteriormente en el municipio Mussende de la provincia Cuanza Sur, identificando varios depósitos primarios y secundarios de diamantes con potencial económicamente rentable.

Los depósitos secundarios desarrollados sobre el municipio Mussende constituyen uno de los principales intereses económicos del país, debido a su elevado potencial diamantífero. En ocasiones, la variabilidad de la distribución de sedimentos friables hace complejo el proceso de estimación de los recursos; el cual se realiza mediante los conocidos métodos geoestadísticos los cuales, según Núñez (2017), prestan un mayor interés en las estimaciones a nivel local que en los globales.

Los métodos geoestadísticos tratan de buscar el mejor estimador que minimice lo máximo la varianza del error de estimación, y parten de que la variabilidad o continuidad espacial de las variables distribuidas tengan una estructura determinada, que posibilita crear un modelo de bloques adecuado donde los bloques son definidos con dimensiones convenientes a la unidad de selección minera, teniendo en cuenta el espaciamiento entre muestras y el alcance estructural, según (Núñez, 2017).

Entre los posibles métodos a utilizar para estimar la probabilidad de ocurrencia de horizontes litológicos en los depósitos secundarios de diamantes, se destaca el Krigeado de indicatrices (KI) el cual se puede utilizar en la modelación de depósitos sedimentarios que presentan horizontes o variables independientes.

El método de Kriging de Indicatrices se basa en caracterizar el valor en el sitio “campo de acción” por una distribución de probabilidad, la cual refleja la incertidumbre en este sitio. La estimación de cada indicador se interpreta como la probabilidad que el valor verdadero sea menor que la ley de corte asociada. Se debe corregir las estimaciones para que sean crecientes entre 0 y 1 se y promedian ambas correcciones, luego se interpola y extrapola para completar la distribución de probabilidad.

Estas consideraciones sugieren la realización de un modelo 3D del horizonte de grava de un sector del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei mediante la utilización de Krigeado de indicatrices que permita evaluar la dirección de mayor continuidad espacial en la estimación 3D en el depósito aluvial sobre la chimenea Lorelei, municipio Mussende, provincia de Cuanza Sur, Angola.

Problema científico

Necesidad de modelar la distribución espacial del horizonte de grava de un sector del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei como zona perspectiva de acumulación de diamantes.

Objeto de estudio

Depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei.

Campo de acción

Horizonte de grava del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei.

Objetivo general

Modelar en 3D el horizonte de grava del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei como zona perspectiva de acumulación de diamantes.

Hipótesis

Si se modela la distribución espacial del horizonte de grava del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei se podrá definir la zona perspectiva de acumulación de diamantes.

Objetivos específicos:

1. Evaluar de los horizontes del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei.
2. Modelar el horizonte de grava de los sedimentos redepositados utilizando técnicas geoestadísticas.
3. Caracterizar la distribución espacial de las posibles zonas de acumulación de diamantes.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL

1.1 Introducción

El perfeccionamiento de esta industria minera en el paso del tiempo ha propiciado la modernización paulatina de las técnicas y métodos de estimación de recursos.

En los últimos años, la realización de estimaciones precisas se ha convertido en un asunto de vital importancia debido a los escándalos que en esta materia se han producido en algunas partes del mundo. Han de emplearse, entonces, métodos eficientes y adaptables a la situación geológica imperante en el lugar de estudio, que permiten obtener resultados fiables, (Núñez, 2017).

La estimación de las capas de sedimentos detríticos concentrados en los depósitos secundarios, como son la de grava, arena y arcilla, no constituye una tarea fácil dada la variabilidad de la distribución de las capas en profundidad y la complejidad geológica de los depósitos surgidos como resultados de la superposición de eventos geológicos en el tiempo. Se hace necesario, entonces, conocer las características geológicas y geomorfológicas de forma que se pueda establecer el estudio del comportamiento espacial de las diferentes variables. De igual forma, la base de dato y superficies topográficas deben poseer la calidad necesaria para ser incluidas en los procesos de creación de modelos 3D.

Las técnicas geoestadísticas basadas en modelos 3D, entre las que se encuentran el Krigeado de indicatrices ofrece un mayor grado de detalle en la modelación y estimación de los depósitos secundarios debido a su grado de precisión en cuanto a las estimaciones locales, permitiendo establecer un modelo de bloques 3D que caracteriza la distribución espacial de las variables.

En este capítulo se brinda una panorámica del estado actual de las investigaciones realizadas en el área de estudio y se analizan las características de interés para la modelación y la estimación presentes en el área de estudio.

1.2 Grado de investigación geológica del área de estudio.

En la Concesión minera de Gango fueron realizados trabajos de prospección de kimberlitas por la Sociedad Minera de Condiama hasta 1975, fecha hasta la cual no se

verificó actividad minera, con excepción de los trabajos de los garimpeiros que no cesan sus operaciones activas hasta la actualidad. Aunque no están disponibles informaciones confiables sobre los resultados de estos estudios la alta actividad de los garimpeiros encontrada por el Departamento de Geología da Sociedad Minera de Catoca cuando visitó el área de estudio en 2010, indica la posibilidad de abertura de nuevos depósitos de diamantes, (Catoca 2001 & 2013).

En 2008, el Instituto Remoto de Previsiones Mineras, en subcontrato con la Sociedad Minera de Catoca, realizó la evaluación del área Bimba-Mussende de cerca de 65.000 km². Este trabajo involucró la totalidad del área de la Concesión Minera de Quitúbia obteniendo como resultado del asesoramiento remoto la observación en algunas partes de varias anomalías, indicando la posibilidad de ocurrencias de kimberlitas magnéticas en el área de estudio. El mismo instituto estudió parcialmente la concesión Gango, lo cual está separada de la concesión Quitúbia por un vial, (Catoca, 2001 & 2013).

Los trabajos de campo en la Concesión Minera de Gango, tuvieron inicio en julio de 2012, con los siguientes métodos geológicos de prospección: métodos geofísicos de gravimetría y magnético, métodos geoquímicos de concentrados pesados y tratamiento de muestras.

Las rocas sobrepuestas en el área de la concesión Gango fueron mapeadas durante los trabajos de prospección por los geólogos de la Empresa Surafricana Trans Hex en el periodo 2003-2006. De acuerdo con los datos obtenidos por ellos, en la parte sur de la concesión, las rocas subyacentes del complejo eluvial-deluvial son arcillas con inclusiones de dimensiones de fragmentos de rocas base, capas de material de detritos de gravas, grandes conglomerados y bloques, (Catoca, 2013).

1.3 Regularidades de los estudios geoestadísticos.

El estudio de fenómenos con correlación espacial, por medio de métodos geoestadísticos, surgió a partir de los años sesenta, especialmente con el propósito de predecir valores de las variables en sitios no muestreados. Como antecedentes suelen citarse trabajos de Sichel (1947; 1949) y Krige (1951). El primero observó la naturaleza asimétrica de la distribución del contenido de oro en las minas surafricanas, la equiparó

a una distribución de probabilidad lognormal y desarrolló las fórmulas básicas para esta distribución. Ello permitió una primera estimación de las reservas, pero bajo el supuesto de que las mediciones eran independientes, en clara contradicción con la experiencia de que existen “zonas” más ricas que otras.

Una primera aproximación a la solución de este problema fue dada por geólogo G. Krige que propuso una variante del método de medias móviles. La formulación rigurosa y la solución al problema de predicción (estimación en muchos textos geoestadísticos) vinieron de la mano de Matheron (1962) en la escuela de minas de París. En los años sucesivos la teoría se fue depurando, ampliando su campo de validez y reduciendo las hipótesis necesarias (Samper y Carrera, 1990).

De la minería las técnicas geoestadísticas, se han "exportado" a muchos otros campos como hidrología, física del suelo, ciencias de la tierra y más recientemente al monitoreo ambiental y al procesamiento de imágenes de satélite. Aunque la aplicación de la herramienta geoestadística es bastante reciente, son innumerables los ejemplos en los que se ha utilizado esta técnica en estudios ambientales con el ánimo de predecir fenómenos espaciales (Robertson, 1987; Cressie y Majure, 1995; Diggle et al., 1995). La columna vertebral del análisis geoestadístico es la determinación de la estructura de autocorrelación entre los datos y su uso en la predicción a través de las técnicas conocidas como kriging y cokriging. Otros temas importantes dentro del estudio de información georreferenciada son el diseño de redes de muestreo (McBratney et al., 1981), la geoestadística multivariada (Wackernagel, 1995) y la simulación (Deutsch y Journel, 1992). La geoestadística es solo una de las áreas del análisis de datos espaciales. Es importante reconocer cuando la información georreferenciada es susceptible de ser analizada por medio de dicha metodología.

La herramienta básica de la Geoestadística es el variograma, el cual se emplea para cuantificar la correlación entre observaciones. Los modelos de variograma se usan en la estimación sobre puntos no muestreados, procedimiento que se conoce como krigeado (o kriging en inglés) en honor al ingeniero sudafricano Danie Krige, quien, junto Herbert Sichel llevaron a cabo los primeros pasos de la naciente ciencia en las minas de oro de Witwatersrand. Las principales bases teóricas de la geoestadística

fueron creadas por Georges Matheron hacia los años 60 y 70, en el Centro de Investigación de Fontainebleau, junto a su equipo de jóvenes investigadores (Martínez, 2006).

Martínez (2006) para designar las ramas de esta ciencia, recomienda la clasificación propuesta por el Centro de Geoestadística de la Escuela de Minas de París, que la separa en:

1. Geoestadística lineal.
2. Geoestadística no estacionaria.
3. Geoestadística multivariada.
4. Simulaciones.
5. Geoestadística no lineal.

En la actualidad los estudios geoestadísticos se han aplicado a numerosas ramas del conocimiento como la industria petrolera, la minería, las ciencias del mar, la hidrogeología, la pesca, el medio ambiente, las ciencias agrícolas y forestales, la ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, ciencias de materiales, salud pública, meteorología, edafología, finanzas, entre otras.

La estimación geoestadística puede hacerse de dos formas (Cuador, 2000):

Estimación puntual: sólo se obtiene un valor estimado en una localización deseada o en los puntos de una red de estimación definida sobre la región de estudio.

Estimación de bloque: se obtiene el valor medio de la propiedad que se estima en bloques definidos sobre el dominio, rectángulos para aplicaciones en dos dimensiones y paralelepípedos para tres dimensiones.

Los puntos o bloques a estimar deben ser seleccionados de los definidos en una región rectangular que cubra el dominio, con el objetivo de contornear la zona de interés, es decir, seleccionar los puntos, cuadrículas o bloques que están dentro de los límites de la región de estudio, en el caso minero la zona mineralizada de interés, (Cuador, 2000).

Estas estimaciones, según Martínez (2006), constan de tres pasos básicos para su aplicación práctica:

1. Análisis exploratorio de los datos.
2. Análisis estructural (cálculo y modelado de los variogramas).
3. Predicción (krigeado o simulación).

El análisis exploratorio de datos se realiza con el objetivo de describir la data. En este paso se determinan los detalles sobre la distribución a la que se ajustan los datos y con qué precisión lo hacen, y se realiza la caracterización estadística de las variables al calcular los estadígrafos de posición, dispersión y forma. Previo a esta etapa se realiza una revisión de la confiabilidad de la base de datos, realizando su validación y corroborando en el campo de ser necesario, la existencia de valores anómalos (Núñez, 2017).

El análisis estructural tiene como objetivo fundamental la confección y modelamiento de los variogramas experimentales y modelos. En esta etapa se realiza la determinación de fenómenos que pueden afectar sensiblemente el resultado de la estimación (presencia de tendencia regionales y locales, mala continuidad espacial de la data relacionada con el efecto pepita, etc.), se estudia la ley de distribución de las funciones aleatorias a través del estudio variográfico y se analiza la presencia de anisotropía con su correspondiente interpretación geológica (Núñez, 2017).

El último paso se realiza para definir el método de simulación o estimación que mejor se ajusta a las características de los datos, para ello se realiza un análisis exhaustivo de los errores locales y globales de ajuste en correspondencia con el variograma empleado que permita definir cuál es el mejor estimador. Finalmente se valida la estimación acorde al error cometido (Núñez, 2017).

1.4 Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio.

1.4.1 Ubicación geográfica del área de estudio.

La Concesión Minera de Gango, a la cual pertenece el cuerpo kimberlítico Lorelei, ocupa un área de 3000 km² y limita al norte y al nordeste con los ríos Longa y Cuanza

y con las provincias de Luanda, Cuanza Norte y Malanje; al sur con la provincia de Benguela; al sudoeste con las provincias de Huambo y Bié y al oeste con el Océano Atlántico.

La concesión se localiza en el centro oeste de Angola, estando su mayor parte en el distrito municipal Mussende en la provincia Cuanza Sur, cuya capital es Sumbe, ubicada entre los paralelos $10^{\circ} 49'$ y $12^{\circ} 11'$ de latitud sur y los meridianos 13° y 8° de longitud este. La otra parte de la concesión se encuentra en la provincia de Malange. (ver figura 1)

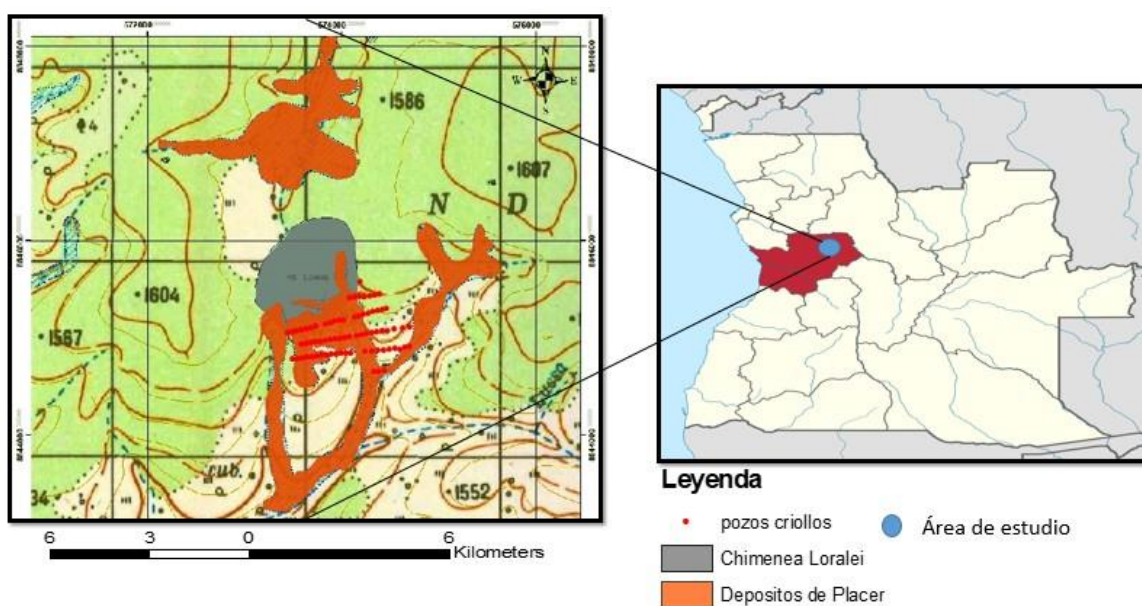


Figura 1. Esquema de ubicación geográfica de la concesión Gango.

1.4.2 Vegetación y clima

La cobertura vegetal del área está en un 70% cubierta por bosque. Los árboles tienen una altura predominante entre 8-10 m, con un espesor de 20 centímetros y troncos de espesor medio en casi todas sus partes. En el valle de los ríos y arroyos son terrenos baldíos comunes con los arbustos y herbáceos. Estos normalmente se confinan para plantaciones agrícolas de plantas herbáceas y arbustos.

El clima en el municipio de Mussende es tropical con veranos mucho más lluviosos que los inviernos. La temperatura promedio es 21.0°C y las precipitaciones son de 1147 mm al año (ver figura 2).



Figura 2. Vegetación y clima del municipio Mussende.

1.4.3 Hidrografía

Las cuencas principales alrededor de la concesión Gango son los ríos Cuanza y Gango que tienen como afluentes principales los ríos Muiligi y Crema Batida. La velocidad del flujo de agua a lo largo de los ríos es relativamente alta mientras que describen cauces ligeramente sinuosos.

El río Cuanza nace en la meseta de Bié, en el centro del país. Discurre, en principio, hacia el norte para después ir hacia el oeste y terminar desembocando en el océano Atlántico, al sur de Luanda. Su longitud total es 965 km y su cuenca drena una superficie de 151.422 km².

El río Gango nace a 3 km de la frontera sur de la concesión y fluye en dirección submeridional cruzando el territorio de la concesión de sur a norte, cerca de la frontera oriental. Cerca de la frontera al norte de la concesión el flujo del río cambia de dirección y fluye en dirección sublatitudinal hacia el oeste traspasando el área de la concesión. La anchura del río Gango varía de 18 a 30 m, con una profundidad de 0,5-0,6 m. El flujo de las aguas es relativamente constante, de 0.9 m/s. Puede usarse los barcos como los medios de transporte, pero no se permite en todas sus partes.

El río Longa es el afluente del río Gango que atraviesa el área de estudio y su anchura es insignificante en la mayoría del afluente.

El río Lonhe se localiza 15 m cerca de la frontera occidental de la concesión con una profundidad entre 0,5 -1,0 m. La velocidad del flujo del agua cerca de la frontera occidental de la concesión alcanza 1.3 m/s.

La gran mayoría de los ríos menores en el área de trabajos presentan aguas en las épocas de lluvias y secan en el período de sequedad. Las excepciones son para los ríos, y los afluentes más grandes como los ríos Gango y Longa, tal como Lonhe, Pumbuije, Bunze, Lusso, Fuique y algunos otros cauces que trabajan durante el año entero (ver figura 3).

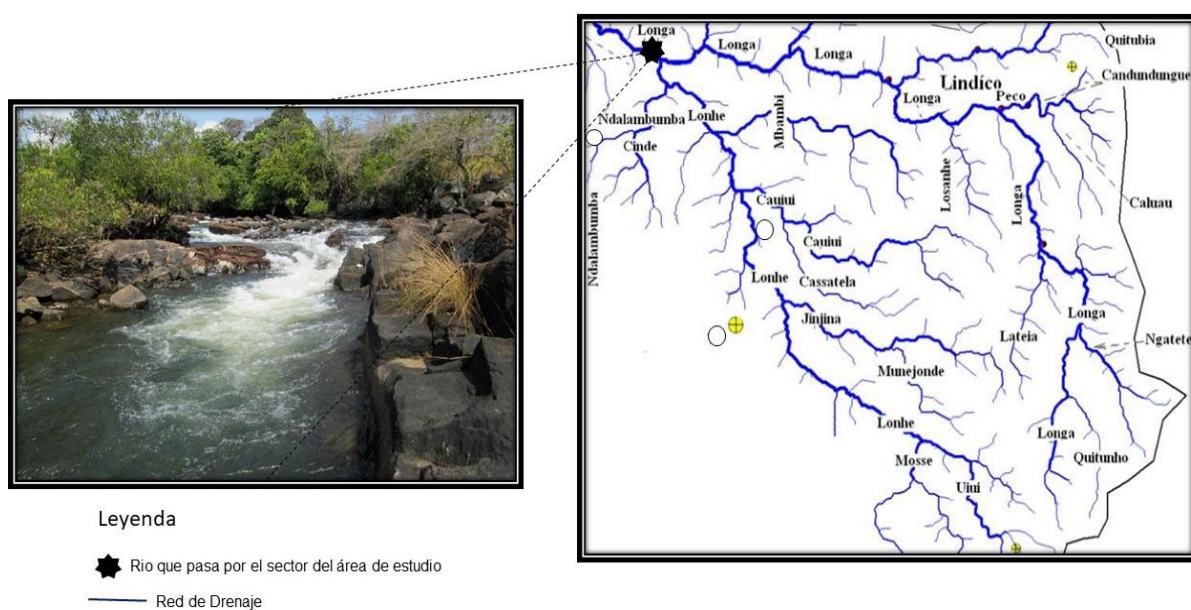


Figura 3. Esquema de la red de drenaje de la provincia de Cuanza Sur.

