

**EVALUACION HIDROGEOLOGICA PRELIMINAR POR
PERMEABILIDAD SECUNDARIA DE LAS UNIDADES
GEOLOGICAS DEL SECTOR RANCHERIA-CORINTO EN EL
MUNICIPIO DE PAJARITO UTILIZANDO METODOS
GEOESTADISTICOS**

Autor:

Ing. Jairo Alonso Pérez Siabatto

Tutor:

Ing. Felipe Alfredo Riaño Pérez

Programa:

**Especialización en Geomática
Facultad de Ingeniería**

**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

2017

EVALUACION HIDROGEOLOGICA PRELIMINAR POR PERMEABILIDAD SECUNDARIA DE LAS UNIDADES GEOLOGICAS DEL SECTOR RANCHERIA-CORINTO EN EL MUNICIPIO DE PAJARITO UTILIZANDO METODOS GEOESTADISTICOS.

PRELIMINARY HYDROGEOLOGICAL EVALUATION FOR SECONDARY PERMEABILITY OF GEOLOGICAL UNITS OF THE RANCHERIA-CORINTO SECTOR IN THE MUNICIPALITY OF PAJARITO USING GEOESTADISTIC METHODS.

Jairo Alonso Pérez Siabatto
Ingeniero Geólogo, Estudiante Especialización en Geomática
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C., Colombia.
U3101357@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología basada en las características del fracturamiento de las rocas, su aporte al almacenamiento de agua y por lo tanto, aplicable al cálculo de la porosidad secundaria en unidades rocosas fracturadas o como también se le conoce, conductividad hidráulica en medios no continuos, utilizando como técnica el análisis e interpolación geoestadística, los métodos geoestadísticos empleados permiten realizar estimaciones de la distribución de las fracturas, áreas de concentración y características fundamentales como abertura y espaciamiento. El estudio espacial de la distribución y características de las fracturas, a través de métodos como el Kriging y sus variantes, suministra información predictiva sobre el comportamiento de estas fracturas en lugares donde no se realizaron muestreos (toma de datos) debido a dificultades del terreno o falta de afloramientos rocosos; estos métodos pueden llegar a una confiabilidad del 90%, proporcionando mediciones con errores bajos y la posibilidad de identificar zonas con potencial hidrogeológico alto.

Palabras Clave: Kriging, porosidad, conductividad, hidrogeología, interpolación, diaclasas, fracturas.

ABSTRACT

This paper presents a methodology based on fracture characteristics of rocks, their contribution to water storage and therefore applicable to the calculation of secondary porosity in fractured rock units also known as hydraulic conductivity in non-continuous media, using geostatistical analysis and interpolation as a technique, the geostatistical methods give estimates of the distribution of fractures, areas of concentration and fundamental characteristics such as aperture and spacing. The spatial study of fracture distribution and its characteristics, through methods such as Kriging and its variants, provides predictive information about the behavior of these fractures in places where sampling was not performed (data collection) due to terrain difficulties or Lack of rock outcrops; These methods can reach a reliability of 90%, providing measurements with low errors and the possibility of identifying areas with high hydrogeological potential

Keywords: Kriging, porosity, conductivity, hydrogeology, interpolation, fractures.

Introducción

La región en la cual está enmarcado el municipio de Pajarito, Departamento de Boyacá y más exactamente sus corregimientos Corinto y Ranchería es una región con abundantes lluvias y de igual manera abundantes sistemas fluviales superficiales los cuales desembocan en su mayoría en el importante Río Cusiana; no obstante las fuertes lluvias y la topografía abrupta convierte a estos drenajes en fuertes torrentes de agua que dificultan su captación y por ende el suministro de agua a sus habitantes se hace de manera intermitente o apoyado en el agua captada directamente de las lluvias. Por este motivo se ve la necesidad de conocer cuál es el potencial Hidrogeológico de la zona y la posibilidad de ser explotado el recurso hídrico subterráneo en el sector.