1.4.4 Características geológicas de la provincia Cuanza Sur

El área de Cuanza Sur es parte íntegra del escudo Angola que como es conocido cuenta en su constitución de dos pisos estructurales principales: el piso inferior que es constituido por el Arcaico y por el Proterozóico precoz y el piso superior constituidos por los compuestos Proterozóico y Fanerozoico.

Los dos pisos se diferencian y subdividen conforme con el tipo de litología presente, edad de formación del mismo así como los tipos diferentes de eventos geológicos sucedidos.

Los pisos mencionados se describen en la provincia Cuanza Sur de la siguiente manera:

Arcaico: las rocas del Arcaico de la provincia del Cuanza sur se subdivide en dos grupos: el Arcaico Superior y el Arcaico Inferior, separados por el límite de edad de 3000 ± 100 m.a. Las rocas arcaicas se caracterizan por el metamorfismo de alto grado, con facies de anfibolitas y textura granulítica, propias del metamorfismo regional (Gonçalves, 2015).

Arcaico inferior: las rocas del Arcaico Inferior son las más viejas en el área, representadas por las rocas metamórficas y los intrusivos magmáticos. El Arcaico Inferior se separa en dos grupos: el grupo inferior y el grupo superior (Gonçalves, 2015).

Grupo inferior: petrográficamente se representa por las granulitas con la hiperstena y esquistos del cristalino, los gneises de composición básica, eclogitas, anfibolitas y cuarcitas. Todas estas rocas se atribuyen a la facie granulítica y anfibolítica del metamorfismo regional (Gilberto, 2014).

Grupo superior: petrográficamente se representa por las migmatitas, tonalitas, granodioritas y granitos. Esas piedras eran afectadas y recrystalizadas para los granitos intrusos y venas de cuarzo (Gonçalves, 2015).

Arcaico Superior: Se representa por el bimicáceos de los gneises, las plagioclasas, el bimicáceo de esquisto con la granate y cianita, parafibolitos de los calcíferos y mármoles, cuarcitas y metaconglomerados. Y el encontrase todavía rocas magmáticas como las granodioritas y dioritas, (Gonçalves, 2015).

Proterozoico: las rocas del Proterozoico que pasa en el territorio de Angola se subdividieron en dos grupos de edades diferenciadas: Proterozoico Inferior y Proterozoico Superior, separados por el límite de edad de 1650 ± 50 m.a, (Gonçalves, 2015).

Proterozoico inferior: En el territorio de Angola las rocas metamórficas del proterozoico inferior revelan mayor número de variación de facies. Dentro de los límites del escudo de Angola estas rocas están depositadas en los graben. En el grupo

Oendolongo surgen los conglomerados, aparecen las areniscas cuarzosas, grauvacas, esquistos micáceos e itabiritas (Gonçalves 2015).

Proterozoico superior: las rocas del Proterozoico Superior son representadas por el grupo de esquistos indiferenciado, formado por los esquistos argilosos, arcosa, grauvacas, areniscas y conglomerados, (Gonçalves, 2015).

Fanerozoico: Los depósitos Fanerozoicos ocupan inmensas áreas del territorio de Angola, actuó por una sucesión de rocas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas.

El área del Cuanza sur, empezando del principio del Paleozoico, no sufrió ninguna orogenia, después de haber sido afectada sólo para movimientos epirogénicos, marcado por el magmatismo básico y ultrabásico que resultaba durante el Mesozoico en la intrusión de rocas kimberlíticas y alcalinas (Gonçalves, 2015).

Intercalaciones de la formación continental: son conocidos bajo esta designación los depósitos de las depresiones sin los fósiles continentales, descubiertos por los cursos superiores de los ríos Cuanza, Cubango, Lungue-Bungo, en Angola. Ellos se constituyen por el grés gris y gris-amarillento, los siltitos, los argilitos rojos y de vez en cuando los conglomerados (Gonçalves, 2015).

Mesozoico: En el territorio de Angola las kimberlitas se desarrollaron ampliamente en complejos magmáticos de edad Mesozoica, propiamente do Cretácico. Estos complejos se localizan dentro de los límites de la estructura transcontinental de Lucapa, dónde ellos son conocidos más de 675 cuerpos kimberlíticos y más de 30 cuerpos de rocas alcalinas, ultra-básicas alcalinos y carbonatitas (Araújo A.G., et todos, 1992, mencionados por Martins Daniel; Sanches Jandira, 2015). En la provincia de Cuanza sur ellos afloran en rocas de edad Mesozoica que va de Cretácico Inferior al Superior de Cretácico.

Cretácico superior: se representa por la formación Cabo Lêdo con las areniscas, caliza arenosa, las arcillas, los conglomerados y para la formación Infra-Binga, dolomitas, calizas, anhidritas, sales y areniscas (Baptista, 2015).

Cretácico inferior: aparece la formación Cuvo compuesta por grés, conglomerados, arcillas, dolomitas y la formación Tuenza con las dolomitas, anhidritas y sales (Baptista, 2015).

Cenozoico: se caracteriza por la formación Río Dande, del Paleocénico, constituida por las margas, argilas, calizas, areniscas, coprólitos y conglomerados (Martins, Sanches, 2015).

Sedimentos del Cuaternario: Las formaciones superficiales se representan por los depósitos de la playa, arenas, arenas aluvionales de Holoceno. Esos depósitos se extienden en una inmensa área dentro de la provincia del Cuanza Sur; en el caso de las comunidades de Cariango y Caue; ellos afloran en los valles de los ríos Dombwige y Lonhe (Martins, Sanches, 2015) y (ver figura 4).

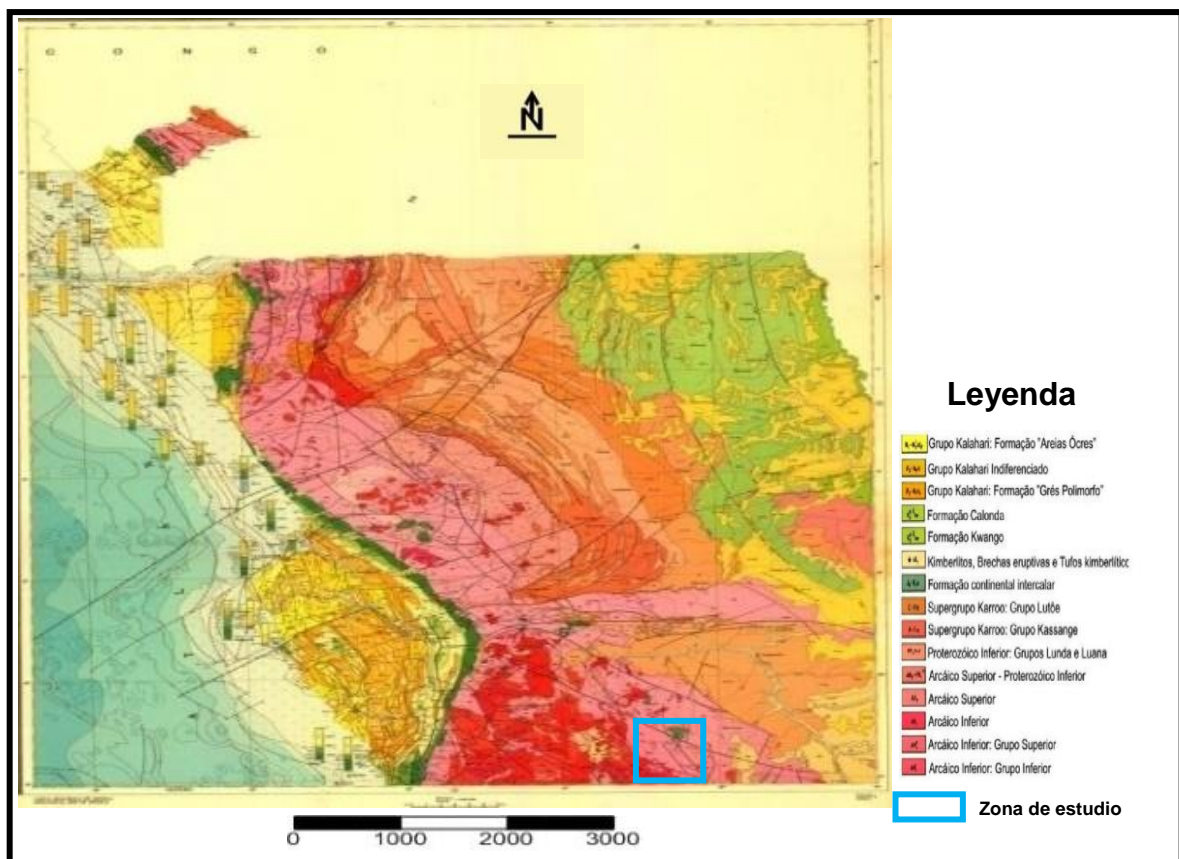


Figura 4. Esquema del mapa geológico de la provincia de Cuanza Sur. Fuente: Malass & Calussolo (2018).

1.4.5 Características geológicas del municipio Mussende

La parte principal de esta concesión está compuesta sobre todos por las rocas del Arcaico Superior e Inferior. En el área, el basamento es metamorfozada en la facies de la anfibolita y granulita, representándose por la biotita, hornblenda, los gneises, el granatebiotita y plagio-gneises.

El basamento está constituido por las rocas cristalinas del Arcaico (Superior e Inferior), granitos, gneises, dioritas y esquistos. Ellos todavía presentan algunas rocas de Proterozoico Inferior, cuarcitas y conglomerados, entre otros. En el embasamiento cristalino, las rocas sufren meteorización de grados diferentes en las formaciones del Arcaico Superior y Proterozoico Inferior.

En el sur de la concesión, las formaciones cristalinas sufrieron el metamorfismo de la facies anfibolíticas y en el norte las migmatitas (los cuerpos lenticulares, até 100 m), grano-dioritas, granitos y biotitas. En el nordeste de la concesión es posible encontrar conglomerados polimiticos y varias rocas como: cuarcitas, granitos y las rocas básicas, siendo la parte superior del mismo compuesta por areniscas rojas intercaladas con los siltitos.

Los trabajos desarrollados de prospección logrados por los técnicos de la Sociedad Minera de Catoca delatan el hallazgo de varios cuerpos kimberlíticos, tal como, Tchandongo y Cassanza y Lorarei

En el área del estudio afloran las rocas cristalinas del Precámbrico como los granitos, gneises (ver figura 5).

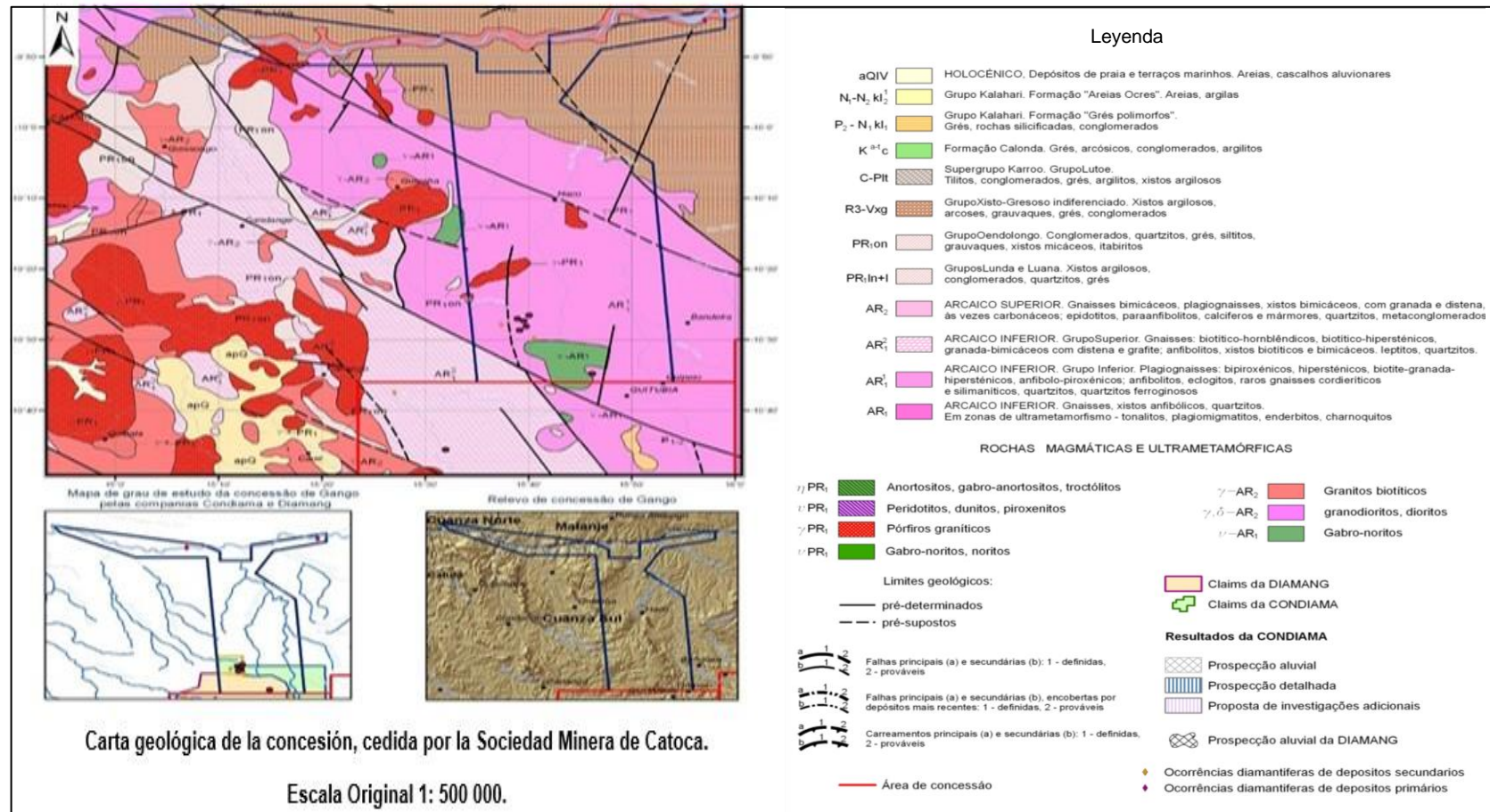


Figura 5. Carta geológica de la concesión, Mussende, Cuanza Sur, Angola.

La concesión Gango está en la unión de la depresión entre el escudo angoleño y congoleño.

En la concesión se destacan las fallas tectónicas bastante paragenéticas con un modelo estructural, característica que indica el predominio de deformación cortada conforme con la falla Anderson, por ejemplo, en la Concesión. Las áreas de las chimeneas de kimberlíticas conocidos, también tienen un arreglo regular de fallas relativamente aisladas. Hasta el momento, el mecanismo de formación de áreas del cizallamiento entra conforme con los resultados de los trabajos experimentales en geotectónica logrado en el campo.

Dentro de la concesión las kimberlitas estaban definidos por fallas tectónicas y la paragénesis estructural que indica de una manera fiable sublatitudinal del área con una cinemática de cizallamiento muy definido. Se nota que la edad de la paragénesis estructural es adoptada como Cretácico Inferior, considerada con el momento de introducción de las kimberlitas, según se muestra en la leyenda. Al mismo tiempo, la creación de la falla, probablemente tiene una edad mucho más vieja, con un largo y complejo (probablemente el alternante) desarrollo de caracteres (ver figura 6)

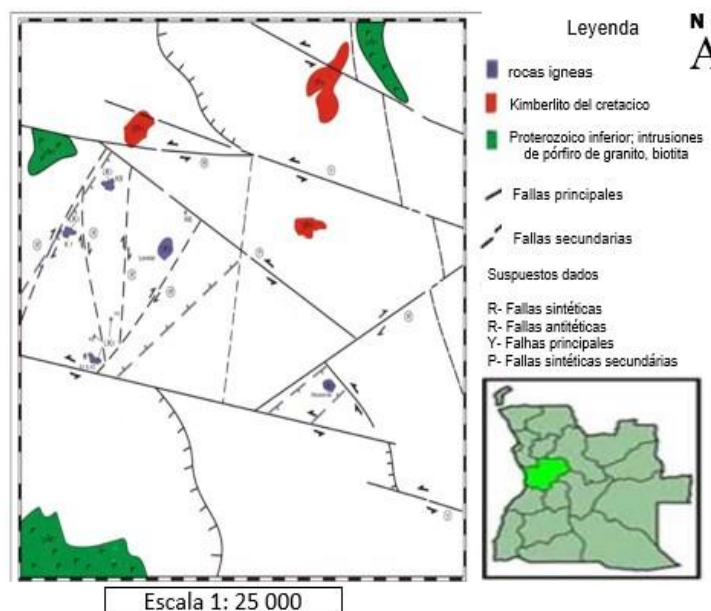


Figura 6. Mapa de la Tectónica de la Provincia de Cuanza Sul. Fuente: (Catoca, 2013).

1.5 Generalidades de los depósitos diamantíferos

Los kimberlitos son la fuente más importante de diamantes, sin embargo, su existencia solo se pudo ser conocida en el año 1866. Los depósitos del área de Kimberley en África del Sur fueron los primeros reconocidos y ellos fueron quienes le dieron el nombre, Malass & Calussolo (2018).

La kimberlita es una roca ultrabásica ígnea, potásica y rica en volátiles que ocurren en pequeños tubos volcánicos, diques y umbrales, presentando una textura inequigranular debido a la presencia de macrocristales sobrepuestos en una matriz de grano fino. Esta matriz de grano fino está compuesta por los fenocristales prominentes de olivino y varios minerales como: la flogopita, calcita, el clinopiroxeno (el diópsido), monticelita, apatita, espinela, perovskite e ilmenita. Los macrocristales derivados del manto incluyen el olivino, la flogopita, el picroilmenita, la espinela cromífera, la magnesita, el granate (el piropo), cromo - diópsido y enstatita. (Catoca, 2013).

Debido a que se encontraron los diamantes de Kimberley originalmente en la kimberlita laterizada, estas se clasifican rígidamente en función de las características este primer hallazgo, como: las de tierra amarilla y las de tierra azul. La tierra amarilla es relativa a la kimberlita intemperizada que está expuesta en la superficie y la tierra azul es relativa a la kimberlita no intemperizada, encontrado en la profundidad no constante, Malass & Calussolo (2018).

Las intrusiones kimberlíticas que están asociadas a estructuras profundas, pueden alcanzar el manto. El magma kimberlítico cuando asciende a la corteza en gran velocidad, trae consigo los mismos fragmentos mantélicos que según Mitchell (1995) pueden ser las peridotitas (dunita, harzburgita, lherzolita) o eclogitas. El magma kimberlítico llega a la superficie a través de plumas que tienen el origen entre los límites manto - núcleo y manto superior - manto inferior (Haggerty, 1991).

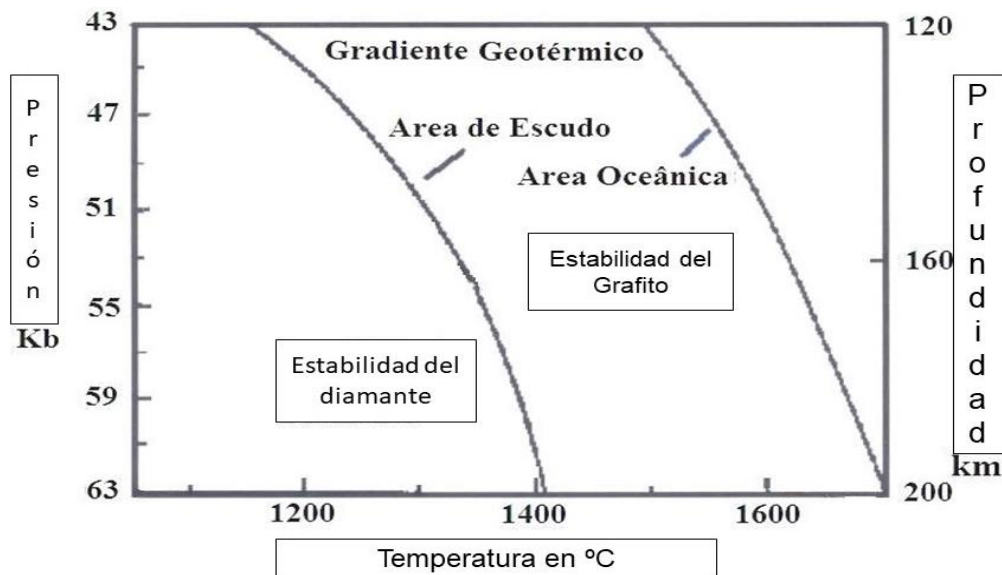


Figura 7. Diagrama de estabilidad del diamante y grafito. Fuente: internet, Google. Modificado por De Fontes, 2019.

Los diamantes se forman en el interior de la Tierra, es decir, en el manto superior. Normalmente el diamante se forma a una profundidad de 200 a 150 km, con una temperatura que varía dos 900° a 1200° C, y con una presión de 45 a 60 Kbar. Es a partir del intervalo de estos valores que se formaran los diamantes o entonces, el intervalo de estos valores es comúnmente llamado de ventana de formación de los diamantes (ver figura 7).

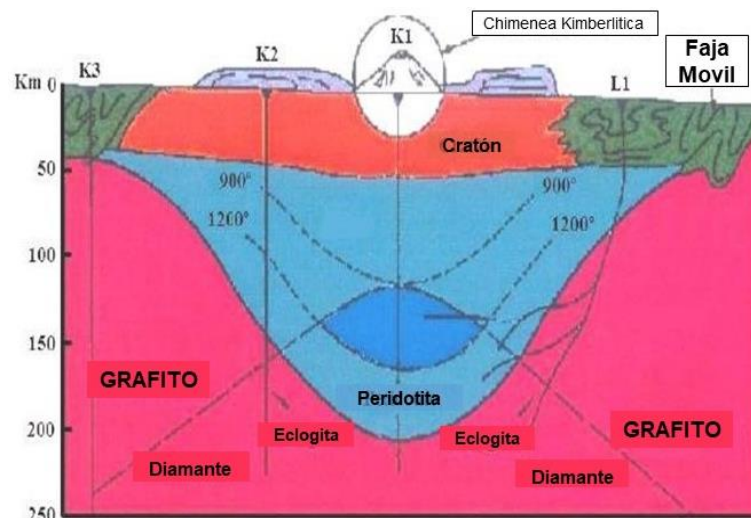


Figura 8. Modelo de fuente de diamantes, modificado por Kirkley et al. (1991). Delimita la línea de estabilidad entre el diamante y el grafito. Leyenda: K-Kimberlito, L-Lamproíto. Modificado por De Fontes Pereira, 2019.

De la corteza para el interior del planeta, la temperatura aumenta con la profundidad lo que es denominado de gradiente geotérmico. Así, según Shirey & Shigley (2003) los diamantes se pueden formar en cualquiera región de la Tierra donde la profundidad en la corteza o en el manto permita valores de presión elevados, una vez que en estos lugares la temperatura sería propicia. La mayor parte del manto está dentro del campo de estabilidad de los diamantes. La corteza, siendo nombrada de poco (menor de 40 km), solo entra dentro de este campo cuando a ella están asociados procesos geológicos relacionados con las placas tectónicas. Aunque las condiciones para la estabilidad y consecuente cristalización son propicias en el manto, la formación de los diamantes es muy rara debido a la escasez de carbono libre (Shirey & Shigley 2003) (ver figura 8).

Las erupciones kimberlíticas ocurrentes en los cratones que datan del precámbrico (arcaico) sufren desgates en las superficies expuestas, lo que conlleva, por su vez, a la liberación de diamante para en regolito (capa de roca suelta y de fragmentos minerales que no forman aún un suelo). Entretanto por ocurrir ascensión de la corteza, según (Shirey & Shigley, 2003), las rocas hospederas son erosionadas y los diamantes son liberados, siendo posteriormente transportados por ríos y corrientes longitudinales. Si no hay ascensión de la corteza, estos diamantes permanecen almacenados en las cuencas como es el caso de las diferentes zonas en África Occidental Zimbabue y Brasil.

Según Kopylova (2005) las kimberlitas pueden ser divididas en tres unidades, basado en su morfología y petrología (ver figura 9):

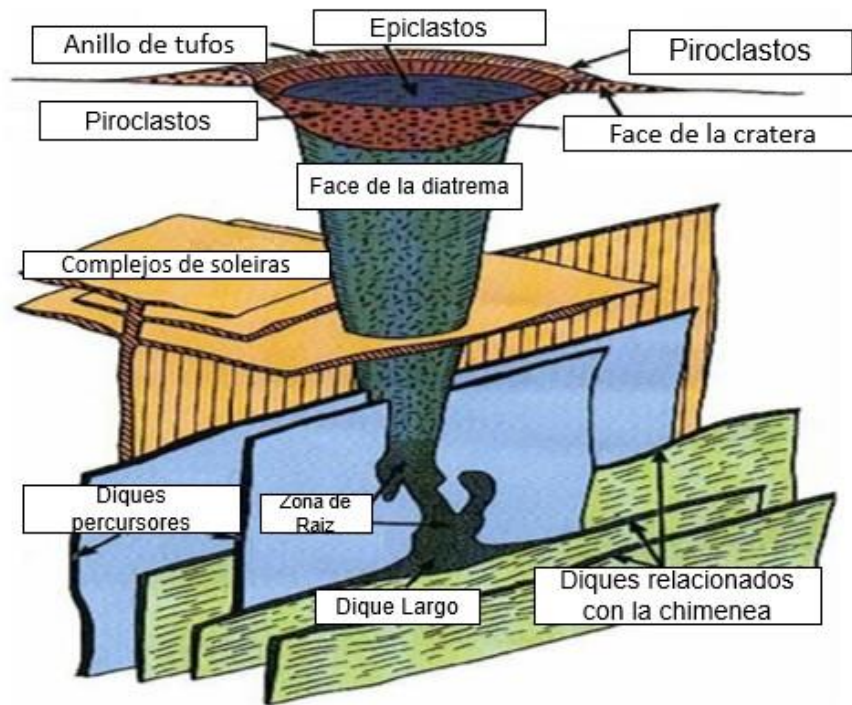


Figura 9. Morfología de los tubos kimberlíticos.

1.6 Encuadramiento geológico relacionado con las génesis de los diamantes en Angola.

Un cratón o escudo son zonas de la corteza continental constituidas por rocas del precámbrico. Los escudos están formados por las rocas más antiguas de la corteza terrestre, granítica y metamórfica. Desde sus orígenes han permanecido estables y conservando su rigidez.

El cratón del Congo tiene bastante influencia en la formación de los diamantes y localización de las kimberlitas en el territorio angoleño. Las ocurrencias kimberlíticas prevalecen en terrenos que datan del precámbrico (arcaico), caracterizados por la presencia de anfibolitas, gneises anfibolíticos, granulitas máficos y charnoquitos.

El Cratón del Congo exhibe tendencias estructurales que reflejan diferentes ciclos orogénicos. Estos ciclos dieron origen a las zonas de debilidad estructural con origen en orogénias Precámbricas y del sistema de fracturas y tensión al actuar en el cratón entre los periodos Carboníferos, Pérmico y el Cretácico. (Pereira et al, 2003). Las

direcciones WSW-ENE del Arcaico, la tendencia NW-SE de las estructuras resultantes de la orogenia Eburneana y las direcciones N-S y la NNW-SSE del ciclo Pan-africano, traducen el flujo tectónico sufrido en el cratón a lo largo del tiempo (ver figura 10).

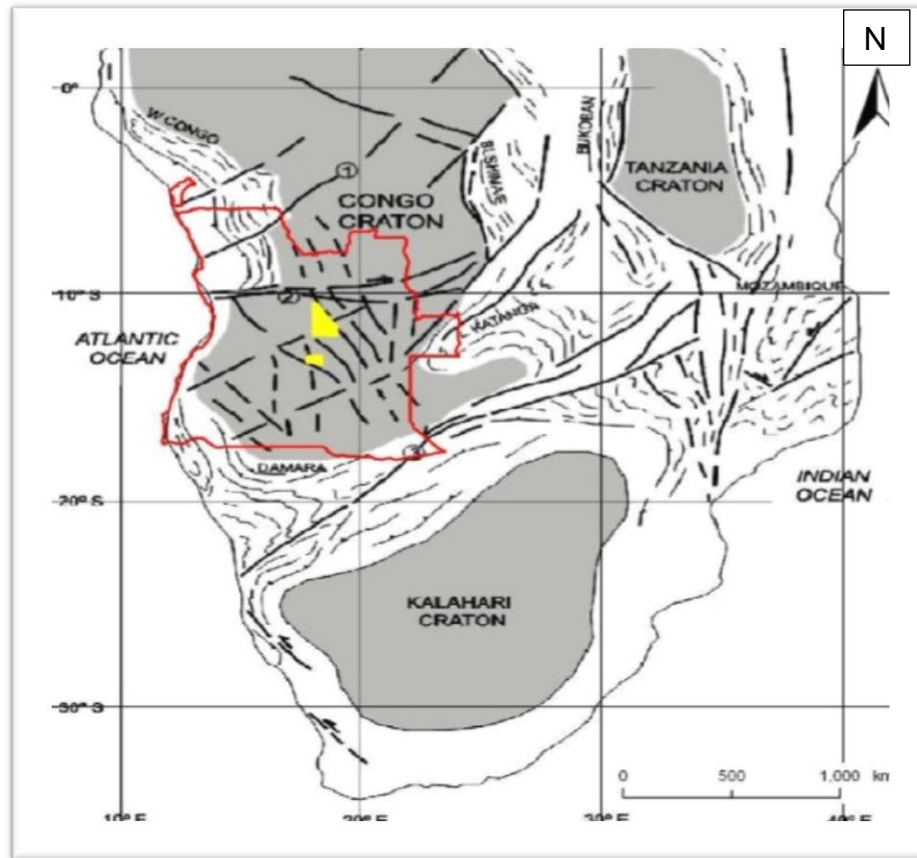


Figura 10. Cratones Africanos. Se Destacan las zonas de debilidad estructural existentes en el cratón del Congo y el corredor SW-NE correspondiente al Complejo Volcánico de Angola (Pereira et al., 2003).

Depósitos secundarios de diamantes

Los depósitos secundarios resultan de la alteración y erosión de los depósitos primarios, seguido del transporte y deposición de los diamantes en zonas donde la energía que permite el transporte se atenúa facilitando la deposición. Los minerales presentes en las kimberlitas son generados a presión y temperaturas muy distintas de aquellos que observan en la superficie de la tierra. Por razones genéticas, estos minerales son químicamente inestables y son descompuestos rápidamente por los agentes atmosféricos. Las aguas de escorrentía erosionan los residuos finales (arcillas

y óxidos) de estos minerales descompuestos. De estos procesos solo restan los más resistentes, donde se incluyen los diamantes, depositandose los diamantes en diversos ambientes sedimentarios, tales como: ambientes fluviales, abanicos aluviales de ríos entrelazados, y de ríos con meandros.

En dependencia de los agentes que influenciaron en la formación de los depósitos secundarios, pueden clasificarse en: eluviales, deluviales, proluviales, aluviales y de lezírias.

Depósito eluvial: son aquellos que se forman en el lugar (in situ) de la meteorización de la fuente original.

Depósito deluvial: Son aquellos que se forman como resultado de la dispersión del material meteorizado y desintegrado a lo largo de la pendiente (prácticamente donde se inicia la pendiente).

Depósito proluvial: son aquellos que se forman como resultado de la acumulación del material desintegrado y meteorizado pues un previo transporte, es decir, en parte cerca a la base de la pendiente.

Depósito aluvial: son aquellos que se forman en el interior del valle, como resultado del arrastre por el río de los materiales clásticos, etc. Normalmente localizados juntos en los márgenes de los ríos, generalmente alagados debido a su aproximación al río.

Depósito de lezíria: Son secos cuando los niveles del agua de los ríos o valles están bajos. La capa de estéril es generalmente más reducida de que los otros depósitos. Estos depósitos presentan de una forma general, tenores económicos muy importantes de exploración siendo datados del período Cuaternario. Los depósitos más importantes asientan por arriba de la roca base, presentando un cascajo (grava) diamantífero, siguiendo de cierta forma la siguiente secuencia: cuarzo y cantos rodados cuarzosos, sedimentos arenosos y sedimentos pelíticos.

De acuerdo con las etapas de los ríos, los depósitos secundarios se subdividen en:

Depósito de terraza: son aquellos que se localizan en los márgenes de los valles. El apareamiento de estos depósitos se relaciona con las alteraciones climáticas que

ocurrieron durante el periodo Cuaternario que provocaron el rebajamiento de los lechos de los ríos asociados a los fenómenos tectónicos.

Depósito de valle: la génesis de estos depósitos tiene mucho que ver con las depresiones estructurales de la región y consecuentemente del río, subdivididos en las categorías de meandros con controle lito-estructural y vales estrechos y sinuosos. Generalmente, se encuentran elevados tenores de diamantes. El horizonte de cascajo (grava) de estos depósitos despierta un gran interés del punto de vista económico por ser el último colector de los depósitos secundarios.

Depósito de barra: son aquellos que se forman de la emigración de sedimentos arenosos, por la ocasión de llanuras de los canales meandriformes, descolándose en cada periodo de crecida por una cresta correspondiente a la acreción lateral sufrida.

Depósito de canal: son depósitos donde los sedimentos se acumulan en el fondo del río. Los depósitos de esta naturaleza tienen una relación con toda la estructura geomorfológica. Podemos encontrar depósitos diamantíferos en los meandros, bien como en valles más estrechos y sinuosos. El material cascajo (grava) de estos depósitos son esencialmente compuestos por un conjunto de sedimentos (ver figura 11).

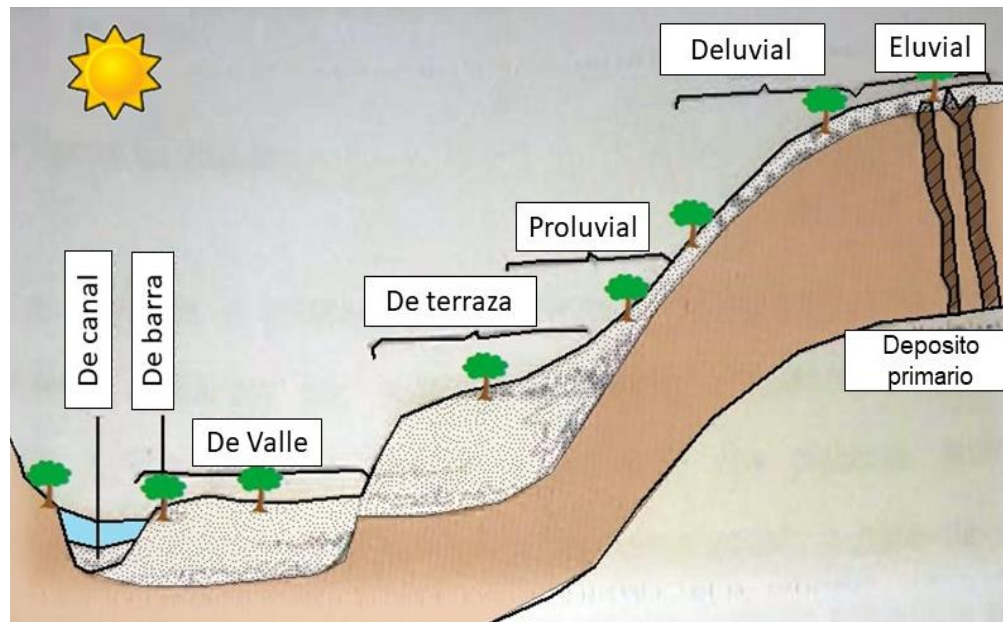


Figura 11. Esquema de la distribución de los depósitos secundarios de distintas clases transversales del valle fluvial. Malass & Calussolo (2018). Modificado por De Fontes Pereira, 2019.

Durante el transporte, los diamantes se mezclan con litologías de diversas granulometrías: grava, arena y arcilla. Cuando el agua pierde la velocidad, el material transportado se va depositando, donde las partículas con mayor densidad y de mayor tamaño (grava, diamantes, oro u otros minerales metálicos) serán los primeros en ser depositados, seguido de arenas y arcillas. La mezcla heterogénea inicial es segregada por la acción de la corriente de agua y la variación en su capacidad de transporte de partículas. Ocurre un proceso de clasificación o segregación natural una vez que las partículas son separadas de acuerdo su tamaño, densidad y forma (Rodrigues *et al*, 2000).

Otros factores que afectan las zonas de deposición de los diamantes y, consecuente, las áreas donde estos ocurren es la morfología de los márgenes y lecho de los ríos. Depresión, huecos, fisuras, canales o barreras son estructuras que alteran el curso y la capacidad de transporte de las aguas y constituyen puntos propicios para la acumulación de diamantes.

Condiciones geológicas y formación de los depósitos secundarios

En la formación de los depósitos secundarios se destacan principalmente los siguientes factores: la intensidad y la variabilidad de descarga, la cantidad y tamaño de material grava transportado por tracción, la velocidad de la corriente, el gradiente del sistema, la cantidad y tipo de vegetación, el clima, el tipo de fuente primaria/secundaria, el ambiente tectónico y la evolución geomorfológica del área.

Según Smirnov VI (1982), la formación de los depósitos secundarios depende de los siguientes factores:

Factor tectónico: para la formación y preservación de los depósitos secundarios tiene gran importancia los movimientos tectónicos que se anticipan, ocurren simultáneamente o son posteriores a su formación. Durante la formación de los depósitos aluviales los movimientos tectónicos de grandes bloques rejuvenecen la base de erosión local y en general crean condiciones para ciclos subsecuentes de actividades erosivas, los cuales forman depósitos secundarios ricos debido al lavado reiterado de los sedimentos fluviales.