El objetivo principal de este proyecto es evaluar el potencial hidrogeológico de las unidades geológicas a partir del análisis del fracturamiento de dichas unidades, caracterizando la permeabilidad secundaria (conductividad hidráulica en medios rocosos fracturados), la cual se determina de manera teórica en los tipos de roca.

Los software para generación de Sistema de Información Geográfica ofrecen una gama de herramientas útiles a la hora de analizar una determinada cantidad de datos de manera estadística, en este caso se empleará para el análisis es ArcGis 10.2, que por medio de las herramientas Geostatistical Analyst permitirá la aplicación de variados métodos estadísticos como descriptivos básicos, diagramas de caja, gráficos de dispersión, análisis de correlación, entre otros, permitiendo investigar sobre la estructura, tendencias y asociaciones de las variables, así como identificar los procesos que controlan la variabilidad espacial del fracturamiento en las rocas presentes en el área de interés.

La determinación de la distribución espacial de las fracturas, los cambios que pueden llegar a presentar sus características con respecto a las variaciones en el tipo de roca y la conductividad hidráulica a través de las fracturas de una unidad geológica; constituyen los objetivos primordiales del presente estudio; realizar estimaciones considerando las características de variabilidad y correlación espacial de datos, permitirán identificar preliminarmente, zonas de mayor o menor acumulación de agua en las fracturas consistentes en los datos originales tomados en campo.

1. MATERIALES Y METODOS

1.1. Generalidades

El área de estudio con una extensión de 550 Ha aproximadamente, se encuentra ubicada en la vertiente oriental de la cordillera Oriental en la zona de transición de alta montaña a piedemonte llanero en el Departamento de Boyacá, Municipio de Pajarito, corregimientos de Ranchería y Corinto; cuenca media del Río Cusiana. Las coordenadas límites y el área de estudio se muestran en la Figura 1.

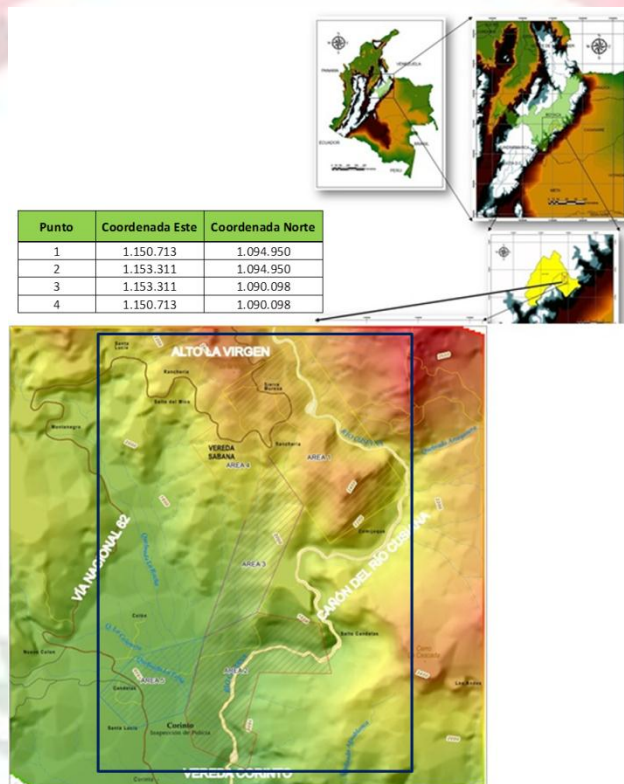


Fig. 1. Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el área de estudio presenta alturas que oscilan entre los 1.459 m.s.n.m. y 2.454 m.s.n.m. los frentes de nubes provenientes del oriente chocan con la parte alta de la cordillera en esta zona, generando fuertes precipitaciones; la alta humedad y la geología regional catalogan la zona como de alta importancia hídrica, allí radica la necesidad de conocer el potencial Hidrogeológico de las Formaciones presentes.

1.2. Marco Teórico

En el presente estudio se hará referencia a una serie de conceptos de carácter hidrogeológico no siempre utilizados o entendidos en su totalidad, debido a la similitud de estos o a la falta de una

definición clara en alguno; por tal razón conocer estos conceptos será de gran ayuda a la hora de desarrollar la temática propuesta.

La definición de unidad hidroestratigráfica fue utilizada por primera vez por Maxey (1964) como “cuerpo de roca de extensión considerable que forma parte de un esquema geológico con un sistema hidrológico distintivo”. (p.126). vio la necesidad de definir unidades con propiedades de almacenamiento y conductividad hidráulica similares, no solo a partir de características litológicas específicas, sino también en la dinámica del régimen hidrogeológico, incluyendo parámetros aplicables especialmente al movimiento de agua, su ocurrencia y almacenamiento. Sin embargo, estos parámetros no son propiedades dependientes del tipo de roca lo que dificulta su asociación a la misma, ya que comúnmente se tiende a utilizar las unidades litoestratigraficas como limites aplicables al agua subterránea.

Seaber (1988) definió una unidad hidroestratigráfica como “cuerpo de roca que se distingue y caracteriza por su porosidad y permeabilidad”. (p.13). y considero que esta definición esta más de acuerdo con la idea de que las unidades Hidroestratigráficas pueden presentarse en una o más unidades litoestratigraficas o unidades geológicas y que deben ser unificadas y delimitadas con base en sus características hidrológicas observables y que se relacionan con sus intersticios. Seaber (1988) también definió a las unidades hidroestratigráficas por el número, tamaño, forma, arreglo e interrelación de sus intersticios, y son reconocidas con base en la naturaleza, extensión, y magnitud de los intersticios en una roca sedimentaria, metamórfica o ígnea.

Por otro lado, C. W. Fetter define a la unidad hidroestratigráfica como “una formación, parte de una formación o grupo de formaciones en las que existen características hidrológicas similares que permiten agruparlas en acuíferos o capas confinantes y constituidas por unidades geológicas agrupadas con base en su conductividad hidráulica similar” (Fetter 1994, p245). Además, especifica que los acuíferos estratificados están especialmente presentes en cuencas sedimentarias compuestas de unidades hidroestratigráficas individuales con diferentes conductividades hidráulicas.

Además, Poehls & Smith (2009) consideran que una unidad hidroestratigráfica es lo mismo que una unidad hidrogeológica y la definen como “una o más unidades geológicas de amplia extensión lateral que se distinguen de los cuerpos de roca o sedimentos que la rodean y relacionadas por medio de parámetros hidrológicos similares como la conductividad hidráulica”. (p.517). Poehls & Smith mencionan que el límite hidroestratigráfico puede correlacionarse o no con el límite de una formación, por lo que puede resultar en varias formaciones incluidas en una unidad hidroestratigráfica tal como un acuífero, o una sola formación puede ser dividida en varias unidades hidroestratigráficas; por ejemplo, acuíferos múltiples con sus capas confinantes relacionadas.

Sin embargo, Copeland Upchurch, M. Scott, Kromhout, Arthur, Means, Rupert and Bond. (2009) definen una unidad hidroestratigráfica como “un cuerpo de roca distinguido y caracterizado por su porosidad y permeabilidad, unificada y delimitada con base en sus características hidrológicas observables relacionadas con sus intersticios”. (p.28). muy similar a la definición de Seaber (1988). Indican que los dos términos, tanto “unidad hidroestratigráfica” como “unidad hidrogeológica” son aceptables, pero que el primero es preferible.