Factor geomorfológico: los depósitos secundarios están directamente ligados a los elementos geológicos de la región. La formación de estas clases de depósitos está vinculada con la acción erosiva del río que estructuran sus perfiles longitudinales y transversales de equilibrio. Entre los factores geomorfológicos más favorables para la formación de los depósitos fluviales se destacan los siguientes: la existencia de un relieve accidentado de montaña moderada, con un sistema fluvial bien desarrollado.

Factor climático: las condiciones más favorables son propias de climas de zonas subtropicales y tropicales con una corteza de meteorización ideal.

Factor hidrológico: las mejores condiciones para la formación de los depósitos secundarios se manifiestan en los ríos con distribución irregular de masas de agua durante el año, debido a la cual la alteración de pequeñas y grandes cantidades de agua hace con que varía demasiado la velocidad de la corriente durante la deposición del material fluvial y consecuentemente la formación de los yacimientos de placer.

Formaciones sedimentarias antiguas de Angola

Las rocas del sistema continental intercalar, aparecen con una disposición sub-horizontal y son comunes, pueden haberse depositado en extensa depresión de sedimentación continental, centrados entre los movimientos postTriásico y la serie de movimientos Cretácico con que se relacionan las intrusiones kimberlíticas. De cierta manera, los afloramientos son raros y se sitúan con alguna visibilidad juntos de los valles.

Generalmente, existe dominio de gres de granulometría fina à media, de tono rojo y muy bien calibrado. De este modo, existen dos formaciones más antiguas, las cuales pueden estar ligadas a la acumulación de los depósitos secundarios de diamantes, nombradamente:

Formación de Calonda: pasado los grandes movimientos de formación de la superficie terrestre, es decir, pasado el diastrofismo, el cual está relacionado con las intrusiones kimberlíticas, durante y pasado la estabilización tectónica, sucedió la fase erosiva que provocó el desmantelamiento del relieve post-eruptivo, con llanura de las depresiones y zonas bajas por sedimentos del Cretácico Medio à superior, formado en condiciones climatológicas secas, con trombas de agua sazonales. Encontramos la formación dispersa por pequeñas porciones mascaradas por arenas ocreas. Son gres arcosos, friables, que se sobreponen a conglomerados basales. Puede acontecer que sean encontrados clastos de gres del sistema subyacente, bien como de rocas kimberlíticas aglutinadas por cemento gresoso, gresoso-arcilloso o caolinito-arcilloso

Sistema de Kalahari: Entre los sedimentos de Calonda y las disposiciones más recientes no se observan representaciones detríticas, por lo que ocurrió un periodo erosivo en que se construyó la pene-planicie del Terciario, muy perfecta, monótona, ocurriendo en un periodo árido.

Pasado este periodo, se verificó un nuevo ciclo de diastrofismo, deformando la pene-planicie que sufrió una inclinación en el sentido NW. En el fin del Terciario el clima se modificó de árido para húmido, originado así la red hidrográfica actual.

En el cuaternario, el clima fue alternando de clima húmedo y árido. Se formaron varios depósitos recientes, nombradamente arenas ocreas, que son responsables por la separación de los ríos adyacentes (interfluvios), depósitos de vertientes, terrazas fluviales, aluviones, entre otros (ver figura 12).

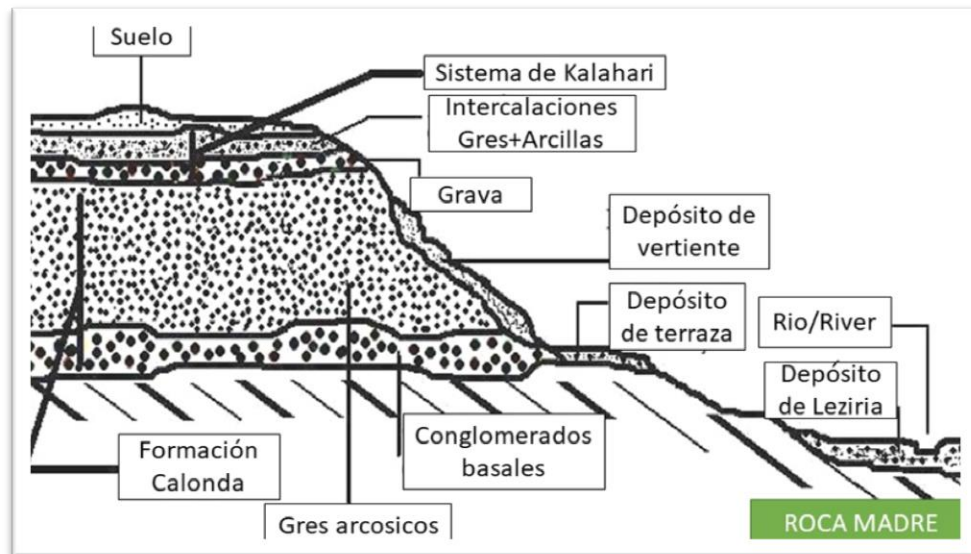


Figura 12. Representación de los tipos de depósitos secundarios con la posible concentración de diamantes según Moisés (2003). Modificado por De Fontes Pereira, 2019.

1.7 Conclusiones

1. Los depósitos secundarios en la concesión Gango están representados por la formación Calonda y Kalahari que son una de las formaciones sedimentarias más antiguas en el territorio.
2. La complejidad geológica de la concesión Gango, es el resultado de la evolución de diferentes eventos geológicos que experimentó el territorio en épocas geológicas, pasadas dando lugar a una amplia variedad de estilos tectonoestratigráficos, morfológicos y litológicos que influyen en la génesis, evolución y explotación de depósitos tanto secundarios como primarios.
3. El depósito secundario presenta características geológicas que pudieran dificultar la modelación y estimación de las capas de grava (pendientes, heterogeneidad de los materiales y diferentes niveles hipsométricos).

CAPITULO II: METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1 Introducción.

El objetivo fundamental de este capítulo es exponer el organigrama de trabajo seguido en el desarrollo de la investigación y ofrecer una descripción de los métodos y materiales empleados en la obtención de los datos litológicos y en la realización de la estimación y modelación del cuerpo en estudio.

2.2 Metodología de trabajo

La realización de la presente investigación tuvo lugar durante las prácticas laborales del primer semestre de cuarto año de la carrera de Ingeniería Geológica de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” desarrolladas en territorio angoleño a partir de la firma de un convenio de colaboración entre el Departamento de Geología de la Universidad “Agostinho Neto” y el Departamento de Geología de la institución mencionada anteriormente, que permitió a su autor una estancia de dos meses en las concesiones Gango y Quitubia del municipio Mussende, povincia de Cuanza Sur, Angola.

Los procedimientos empleados para la obtención de la información, parten de una primera etapa donde se desarrolló la búsqueda bibliográfica sobre los trabajos ejecutados en la región y el sector de estudio; además, de un análisis del estado del arte sobre la estimación mediante técnicas geoestadísticas y las realizaciones de pozos criollos en los depósitos aluviales–deluviales en la provincia de Cuanza Sur, concesión Gango. En la etapa experimental se procedió a obtener y procesar la información obtenida de la base de datos por la información que brindaron los pozos. En el organigrama se muestra el resumen del procedimiento para el procesamiento de los datos.

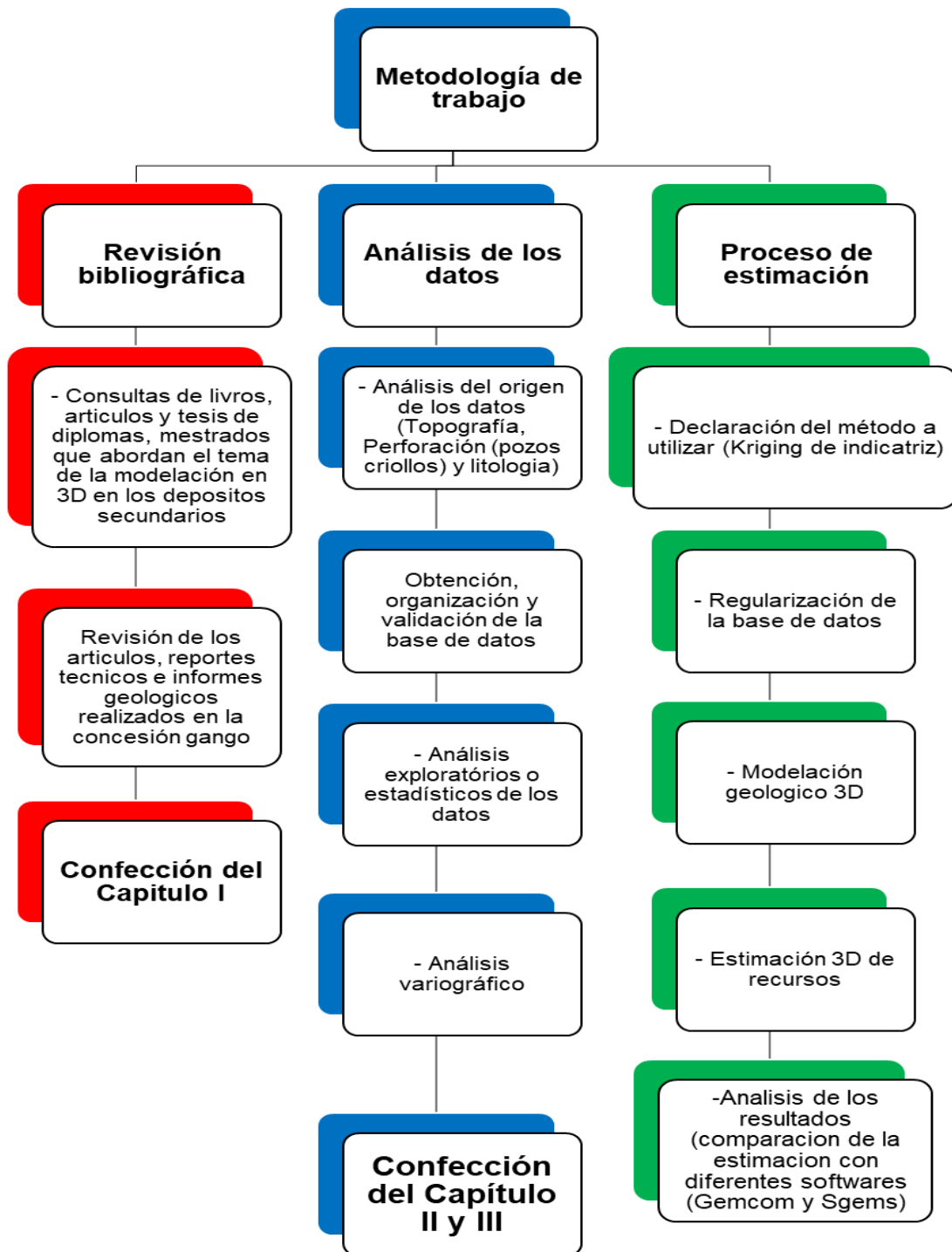
El organigrama propuesto corresponde con los análisis realizados desde la toma de los datos hasta la obtención del modelo y la evaluación de los resultados. Se procedió a integrar en una sola base de datos la información obtenida de los pozos criollos realizados, donde fue transformada a variable discreta (categórica) y validada para su posterior procesamiento, que consistió en determinar su compartimento espacial.

En la primera etapa (revisión bibliográfica) se consultaron más de 10 escritos, compuestos por libros, tesis y artículos de revistas, relacionados con la temática de la modelación y estimación 3D de depósitos aluviales, así como informes y reportes técnicos realizados por las empresas Sociedad Minera de Catoca, en el área de estudio. El resultado de esta etapa fue la elaboración del estado del arte (grado de investigación geológica del área de estudio) y la recopilación de las principales características geológicas del área de estudio.

La segunda etapa (análisis de los datos) agrupa el conjunto de procedimientos a realizar, previo a la estimación, con la finalidad de definir la cantidad, calidad y confiabilidad de los datos. El resultado principal de este período es la realización del análisis variográfico, que según Chica, (1983) es el punto de partida de un estudio geoestadístico y una de sus etapas fundamentales.

La tercera etapa (proceso de estimación) es el eje fundamental de la investigación, en ella se realizaron las tareas correspondientes al proceso de estimación desde la elección de los métodos a utilizar hasta la validación de los resultados. Su resultado principal fue la obtención de las estimaciones de capas de arena y grava en el depósito aluvial-deluvial sobre el kimberlito Lorelei.

En el flujograma siguiente, se refleja la metodología de trabajo empleada:



2.3 Materiales

A partir de los datos de ocurrencia de arena y grava obtenidos de los muestreos realizados en la red de perforación 50 X 200 m, se elaboró una base de datos en formato Microsoft Excel v. 2010© que contiene las columnas siguientes:

X (coordenada en la dirección este-oeste)

Y (coordenada en la dirección sur-norte)

Z (coordenada en la dirección vertical)

Desde (metro donde comienza el muestro)

Hasta (metro donde termina el muestro)

Prof. total (Profundidad total de los pozos)

Litología (Arena y Grava)

Arena (variable categórica)

Grava (variable categórica)

Esta base de datos fue exportada posteriormente a formato Microsoft Access v. 2010© para realizar las consultas pertinentes para el análisis estadístico y la elaboración del fichero con el formato establecido para ser introducido en el software SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software), con el cual se realizó la modelación y estimación. Se utilizaron además los softwares Surfer v. 12© y Gemcom v. 6.05©.

2.4 Origen de los datos de exploración

Los datos de exploración afortunadamente fueron cedidos por la Sociedad Minera de Catoca los cuales provienen de trabajos de campo realizados por sus investigadores. Su fuente principal son los levantamientos topográficos realizados.

Perforación

El total de pozos excavados en el área de estudio fue de 86, con dimensiones de 3 x 3 m², su profundidad normalmente va a depender hasta donde llega el horizonte de grava. Los pozos están separados entre sí por 50 m y dispuestos en perfiles con

dirección respectivamente SW-E, con una distancia de separación entre ellos (perfiles) de 200 m aproximadamente, configurando una red de exploración de 50 X 200 m.

Topografía

La determinación de los valores de x, y, z, registrados en la base de datos fueron tomados mediante registros de estudios de altimetría y el uso de GPS.

Litología

El perfil característico del depósito aluvial del área de estudio es básicamente compuesto por un horizonte de material estéril: arena y/o arcilla, sobrepuesta de un horizonte mineral (grava diamantífera). El horizonte de material estéril es esencialmente compuesto por arenas de granulometría fina a media (0,5 a 2mm), fragmentos de cuarzos, feldespatos y presencia de minerales satélites de diamantes o indicadores de kimberlitos. Así como también los minerales de hierro (magnetita, hematita, etc). La grava presenta predominantemente una coloración rojiza y blancuzca. La grava se puede describir como:

Grava latéritica: sus clastos se encuentran involucrados a una matriz arenosa rojiza, a veces semirojiza (característica típica de las regiones tropicales), esta coloración se debe a la descomposición de rocas con elevados porcentajes de óxidos de hierro. Esta grava tiene una variación en la granulometría, cuyo predominio va de media a gruesa (0,5 a 2 cm), son angulosas a sub-angulosas, mal seleccionadas y se disponen de una matriz arenosa (ver figura 13 y 14).



Figura 13. Pozo criollo, muestra de pequeño volumen con grava laterítica.

Grava limo-arenoso blancuzca: está involucrado en una matriz limosa blancuzca; su composición es predominantemente constituida por fragmentos de cuarzo con una granulometría que varía de 0,5 a 1 cm. Sus granos son mayormente sub-redondeados, acompañados de otros materiales detríticos con tamaños inferiores (arena, limos, arcillas), normalmente en este tipo de grava hay mayor concentración de diamante. Esto no es solamente porque los trabajos de prospección y exploración realizados a lo largo de la concesión han comprobado, pero también, esta es la grava preferible de los garimpeiros que se infiltraron en el área de estudio.



Figura 14. Pozo criollo, muestra de pequeño volumen con grava limo-arenoso.

2.5 Método geoestadístico aplicado

Regularidades de la estimación por KI

En términos geológicos el Krigeado consiste en encontrar la mejor estimación lineal posible de la ley de un bloque o zona, considerando la información disponible, es decir las leyes de las diferentes muestras que se han tomado, sea al interior, sea al exterior del bloque que se quiere estimar (Cuador, 2004).

El kriging aparece en muchas formas de acuerdo si se conocen, la media, la distribución de probabilidad de $Z(s)$, si las predicciones son hechas para puntos o áreas y así sucesivamente.

La ventaja del kriging sobre los métodos determinísticos es la estimación de la varianza del error de predicción, lo cual permite además estimar intervalos de confianza para dicha predicción además de que el kriging es un método de estimación que da el mejor estimador lineal insesgado (cuando se cumplen todos los supuestos). Donde:

- Lineal: porque es una combinación lineal ponderada de los datos.
- Insesgado: porque el error de estimación tendrá una media igual a 0.
- Mejor: en el sentido de que el error de la varianza se hace mínima para un modelo dado de covarianza / variograma, en ese caso sería un modelo de variograma.

La precisión del estimador usado depende de varios factores:

1. El número de muestras tomadas.
2. La calidad de la medición en cada punto.
3. Las ubicaciones de las muestras en la zona.
4. Las distancias entre las muestras.
5. La continuidad espacial de la variable atributo en estudio es más fácil.

Dentro de las variedades del kriging tenemos el kriging de indicatrices, el cual se utilizará para la estimación en este trabajo, debido a que esta variante estima la

probabilidad de ocurrencia de las variables en estudio, en este caso variables categóricas (variables independientes). En el siguiente epígrafe se muestra una metodología para la utilización del Krigeado de indicatrices.

2.6 Metodología para la construcción del modelo 3D de grava, según algoritmo el Krigeado de indicatrices

La secuencia metodológica para la construcción del modelo de bloque de las capas de grava mediante el algoritmo Krigeado de indicatrices, según Rustan (2018) fueron los siguientes:

1. Creación de un fichero de datos con la información obtenida de los pozos criollos.
2. Creación de un vector de indicadores binarios [0,1] por cada dato, que indica la ausencia o presencia (cero o uno respectivamente) de grava:

$$S(X_i) = \begin{cases} 1 & \text{Si } X_i \leq Z(x_i) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \begin{matrix} (grava) \\ (arena) \end{matrix} \text{ dónde:}$$

$Z(x_i)$ = valor de la variable en el punto x_i

3. Creación de un “grid” de almacenamiento de los indicadores para el análisis y procesamiento de los datos.
4. Análisis variográfico de los indicadores. Estudio y definición de la anisotropía de los indicadores según las direcciones horizontales y pozo abajo (vertical).
5. Aplicación del modelo probabilístico de la estimación por Kriging de Indicatrices de variables categóricas en una red de nodos o bloques de 12.5 x 12.5 x 1 metros.

Al final se calculó el modelo probabilístico como soporte para obtener el modelo de bloque de la grava, asignándole al nodo el valor de aparición según, si $\rho^*Z(x_i) \geq \rho(gr)$ entonces, Horizonte de grava (1), de lo contrario Horizonte de arena (0). Dónde:

$\rho^*Z(x_i)$ = Probabilidad estimada (modelo probabilístico) en el punto x_i

$\rho(gr)$ = Probabilidad de ocurrencia de grava.

2.7 Conclusiones

1. Se verificó la confiabilidad en el origen de los datos de exploración, en cuanto a la ubicación espacial de los datos, método de muestra de pequeño volumen y la descripción de los pozos.
2. Se definieron dos tipos de gravas en el área de estudio por sus características físicas, de las cuales la limo-arenosa es la que más aporta el mineral diamante.
3. La base de datos contiene toda la información necesaria para la aplicación del método KI.