Es fácil notar que hay varias definiciones y que todas dependiendo del marco del estudio son aplicables para definir una unidad Hidroestratigrafica, hasta ahora no existe una definición única y consensuada para este concepto. Por lo anterior, en el presente trabajo las unidades hidroestratigráficas se definieron con base en lo propuesto por Seaber (1988), quien las distingue como dependientes de los intersticios de las unidades litoestratigraficas. Se pueden tomar los límites de dichas unidades para agruparlas y cartografiarlas, no obstante, este no será el límite para las fracturas y mucho menos para un régimen de acumulación o movimiento de agua subterránea siempre y cuando este no dependa únicamente de la porosidad primaria.

El método empleado para el modelamiento es el análisis geoestadístico a partir de las herramientas del Software ArcMap, estas herramientas permiten generar un modelo espacial general de una variable aleatoria, en este caso, las características del fracturamiento de las rocas medidas en campo; previo a generar cualquier modelo espacial con herramientas de interpolación geoestadística, se debe hacer un análisis exploratorio de los datos para detectar si hay datos anómalos o que puedan incrementar el error medio cuadrático a la hora de espacializar los datos.

1.3. Metodología

Para realizar el presente trabajo se consideró la base de datos de características del fracturamiento, que contiene los datos tomados en campo en 13 diferentes puntos de muestreo en afloramiento caracterizando entre 120 y 150 fracturas por punto en los parámetros más representativos de estas discontinuidades (continuidad, espaciamento, abertura, relleno, rugosidad, humedad y alteración). Estas variables constituyen los parámetros utilizados para la evaluación hidrogeológica preliminar por porosidad secundaria.

Para definir zonas con potencial hidrogeológico (Unidades Hidroestratigráficas) se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos estructurales obtenidos en campo y un modelamiento de las variables que intervienen en el cálculo de la permeabilidad secundaria en unidades rocosas con fracturas limpias y suaves, fórmula tomada de Hoek y Bray, 1977 ecuación “(1)”, adicionalmente teniendo en cuenta que las fracturas no están limpias se aplicara la fórmula para flujo en unidades rocosas con fracturas rellenas ecuación “(2)”; la metodología usada para la evaluación de unidades geológicas por permeabilidad secundaria se definió en tres partes: (1) definición de la estratigrafía y paquetes litológicos presentes, (2) definición de las propiedades hidrogeológicas de los paquetes litológicos, entrada de los datos, análisis exploratorio de los datos, modelamiento de los parámetros de espaciamento, abertura, densidad de fracturamiento y el factor de flujo en unidades rocosas con fracturas rellenas (por medio del método Kriging), y (3) agrupamiento y reagrupamiento de los paquetes litológicos como unidades hidroestratigráficas, con base en sus propiedades hidrogeológicas.

A continuación se presenta una descripción más detallada de cada paso.

1.3.1. Descripción de la estratigrafía y paquetes litológicos.

- Recopilación de mapas y bases topográficas, imágenes satelitales, fotografías aéreas y modelos digitales del terreno (DEM), información geológica del área de estudio (estratigrafía, mapas geológicos, estructurales, y geomorfológicos). Con esta información y la recopilada en campo (levantamiento de columnas estratigráficas, levantamiento y análisis de fracturas), se identifican las unidades litológicas que pudieran estar presentes en el subsuelo, se identifican las estructuras regionales y locales que pudieran afectar el área de estudio.
- Análisis de la litología con base en las columnas estratigráficas, estimación de variaciones en la porosidad y la permeabilidad debido a cambios granulométricos, a nivel macro.

1.3.2. Definición de las propiedades hidrogeológicas de los paquetes litológicos, entrada de los datos, análisis exploratorio de los datos, modelamiento de los parámetros de espaciamiento, abertura, densidad de fracturamiento y el factor de corrección por el relleno de las fracturas.