CAPÍTULO III: MODELACIÓN 3D DEL HORIZONTE DE GRAVA EN EL DEPÓSITO SECUNDARIO, CUERPO KIMBERLÍTICO LORALEI

3.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los principales resultados con las interpretaciones geológicas de las posibles zonas de acumulación de diamante en el horizonte de grava del depósito secundario sobre el sector Sudeste de la chimenea Lorelei.

El análisis exploratorio de datos se realizó para cada variable en cada horizonte, siguiendo los perfiles de pozos criollo en de la red de exploración. El área de estudio se limitó donde existió la mayor concentración de pozos de exploración, se excluyeron los pozos criollos localizados en el extremo sur y norte del sector, por encontrarse de forma aislada.

La estimación se realizó en cada horizonte litológico (grava, arena) mediante el método Kriging de Indicatrices, lo que permitió determinar la distribución espacial de los sedimentos prospectivos para la acumulación de diamantes.

3.2 Datos de la exploración

La distribución de los pozos criollos realizados y su profundidad con los espesores de cada horizonte litológico fueron obtenidos de la campaña de perforación realizada por la Sociedad Minera de Catoca, a una red espacial de exploración de 50 m en el eje de coordenadas (x; y) con una longitud de muestreo promedio en los sedimentos de grava de 0.20 a 5.30 m y en los de arena de 0,10 a 4,80 m en la dirección vertical.

La base de datos (BD) de trabajo contiene 236 registros, pertenecientes a 75 pozos criollos o calicatas en una red 50 x 200 m. La selección de los pozos criollos utilizados se basó en la representatividad de los pozos y continuidad lateral de los mismos en cada perfil de exploración, en total fueron usados 71 pozos criollos durante el estudio exploratorio de datos y la estimación de los horizontes litológicos.

Los datos fueron provistos en formato Access y sometidos a un proceso de validación que permitió corregir los errores comunes que ocurren en la confección de la base de datos y que pudieran distorsionar la estimación. Las coordenadas de los pozos criollos fueron transformadas por la Sociedad Minera Catoca, por cuestiones de seguridad de

las reservas diamantíferas en el área de estudio y de las informaciones peculiares relacionadas con este depósito.

El agrupamiento del registro se realizó en 2 litologías con profundidades muy variables, las cuales fueron: Horizonte de Arena y de Grava (ver tabla 1).

Tabla 1. Características generales de los horizontes de sedimentos grava y arena.

Sedimento	Descripción macroscópica	Horizonte
Arena Roja (Oxidada)	Granulometría fina-media con presencia de óxidos de hierro	1
Arena Blancuzca (Silicatadas)	Granulometría fina-media con presencia de Cuarzo y Feldespatos	
Grava roja (Oxidada)	Granulometría media-gruesa con presencia de minerales satélites de diamante (ilmenita, cromita, piropo)	2
Grava Blancuzca	Granulometría media-gruesa, presencia predominante de cuarzo y minerales satélites de diamantes	

Las características diferenciales de los sedimentos de grava y arena se agruparon dentro la base de datos para los análisis geoestadísticos y en la modelación 3D, debido a que no se hizo una caracterización particular y detallada en cada pozo criollo de exploración en el área de estudio.

Los horizontes descritos fueron transformados en variable indicadoras para realizar la estimación de probabilidad de ocurrencia o distribución de los horizontes dentro del área de estudio. Los registros de la base de datos identificados como arena son los de mayor representatividad con 59.3 %, en relación al horizonte de grava con un 40.7 %. La probabilidad de ocurrencia de cada una las variables se muestran en la figura 15.

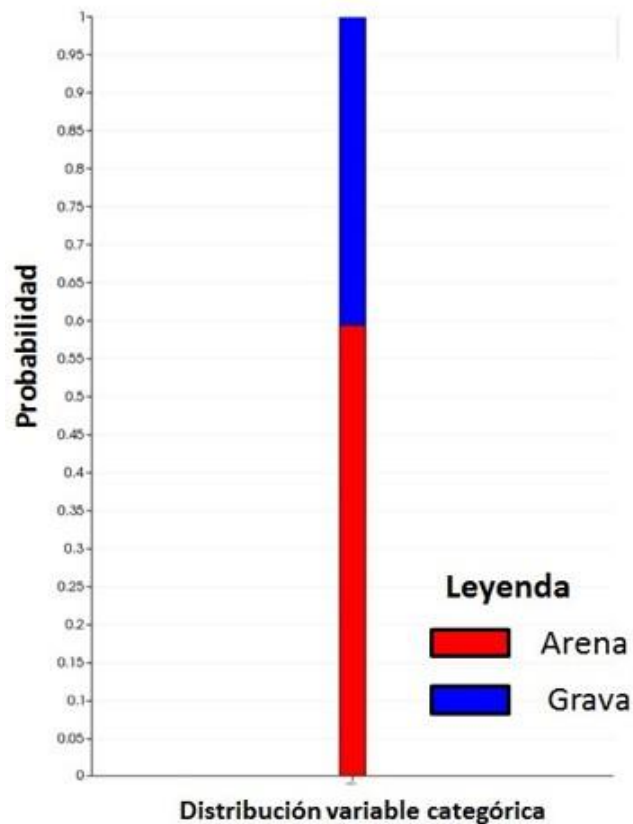


Figura 15. Probabilidad de ocurrencia de arena y grava en el depósito secundario.

3.3 Regularización de la base de datos

La regularidad en la distribución de las muestras obtenidas en los pozos es un requisito indispensable para la realización de una correcta estimación. Los estudios geoestadísticos se hacen más representativos cuando la distribución espacial de los datos es homogénea, pues existe una equidistancia entre pozos y entre las longitudes de las muestras (Núñez, 2017).

En la ejecución de las exploraciones geológicas no siempre se puede mantener la equidistancia de los pozos y de las muestras en profundidad, esto depende de las condiciones del terreno y las características de los elementos geológicos en estudio, entre otros aspectos. En sector de estudio no existe regularidad de los datos, por lo que fue necesario realizar una regularización de los datos en la dirección vertical. Este proceso permitió preparar los datos antes de la estimación, la ubicación de las coordenadas de las muestras se desplazó virtualmente del lugar original donde fueron referidas y se generan nuevos intervalos a partir de promedios de diferentes muestras.

Entre los ejercicios de la validación aplicada a la base de datos se tienen las siguientes:

- 1) Coordinadas repetidas en los pozos de exploración
- 2) Desde y/o hasta repetidos en un mismo intervalo de pozo
- 3) Elevaciones erróneas de la cota de los pozos
- 4) Distancia entre perfiles erróneos de las redes de exploración aplicada
- 5) Discontinuidad en el registro de cada intervalo del pozo de exploración
- 6) Solapamiento de capas de arena en horizontes de gravas en algunos intervalos (horizonte).

La magnitud de los errores detectados fue despreciable y, en sentido general, los datos presentan la calidad requerida para ser usados en los diferentes estudios geoestadísticos y de estimación de recursos.

El análisis realizado arrojó que las muestras de grava fueron tomadas a intervalos promedio de 1 m de longitud, las de arena con 0.10 m de longitud, los pozos fueron perforados a una distancia de 50 m entre pozos en la dirección del perfil de exploración, por lo que no fue necesario realizar la regularización en la base de datos la distribución entre pozos.

3.4 Análisis exploratorio de los datos

El análisis exploratorio de los datos permitió desplegar los mismos en diferentes formas, caracterizar estadísticamente la variable estudiada (profundidad), determinar la distribución que rige el comportamiento de los datos de perforación, detectar la presencia de valores extremos o poblaciones mixtas que puedan influir negativamente en el procesamiento geoestadístico, y estudiar la correlación existente en la variable por horizontes.

Estos exámenes se realizaron en los dos horizontes en que se dividieron los datos (Arena y Grava) para una sola red de exploración (50 x 200 m). Las desviaciones identificadas sirvieron de base durante el estudio variográfico y el proceso de estimación de los recursos.

3.4.1 Despliegue de los datos

El despliegue de los datos se realiza con el objetivo de visualizar en 2D y 3D los datos de la exploración y representar la red de perforación y muestro en que fueron tomados.

En este caso, se desplegó el espaciamiento de los pozos siguiendo los perfiles de los pozos criollos de exploración. La exploración dentro del sector se concentró en las zonas con posibilidades de acceso, por lo que no se pudo contar con la totalidad de los pozos de exploración, esto generó la existencia de pequeñas zonas donde no se realizaron perforaciones; lo cual provoca la inexistencia de datos en esos puntos, donde la estimación se realizara por interpolación del estimador (ver figura 16).

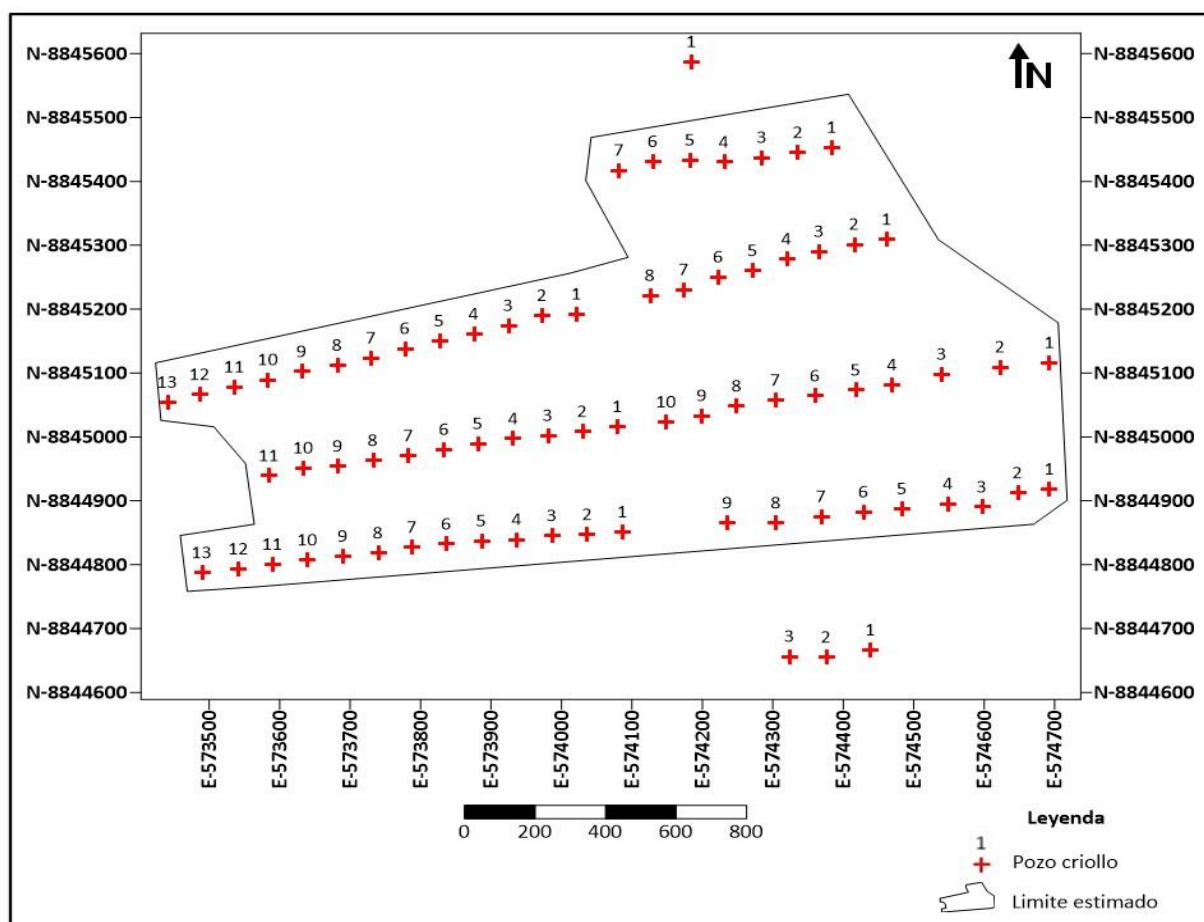


Figura 16. Ubicación geográfica de los pozos criollos según los perfiles de exploración.

La distribución de los perfiles muestra que existen dos zonas con un mínimo de pozos de exploración, hacia el sur se excluyeron de la estimación tres pozos y hacia la zona norte un pozo.

El comportamiento de la distribución de la capa de grava y de arena en todo el sector es muy variable, los mayores espesores se localizan principalmente hacia el oeste y norte del sector, llegando alcanzar valores puntuales de hasta 4.2 m de espesor de arena. Los mayores espesores de grava se localizan hacia el sur, aunque se puede apreciar que el mismo es variable dentro del área de estudio (ver figura 17).

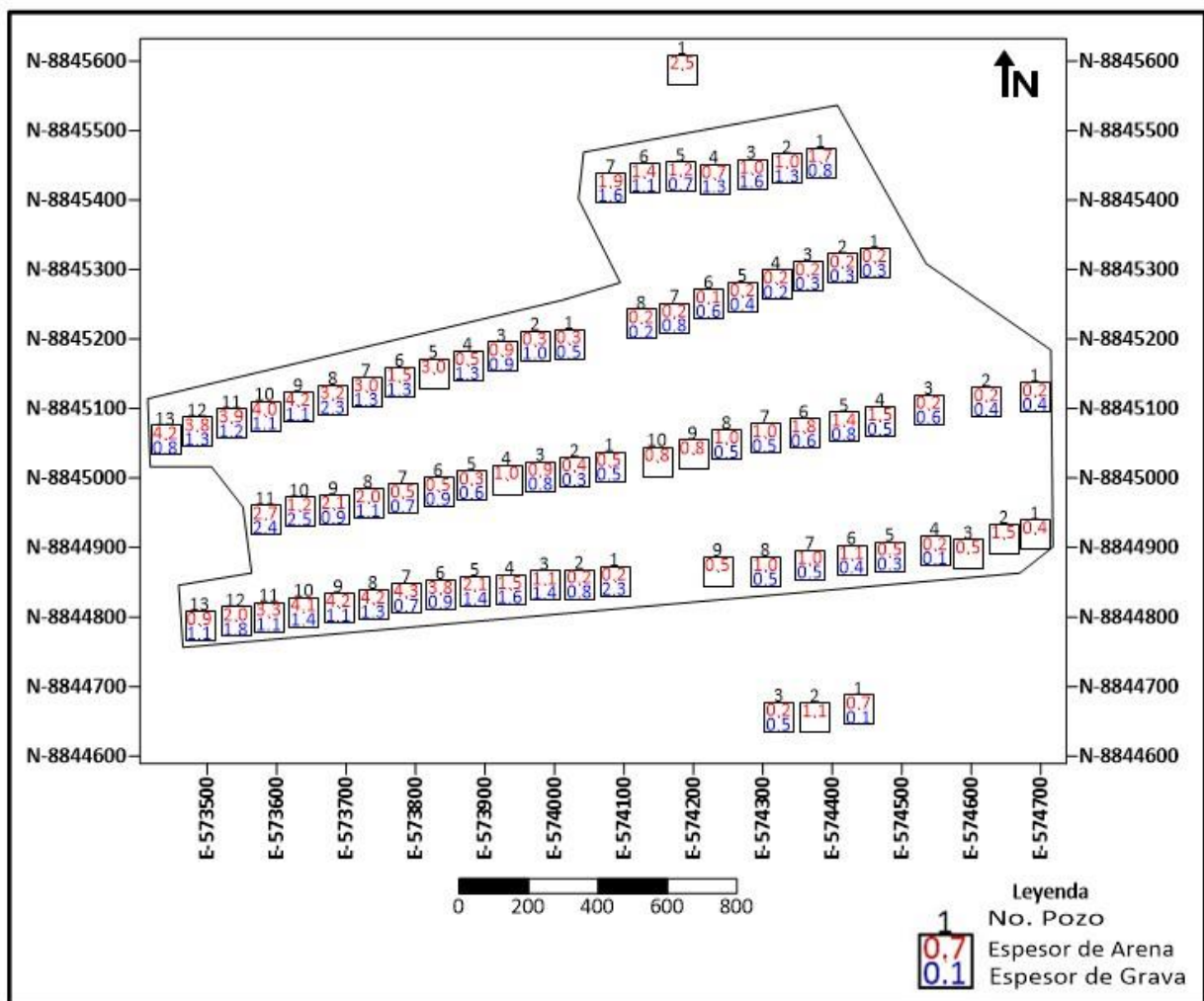


Figura 17. Distribución de los espesores de Arena y grava, en los pozos criollos de exploración.

Los espesores de los horizontes de grava y arena son muy bajos, para una mejor representación de los datos en el modelo de bloques y perfiles de trabajo, se procedió a multiplicar por 10 los intervalos en profundidad de cada pozo.

El despliegue de los datos en 3D alerta sobre la ocurrencia de pequeñas intercalaciones de un horizonte en otro y la ausencia del material de grava en algunos pozos.

3.4.2 Estadística básica

El análisis estadístico de los diferentes niveles de profundidad en la ocurrencia de horizontes de arena y grava obtenidos de los pozos criollos de exploración se realizó con el objetivo de evaluar la distribución y estructura espacial de los horizontes. En el análisis univariado se calcularon los estadígrafos fundamentales de tendencia central, dispersión y forma, además de la construcción de los histogramas para la variable en cada horizonte.

En ambas varianzas tanto para la profundidad en arena (2.61) como para la profundidad en grava (2.73) no observan valores muy altos, lo que representa una baja dispersión de ambos datos con respecto a sus medias y una definición de cada población.

El valor de coeficiente de variación de la arena (0.72) con respecto al valor de la grava (0.70) es ligeramente más alto, confirmando una ligera dispersión mayor en el horizonte de arena en relación al de grava, ambos valores de dispersión fueron influenciados por valores extremos que generan una distribución asimétrica irregular (ver tabla 2).

Tabla 2. Estadígrafos globales para los datos de profundidad de los horizontes de Arena y Grava.

	Profundidad	
Variable	Arena	Grava
Mínimo	0.40	0.40
Máximo	5.50	5.50
Moda	0.50	1.50
Media	2.24	2.37
Mediana	1.80	1.95
Varianza	2.61	2.73
Desv.Est.	1.62	1.65
Coef.Var.	0.72	0.70

3.4.3 Análisis de los valores extremos en la distribución

En la tabla 3 se aprecian los valores del skewness (0.75 para la arena y 0.63 para la grava), los cuales indican una asimetría de los datos con respecto a la media, haciendo las distribuciones asimétricas hacia la izquierda para ambos casos.

Los valores de la curtosis parte revelan las distribuciones de frecuencia platocúrtica (curtosis menor 0), con colas relativamente más livianas, lo que refleja una distribución sin apuntamiento en relación a la distribución normal (ver tabla 3).

Tabla 3. Estadígrafos de distribución de forma horizonte de Arena y Grava.

	Profundidad	
Variable	Arena	Grava
Skewness	0.75	0.63
Curtosis	-0.69	-0.92

El reflejo de estos parámetros de forma se puede apreciar en los histogramas de frecuencia de la variable para cada horizonte (ver figura 18 y 19). La distribución de las variables en los histogramas muestra que no existe una tendencia a la distribución normal de los horizontes en estudio.

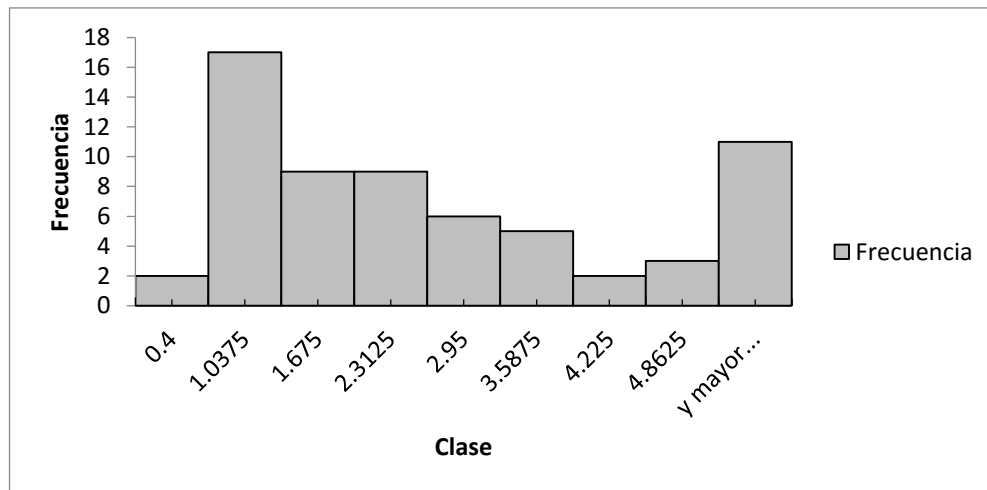


Figura 18. Histograma de frecuencia del horizonte de grava.

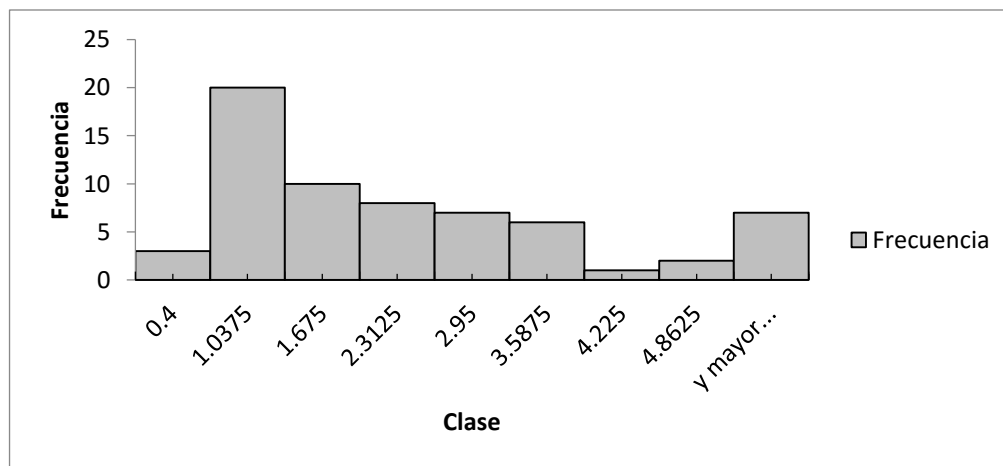


Figura 19. Histograma de frecuencia del horizonte de arena.

3.5 Análisis variográfico

El análisis estructural que fue llevado a cabo mediante la construcción de los semivariogramas de indicatrices, variogramas experimentales en las direcciones horizontal y vertical con el objetivo de detectar la existencia de anisotropía y determinar las direcciones de mayor y menor continuidad espacial.

El análisis escritural que permite describir el comportamiento de la continuidad espacial de los horizontes de grava, fue realizado mediante la construcción de variogramas en el plano horizontal y en la dirección perpendicular (ver tabla 20).

Lags

Number of lags: 10

Lag separation:

Lag tolerance:

Directions

Number of directions: 4

tol: bandwidth:

Angles are in degrees. Use a tolerance tol > 90 to indicate an omni-direction.

	azimuth	dip	tolerance	bandwidth	measure type	rad indic. cut	all indic. cut
1	0	0			variogram		
2	45	0			variogram		
3	90	0			variogram		
4	135	0			variogram		

Figura 20. Ejemplo de ventana de entrada de los parámetros de variogramas.

En la tabla 4, se agrupan los parámetros utilizados en la realización de los variogramas experimentales, en la dirección vertical se usaron los mismos parámetros para la confección del variograma (ver tabla 4).

Tabla 4. Parámetros utilizados en la confección de los variogramas horizontales y verticales.

Parámetro	Horizontal	Vertical
Number of lags	10	10
Separación del Lag	50	50
Azimut	0 ⁰ , 45 ⁰ , 90 ⁰ , 135 ⁰	0 ⁰
Dip	0	90
Tolerancia	22.5	22.5
Band width	50	50

El ajuste de los modelos experimentales de los semivariogramas a un modelo teórico fue realizado según la metodología clásica para la interpretación y modelaje de variogramas.

La variable en análisis se compone de una variable aleatoria independiente, la cual tiene su propia estructura de variograma (Gringarten, Deutsch, 2001), este modelo

general puede ser escrito mediante la siguiente expresión: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = C_0 + C_1 \text{Modelo}(a_x, a_y, a_z) + C_2 \text{Modelo}(a_x, a_y, a_z) + \dots + C_i \text{Modelo}(a_x, a_y, a_z)$.

El valor del efecto pepita (C_0) y la meseta (C_i) se corresponde con un modelo teórico con sus alcances (a_x, a_y, a_z) en las diferentes direcciones del espacio tridimensional (ver tabla 5).

Tabla 5. Resultado de los parámetros del modelo teórico ajustado.

	Varianza por estructura	Modelo de Variograma	Alcance Horizontal (m)	Alcance Vertical (m)
Efecto Pepita	0.001			
Estructura 1	0.101	Espherical (Esf)	40	30
Estructura 2	0.146	Exponencial (Exp)	300	30

El modelo obtenido se presenta en la suma del efecto pepita y dos microestructuras, según se muestra a continuación: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.001 + 0.101 \text{ Esf}(40, 40, 26) + 0.146 \text{ Exp}(300, 168, 28)$.

El análisis de los variogramas direccionales permitió determinar dos variogramas, uno horizontal y otro vertical, trabajando con dos variables durante el análisis geoestadístico.

El comportamiento en los semivariogramas experimentales de indicadores en los horizontes, muestran que existe anisotropía de tipo geométrica en las direcciones horizontales (influencia en los cambios del alcance). La anisotropía corresponde a la capa de Arena con un alcance máximo de 400 m en la dirección azimut 90N.

En el caso del variograma vertical presenta una continuidad espacial sin que el variograma alcance una meseta dentro del rango determinado y no se muestran cambios significativos, debido a que es calculado perpendicular al plano horizontal, en dirección vertical del perfil. El efecto pepita se manifiesta en el análisis variográfico, lo cual puede deberse a errores en el muestreo o en la caracterización del tipo de materiales.

3.6 Estimación 3D del horizonte de arena y grava

El modelo de bloques (MB) en 3D realizado acorde a las características geométricas del polígono estudiado tiene dimensiones de 125 x 70 x 90 m. En su confección se utilizaron los perfiles de exploración 50 x 200 m como referencia para la realización de la estimación, pudiendo así obtener el modelo de bloque estimado mediante el método Kriging de Indicatrices.

La definición del tipo de horizonte (arena y grava) dentro del modelo de bloques se realizó mediante el establecimiento de dominios definidos a partir de datos de estimaciones de probabilidad, realizados mediante la técnica de Kriging de Indicatrices. En este pronóstico se utilizaron 86 291 bloques tabulados dentro del área definida para la estimación, 51 479 pertenecen al horizonte de arena y 34 812 pertenecen al horizonte de grava.

En la tabla 6 se muestran los datos de estimación de la probabilidad de ocurrencia de los horizontes para el modelo de GEM y el modelo de SGeMS, donde este último muestra una menor probabilidad de ocurrencia del horizonte de grava (ver tabla 6 y figura 21).

Tabla 6. Modelo de probabilidad para cada horizonte.

Horizonte	Probabilidad		
	Pozo Criollo	Modelo GEM	Modelo SGeMS
Arena	0.65	0.60	0.69
Grava	0.35	0.40	0.31

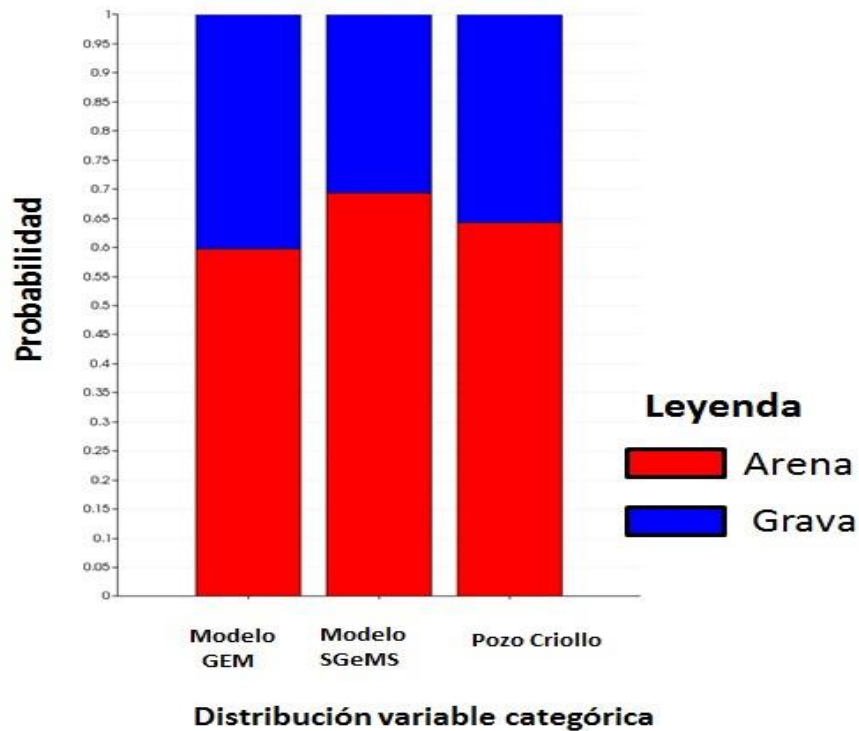


Figura 21. Distribución de probabilidad del modelo GEM, SGeMS y Pozo Criollo del horizonte de grava y arena en el sector de estudio.

La estimación con SGeMS se realizó para validar y evaluar la efectividad del estimado por GEM. Los resultados muestran que el modelo GEM presenta una mayor probabilidad de ocurrencia del horizonte de grava que en relación al modelo de SGeMS y los datos obtenidos de los pozos criollos.

En estimación del modelo SGeMS se utilizó el método de estimación por Krigeado de Indicatrices y para el modelo de GEM se utilizó el método tradicional de perfiles. La selección de los dominios verticales de arena y grava en el modelo GEM permitieron separar y estimar con mayor precisión los datos de los pozos criollos de exploración. En el modelo de SGeMS la estimación se realizó de forma global, sin la selección de dominios verticales, incluyendo las intercalaciones de los diferentes horizontes de forma global.

La estimación se realizó utilizando el software Gemcom v. 6.4© y SGeMS v.3©, donde se obtuvieron los modelos de bloques 3D probabilístico para el horizonte de arena y para el horizonte de grava.

El horizonte de arena se localiza de forma general en toda el área de estudio, sobreyaciendo el horizonte de grava, según se muestra en la figura 22.

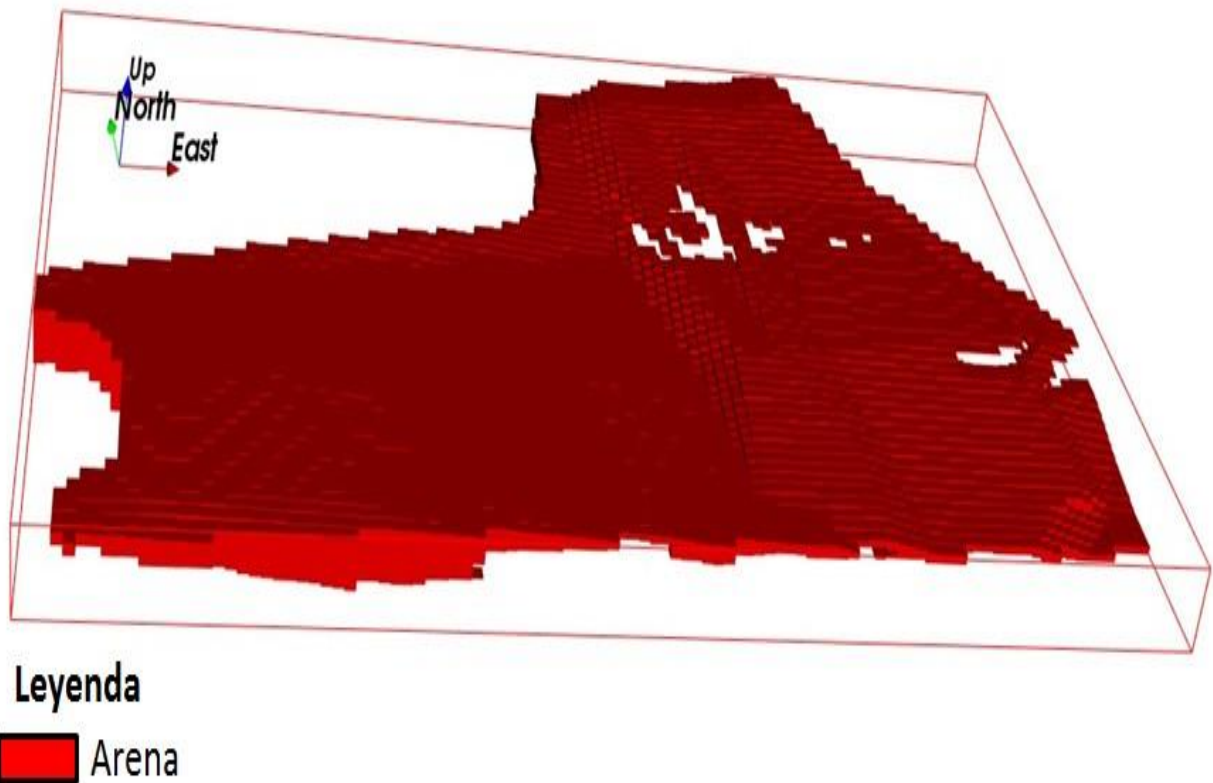
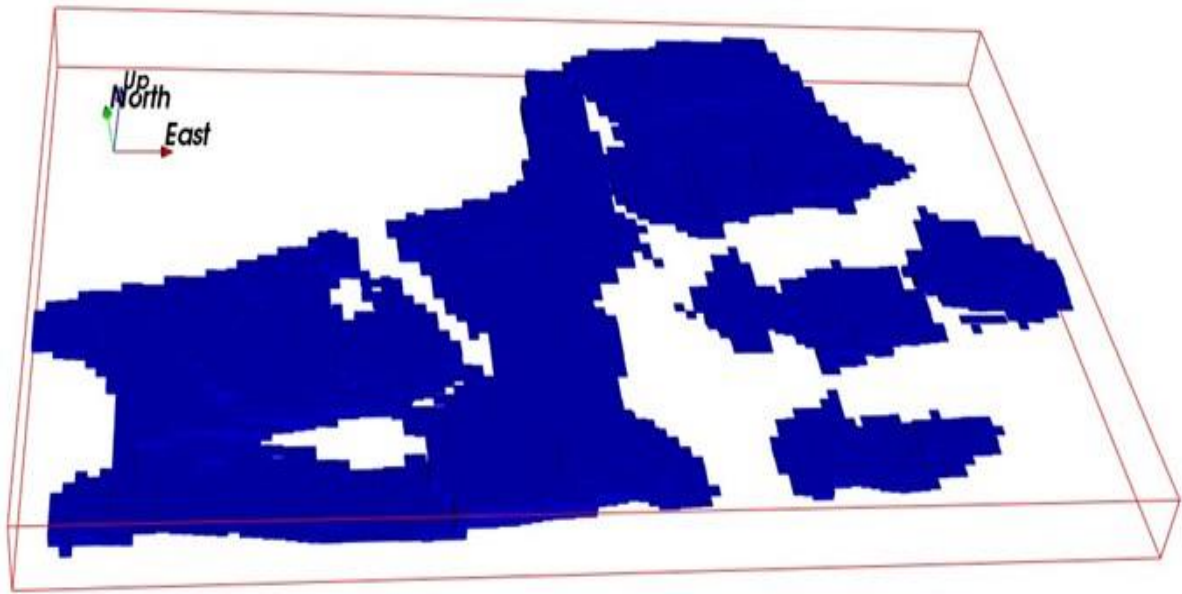


Figura 22. Distribución 3D del horizonte de Arena, modelo de bloques SGeMS vs pozos criollos de exploración

La evaluación se orientó a la caracterización espacial del horizonte de grava, dada la importancia del pronóstico de acumulación de diamantes procedentes del cuerpo kimberlítico Lorelei (ver figura 23).



Leyenda

 Grava

Figura 23. Distribución 3D del horizonte de Grava, modelo de bloques SGeMS vs pozos criollos de exploración.

Según el valor estimado en el SGeMS, la variable de interés presenta una continuidad espacial muy irregular, información que se acepta, debido a la complejidad y variabilidad que presenta el medio geológico. En el caso del estimado en el GEMCOM presenta una continuidad espacial muy regular, (ver anexo 4).

Para una mejor interpretación de la continuidad lateral del horizonte de grava se elaboró dos perfiles, los cuales se les hace un análisis comparativo del modelo estimado en SGeMS versus pozos criollos (ver figura 24).

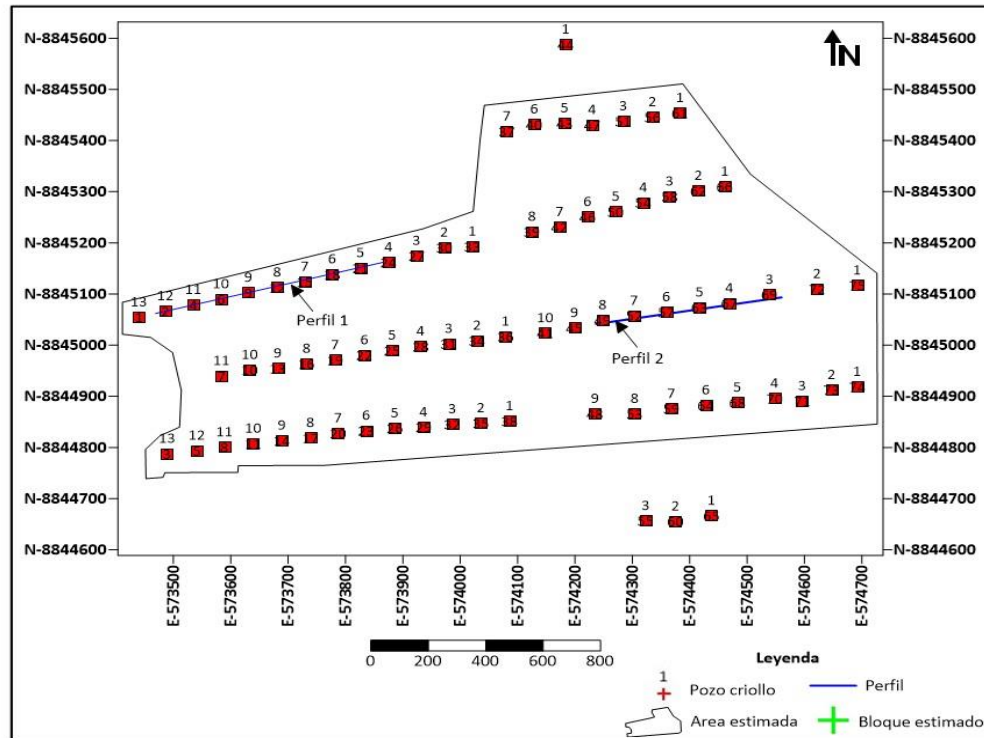


Figura 24. Mapa de ubicación de los perfiles en el sector estimado.

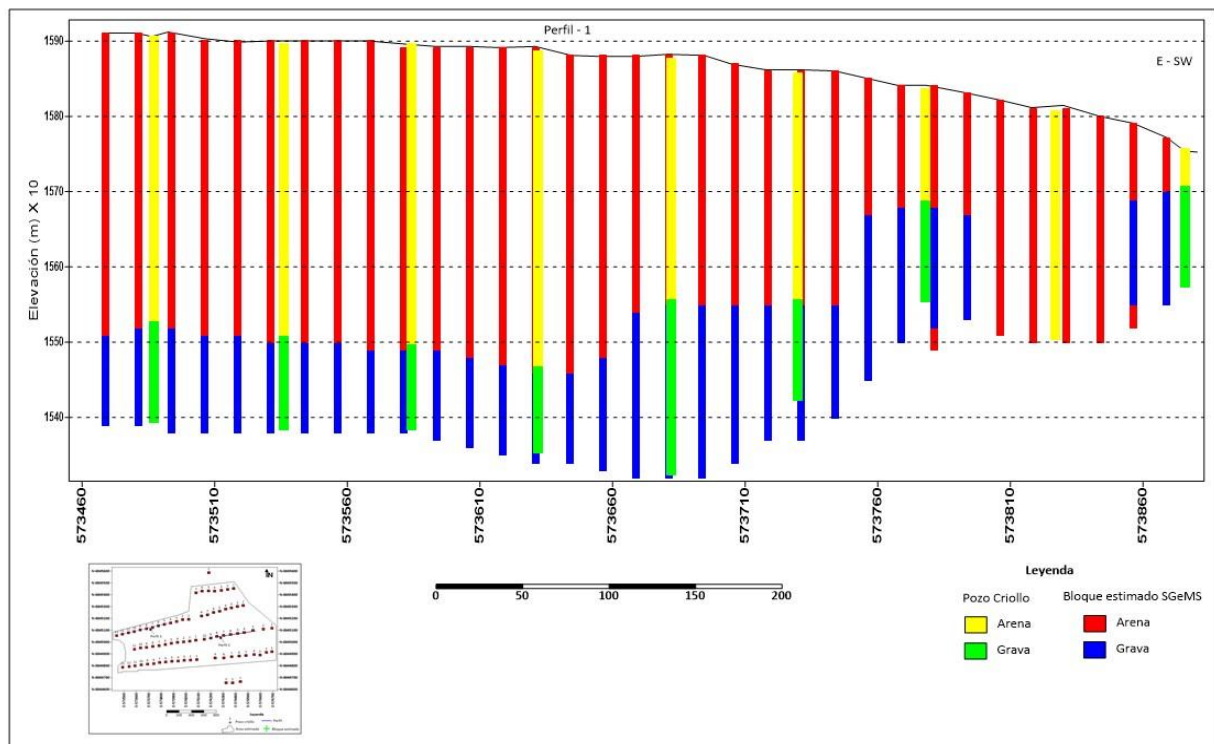


Figura 25. Perfil-1 en el sector estimado.

En el Perfil-1, el modelo estimado y los pozos presentan una similar continuidad lateral que a su vez es irregular para los dos horizontes en una dirección SW-E con variaciones en el espesor. En la zona este del perfil se notó la ausencia del horizonte de grava en uno de los pozos, eso por la complejidad geológica del medio, es decir, pudiera haber ocurrido un receso en la sedimentación de material de grava (ver figura 25).

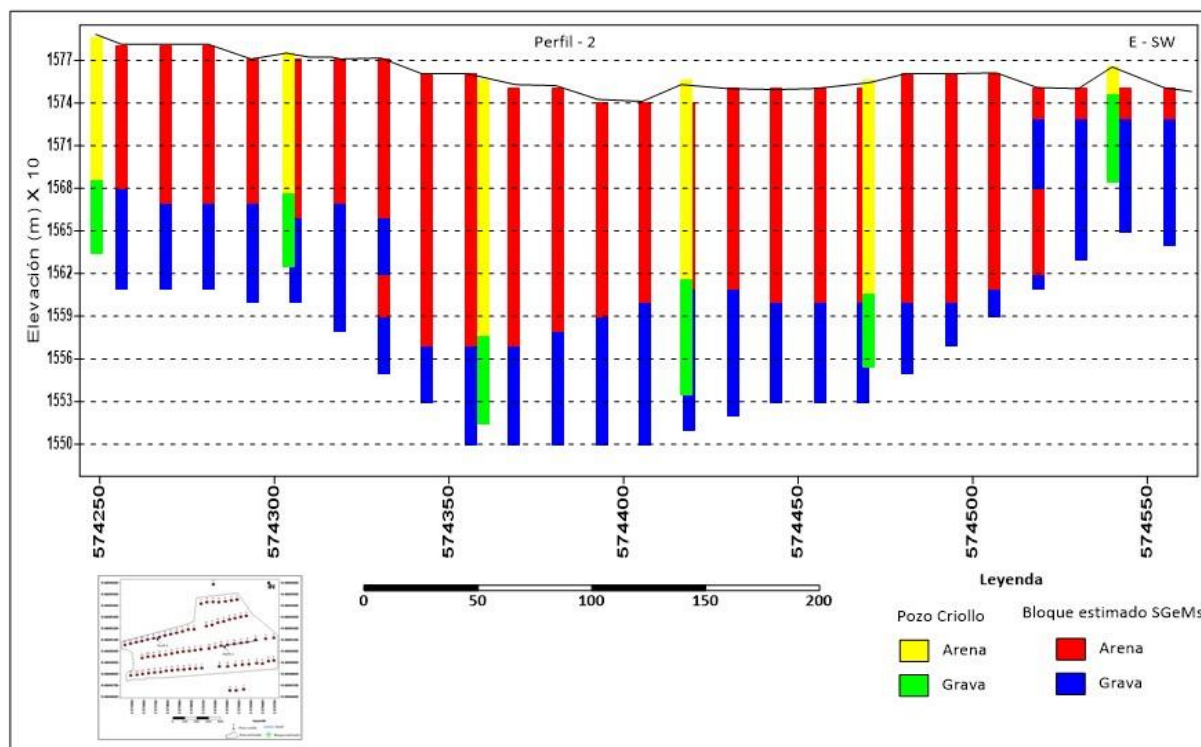


Figura 26. Perfil-2 en el sector estimado.

En el Perfil-2 el modelo estimado y los pozos presentan diferente continuidad lateral, que a su vez es irregular para los dos horizontes en una dirección SW-E con variaciones en el espesor. En este perfil el modelo estimado determinó intercalaciones de arena con grava, es decir, debido a la alteración de un material por otro en la fuente suministradora y el tiempo de duración del proceso de sedimentación, datos que se obtuvieron por la estimación y se ocultaron en la descripción de los pozos. (ver figura 26).

A partir del modelo de bloques de SGeMS se obtuvo un mapa de pronóstico de los espesores del horizonte de grava y se determinaron las zonas perspectiva acumulación de diamantes (ver figura 27).

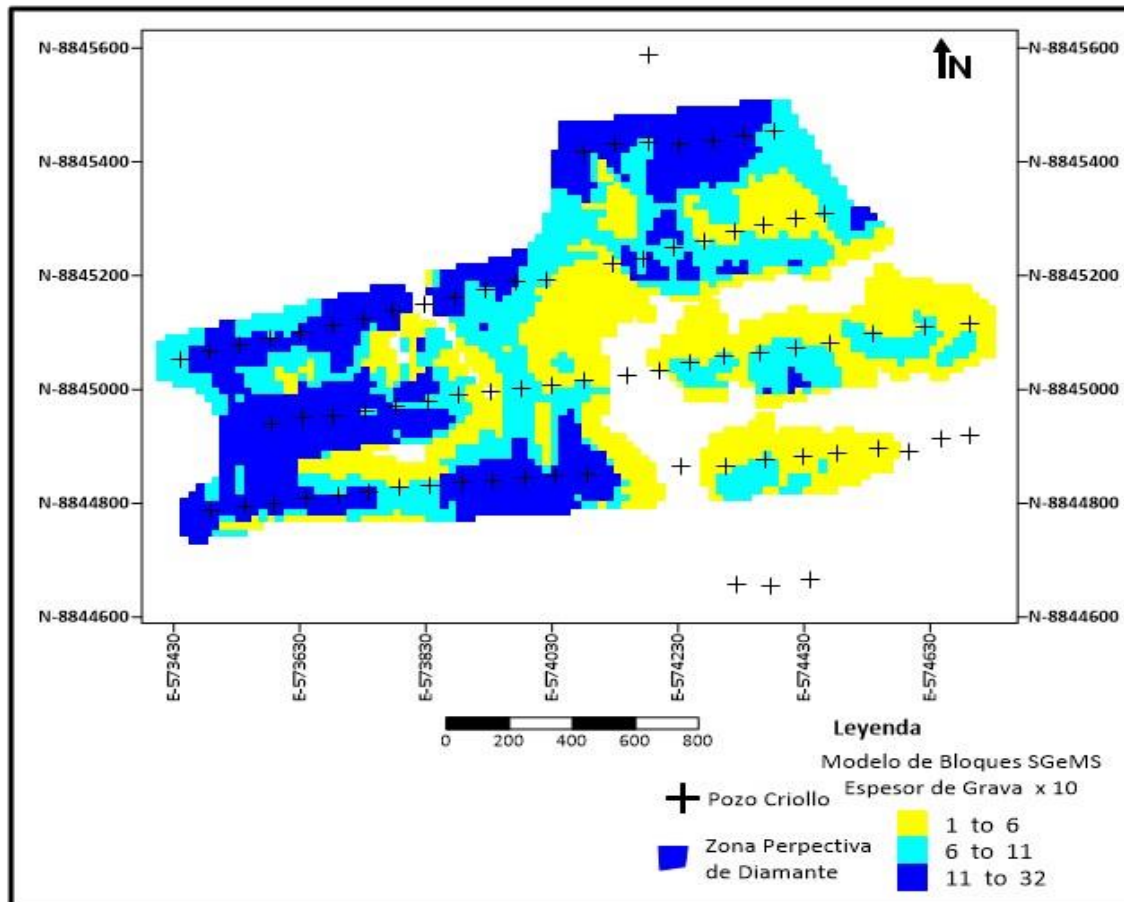


Figura 27. Mapa pronóstico de acumulación de diamantes, según espesor del horizonte de grava, sector del cuerpo Kimberlítico Lorelei.

Los mayores espesores del horizonte de grava se localizan hacia el oeste del sector, donde alcanzan valores de 1.1 a 3.2 m de espesor de grava considerando así a la zona de mayores espesores, como zona perspectiva de acumulación de diamante.

3.7 Conclusiones

1. La modelación estadística utilizando el método de kriging indicatrices permitió obtener un modelo de bloque 3D en cada software de estimación.

2. El estudio variográfico demostró que la dirección de mayor continuidad espacial que pudieran tener las capas de grava es de 90^0 .
3. El modelo 3D que más se consideró fue el que se estimó en el software SGems” eso por la continuidad espacial muy irregular de las gravas las cuales muestran que hay una complejidad geológica en el sector de estudio. Sin embargo, el software GEMCOM la continuidad espacial de las gravas es muy regular y similar al de los pozos, eso debido a que se utilizó un modelo de modelación tradicional.
4. La estimación permitió una representatividad probabilística de ocurrencia de la grava en cada modelo 3D estimado en relación al pozo, para el modelo estimado en SGEMS la ocurrencia es 31% de grava con relación a los 35% en el pozo y para el modelo estimado en GEMCOM la ocurrencia es de 40%.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que el modelo de SGeMS como una mejor representación de los horizontes de arena y grava en relación al modelo 3D de GEMCOM.
2. Se Modeló horizonte de grava del depósito secundario del cuerpo kimberlítico Lorelei utilizando técnicas geoestadísticas por estimación Kriging de Indicatrices.
3. Se obtuvo el mapa pronóstico 2D y el modelo 3D de la distribución espacial del horizonte de grava, para la prospección de diamantes.
4. Se obtuvo perfiles de comparación del modelo SGeMS versus Pozos criollos, verificando la diferente continuidad lateral de los horizontes.
5. Se detectó la zona pronostica de acumulación de diamantes en el depósito secundario entre los 0.6 - 3.2 metros de espesor de grava.

RECOMENDACIONES

1. Realizar simulaciones para definir con mayor precisión la distribución espacial del horizonte de arena y grava.
2. Sólido 3D de la distribución espacial del horizonte de grava.
3. Continuar los trabajos de prospección en los sectores donde existen una continuidad lateral del horizonte de grava.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAÚJO, A. G. (1992). *Noticia Explicativa da Carta Geológica de Angola à Escala 1:1000.000*. Luanda, Angola.
- ARIOSIA-IZNAGA, Daniel, & José. (2005). *LA MODELACIÓN DESCRIPTIVA EN EL EJEMPLO DE LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS DE CUBA ORIENTAL*. Instituto Superior Minero Metalúrgico., Departamento de Geología., Moa, Huguin, Cuba.
- Berna, J. E. (2012). *Tratamiento de la probabilidad y la estadística para principiantes*.
- Bruno Leopoldo, F. S. (2017). *CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MINERALÓGICA DEL DEPOSITO SECUNDARIO SOBRE EL KIMBERLITO LORALEI*. Mussende, Cuanza Sur.
- Bruno Yonng Leopoldo, e. F. (2017). *CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MINERALÓGICA DEL DEPOSITO SECUNDARIO SOBRE LA CHIMENEA LORALEI*. Moa, Holguin .
- C.V., A. M. (2014). *Análise de Métodos Geológicos e Geofísicos Aplicados à Identificação de Potenciais Depósitos de Cascalho Diamantífero no Rio Araguaia*. Brasília, Brasil.
- CATOCA, S. (2001). *Relatório Sobre os Resultados da Prospeção Geológica Detalhada da Chaminé Kimberlítica de Catoca*.
- CATOCA, S. (2013). *Relatório das Actividades de Prospeção Geológica na Concessão Gango e Quitúbia*. Mussende, Cuanza Sul, Angola.
- Chica Olmo, M. (1987). *Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales*. Universidad de Granada , Departamento de Geodinámica. Granada, España: Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias.
- Cruz, M. E. (2000). 3D orebody modelling and resource estimation of the juraco deposito. *Minería y Geología*.
- David, M. (1977). *Geostatistical ore reserve estimation*. Amsterdam Oxford New York. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Freites, J. G. (n.d.). *CURSO ONLINE MODELAMIENTO GEOLOGICO 3D CON RECMIN*. Retrieved from <https://www.aulasig.com/resources/FICHA-REC001.pdf>
- Georges Matheron. (1965). *Las variables regionalizadas y su estimación*. Universidad de Paris . Paris, Francia: Tesis Doctoral.
- GONÇALVES, A. (2015). *Geologia de Angola*. Universidad Agostinho Neto. Faculdade de Ciências, Departamento de Geología, Luanda, Angola.

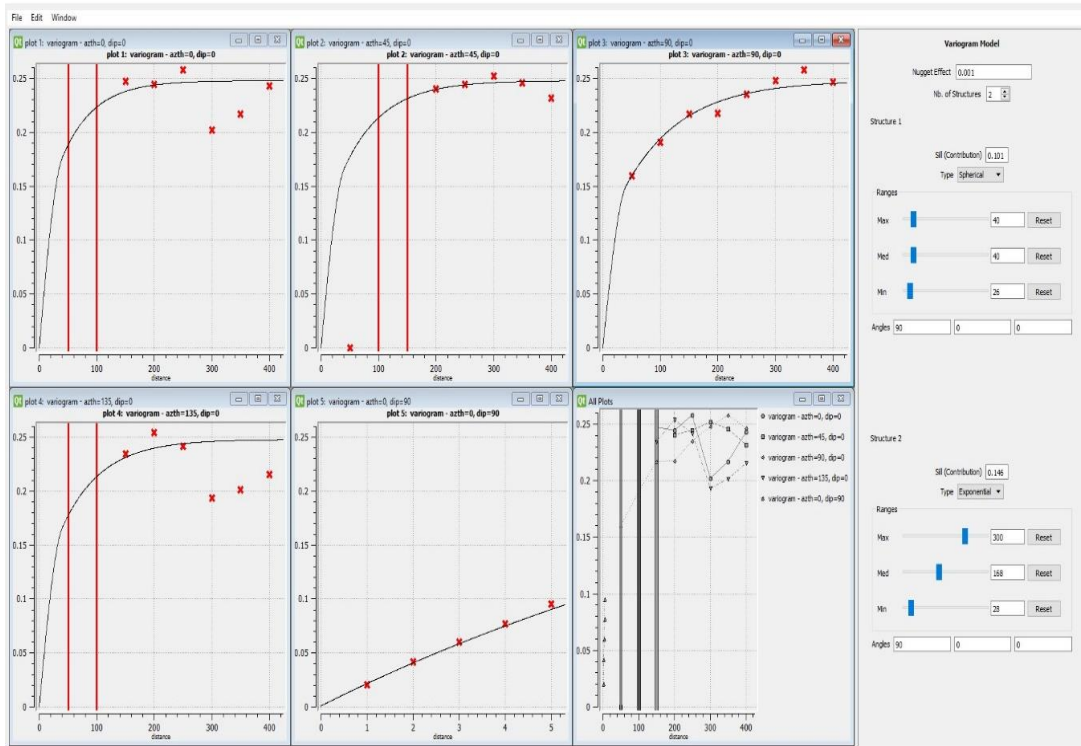
- Gringarten, E., & Deutsch, C. V. (2001). *Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling, Mathematical Geology*.
- ichel David. (1977). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*,. New York, USA: Elsevier Scientific Publishing Company.
- José Alberto Arias del Toro, M. A. (2017). *APLICACIÓN DEL SOFTWARE "SGEMS" PARA LA MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA Y LA ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES.CASO DE ESTUDIO, DEPÓSITO ARCILLAS "MOJA HUEVA"*. Municipio Plaza de la Revolución, La habana, Cuba.
- José Manuel Mirás Avalos. (2003). *Estimación y simulación de la precipitación en Galicia a escala mensual*. Universidad de Coruña. La Coruña, España: Tesis Doctoral.
- José Quintín Cuador Gil, A. Q. (2000). La simulación condicional en geoestadística. *Minería y Geología*.
- K. RECKLING, R. B., HOY, S. J., DEREK, G. F., & ROWEL, U. H. (1994). *Diamond, Industrial*. In: *Industrial Minerals and Rocks* (Vol. 6th Edition). (D. D. Car, Ed.)
- KASSANDA, C. G., & M., S. S. (2014). *Caracterização Petrográfica e Geoquímica do Kimberlito Lorelei da Concessão Gango*. Quibala, Cuanza Sul, Angola.
- KJARSGAARD, B. (. (1966). *Kimberlites*. In: *Searching for diamonds*. In: *Canada, Geological Survey of Canada*.
- LATAS, S. N. (2016). *Modelação e Avaliação de Recursos de depósitos Aluvionares Diamantíferos: Um Caso de Estudo em Angola*. Lisboa, Portugal.
- Lobón, J. L., García, M. I., Moral, C. R., Ortiz, I. P., & León., J. M. (2013). *MODELO GEOLÓGICO 3D DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LOS ANTICLINALES DE ORCHETA*. Villajoyosa; Alicante, España.
- López, G. M. (2017). *Modelamiento geoestadístico aplicado a la caracterización de yacimientos: modelo basado en Celdas de Alta Resolución*.
- López, G. M. (2017). *Modelamiento geoestadístico aplicado a la caracterización de yacimientos: modelo basado en Celdas de Alta Resolución* .
- López, G. M. (2017). *Modelamiento geoestadístico aplicado a la caracterización de yacimientos: modelo basado en Celdas de Alta Resolución* .
- MAKEMBA, G. F. (2009). *Reavaliação dos Depósitos Diamantíferos Secundários do Bloco Cancau, Região do Cuango-Luremo*. Luanda, Angola.
- Malass, E. V., & Calussolo, M. M. (2018). *Avaliação do potencial diamantífero do depósito secundário sobre a chaminé Lorelei na concessão Gango*. Universidad UAN, Departamento de Geología. Mussende, Cuanza Sul, Angola: Trabajo de Diploma.

- Martínez Vargas, A. (2006). *Modelación de los contenidos de hierro en yacimientos*. ISMM, Departamento de Geología., Moa/Holguin.
- Martínez Vargas, A. (2006). *Modelación de los contenidos de hierro en yacimientos*. ISMM, Moa, Holguin.
- Martínez Vargas, A. P. (2006). *¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto?* Moa, Holguin., Cuba.
- Martínez Vargas, A., & Pérez Martínez, Y. (2000). *Metodología para la modelación de yacimientos residuales de níquel*. ISMM, Departamento de Geología, Moa, Holguín, Cuba.
- Martínez, j. I. (1993). *Modelización del yacimiento a la producción mineral diaria*., Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España: Tesis Doctoral.
- Martínez, V. A. (2006). *Modelación de los contenidos de hierro en yacimientos*. Moa-Holguin.
- Matheron, G. (1970). *La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*. Ecole de Minas de Paris, Paris, Francia.
- MEYER, H. O. (1986). *Genesis of Diamond: A Mantle saga – A reply*. *American Mineralogist*.
- MITCHELL, R. (1986). *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry and Petrology*. Plenum Press. New. .
- Nicolas Remy, A. B. (2009). *Applied geostatistics with SGeMS*, Cambridge, USA, Cambridge University Press.
- Núñez, D. E. (2017). *Estudio comparativo de la efectividad del Kriging Puntual e Inverso de una Potencia de la Distancia, en la estimación 3D de Ni, Fe y Co. Bloque O48, yacimiento Punta Gorda*. Moa, Holguin, Cuba: Trabajo de Diploma.
- Pérez-Vázquez, R., Estévez-Cruz, E., & Romero-Espinosa, M. (2017). Modelación descriptiva del yacimiento Santa Lucía (Zn-Pb-Ba). Pinar del Río (Cuba). (pp. 39(2): 83-93). Pinar del Río, Cuba: Boletín de Geología.
- Rafael Cirión Monté, J. L. (2008). *Reporte técnico sobre la estimación de recursos y reservas de material limonítico de los yacimientos Camarioca Norte y Sur*. Moa Nickel S.A., Moa, Cuba.
- Rodríguez, E. D., & etal. (2013). *SYAM: SISTEMA DE ANÁLISIS Y MODELADO DE YACIMIENTOS MINERALES*. Universidad de las Ciencias Informáticas, San Antonio de los Baños, La Habana, Cuba.
- Rustán, M. C. (2019). *MODELACIÓN 3D DE LAS ROCAS INTERCALADAS EN LA CORTEZA LATERÍTICA A PARTIR DE LOS RADARGRAMAS DE GEOFISICA*

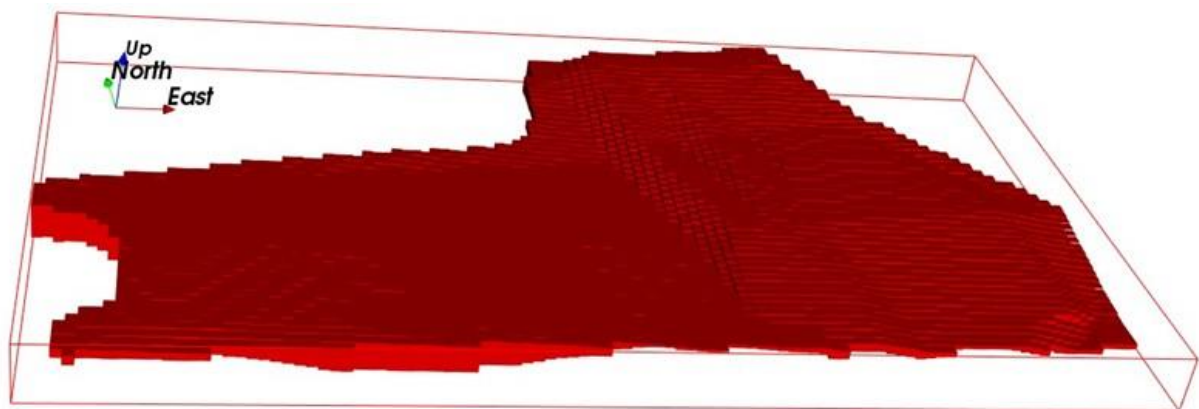
*DE GPR, EN UN SECTOR DEL YACIMIENTO CAMARIOCA NORTE.
Moa/Holguín.*

- Urra Abaira, J. L. (2011). *Modelo 3D de la presa de rechazo nueva. Tesis presentada en opción al título académico de master en Geología.* . ISMM, Departamento de Geología. Moa, Holguín, Cuba: Tesis presentada en opción al título académico de master en Geología.
- Urra Abaira, J. L. (2015). *Modelo 3D de la presa de rechazo nueva.* ISMM, Departamento de Geología. Moa, Holguín, Cuba: Tesis presentada en opción al título académico de master en Geología.
- BAPTISTA, C. (2015). *Geologia de Angola.* Universidade Agostinho Neto., Faculdade de Ciências, Luanda, Angola.
- BARBOSA, O. (1991). *Diamante no Brasil – Histórico, Ocorrência, Prospecção e Lavra, CPRM.* Rio de Janeiro, Brasil.

ANEXOS



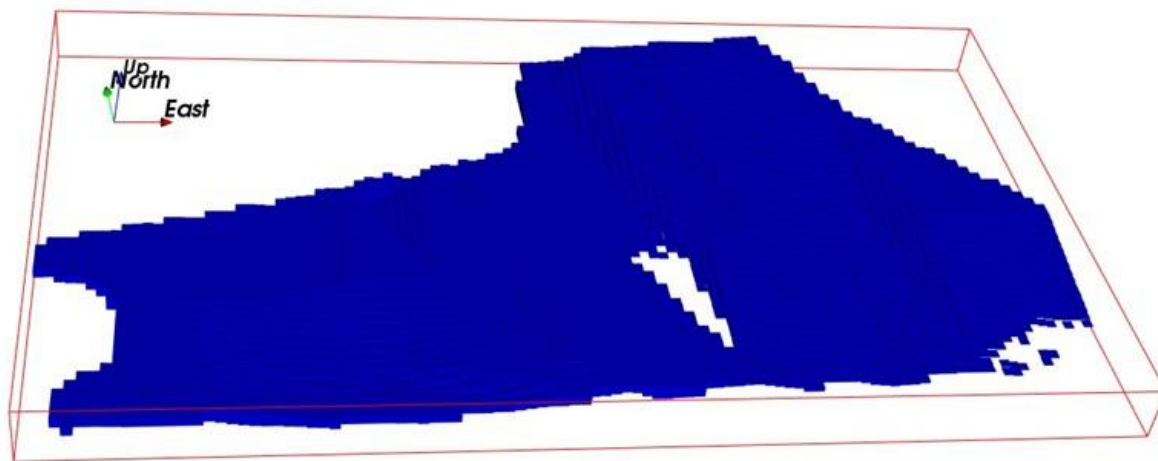
Anexo 1. Variograma horizontal y vertical.



Leyenda

Arena

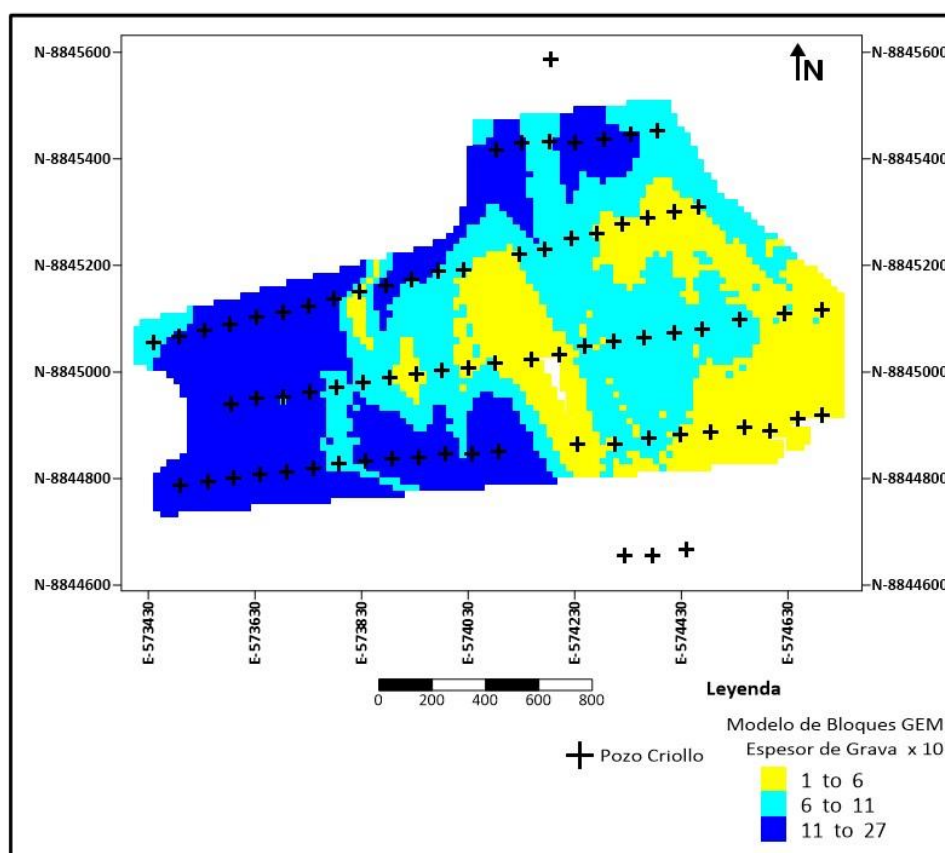
Anexo 2. Distribución 3D del horizonte de Arena, modelo de bloques GEM vs pozos criollos de exploración.



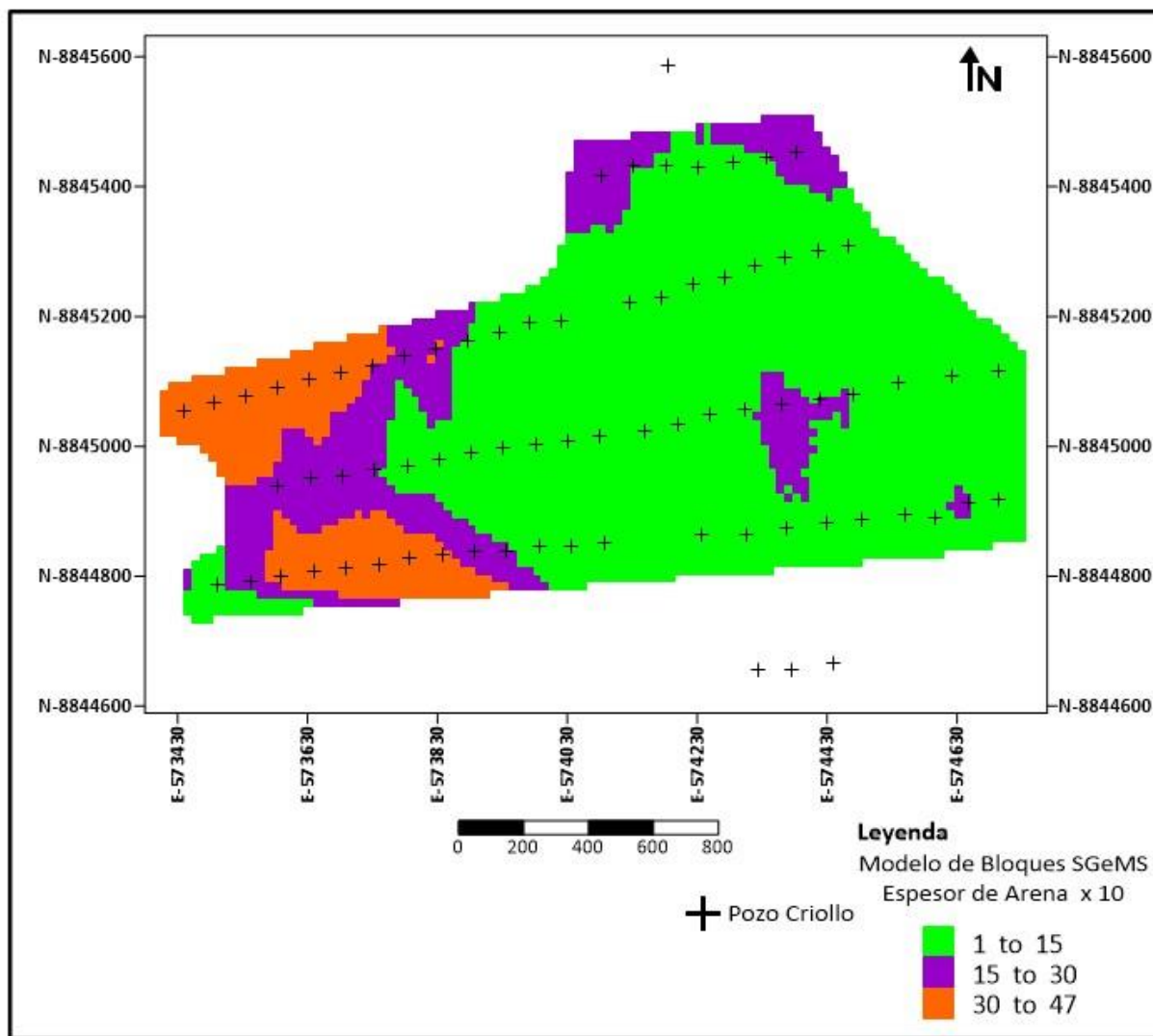
Leyenda

Grava

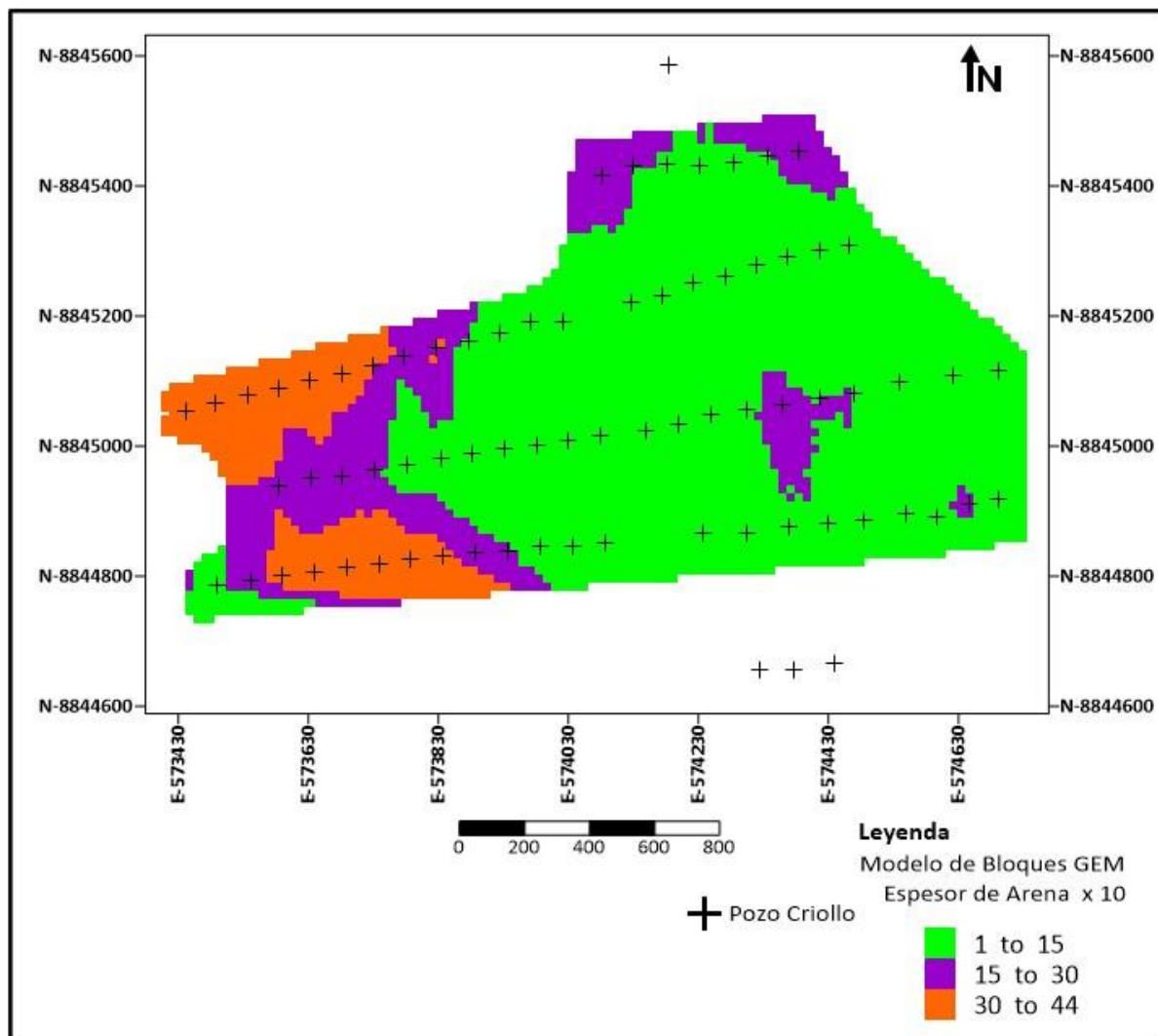
Anexo 3. Distribución 3D del horizonte de Grava, modelo de bloques GEMCOM vs pozos criollos de exploración.



Anexo 4. Mapa pronóstico de acumulación de diamantes, según espesor del horizonte de grava GEM, del depósito secundario, Cuerpo Kimberlítico Lorelei.



Anexo 5. Mapa de espesor del horizonte de arena, según modelo SGeMS, del depósito secundario, Cuerpo Kimberlítico Lorelei.



Anexo 6. Mapa de espesor del horizonte de arena, según modelo GEM, del depósito secundario, Cuerpo Kimberlítico Lorelei.