- Entrada de los datos, análisis exploratorio estadístico de los datos de fracturas en las unidades geológicas por medio de Gráficos de Caja, Semivariogramas y Covariograma, con el fin de observar la tendencia de los datos y determinar si hay valores extremos y su ubicación; modelar estas características y generar salidas graficas en forma de figuras de distribución de aperturas, densidad de fracturamiento, cantidad de buzamiento de las diaclasas, permeabilidad secundaria y el factor de flujo en unidades rocosas con fracturas rellenas, el modelamiento de los datos se hará mediante el software ArcGis apoyado en sus herramientas especializadas Geostatistical Analyst (Kriging) y Spatial Analyst Tool.

1.3.3. Agrupamiento y reagrupamiento de los paquetes litológicos como unidades hidroestratigráficas, con base en sus propiedades hidrogeológicas.

- Se establecen las unidades hidrogeológicas con base en el agrupamiento de paquetes litológicos a partir de las propiedades hidrogeológicas evaluadas o inferidas (permeabilidad secundaria para las unidades rocosas).
- Una vez realizado esto, se definen las características físicas definitivas de cada unidad: contenido litológico, límites verticales y horizontales, y finalmente, el nombre de la unidad y ponderación como unidad Hidroestratigráfica.
- Finalmente, con la ayuda de un SIG, toda la información generada e interpretada se resume en un mapa hidrogeológico temático que contiene la información de las unidades Hidroestratigráficas encontrados en la zona.

1.4. Desarrollo metodológico

1.4.1. Recopilación de mapas y bases topográficas, imágenes satelitales, fotografías aéreas y modelos digitales del terreno (DEM), información geológica del área de estudio (estratigrafía, mapas geológicos, estructurales, y geomorfológicos).

La geología de la zona está enmarcada por rocas de edad cretácica (inferior) denominadas Formación Lutitas de Macanal (Kilm) y Formación Areniscas de las Juntas (Kiaj) y una serie de depósitos de edad cuaternaria, algunos de ellos dejados por las quebradas presentes en la zona y el Río Cusiana en eventos torrenciales pasados, igualmente se presentan depósitos coluviales de menor importancia. El rumbo de las Formaciones es SW-NE con una dirección de la inclinación NE-SE, controlado por estructuras de plegamiento de carácter regional como el Sinclinal del Desespero y el Anticlinal de Río Suncé; estas estructuras regionales aumentan aún más la importancia de evaluar el potencial hidrogeológico del área, ya que los flancos aflorantes de estos pliegues se constituyen como zonas de recarga hídrica para acuíferos en sus zonas intermedias cóncavas (Sinclinal del Desespero).

Teniendo en cuenta la revisión y recopilación Geológica, Geomorfológica e Hidrogeológica del área de estudio, se llegó a la primera apreciación de que la zona, geológicamente se ubica sobre el

flanco oriental del Anticlinal del Río Suncé, flanco litológicamente compartido con el Sinclinal del Desespero, lo que convierte toda el área en zona de recarga hídrica a nivel regional.

1.4.2. *Resumen del Análisis Litológico para la Estimación de Variaciones de Porosidad a Nivel Macro (Unidades de Roca).*

El estimativo de la variación de la porosidad se hizo teniendo en cuenta principalmente los cambios litológicos importantes, cambios notorios de facies de sedimentación que generaran un brusco cambio en el tipo de roca, y así obtener unidades con características similares en toda su extensión dentro del área del proyecto pero con límites de base y techo bien establecidos. El cambio litológico de mayor notoriedad es la transición brusca de Lutitas (Formación Lutitas de Macanal) a Arenisca (Formación Areniscas de las Juntas), así mismo se encontraron variaciones composicionales dentro de estas unidades. En la Tabla 1 que se relaciona a continuación se explica de manera corta el ámbito geológico de la zona haciendo énfasis en los cambios litológicos importantes.

Tabla 1. Descripción granulométrica (Macro) de las Formaciones Geológicas presentes en el área de estudio.

Litología Roca	Granulometría Roca
Lutitas de Macanal Miembros (Kilm D2; Kilm D3)	Lutitas Negras
Areniscas de Las Juntas Miembros (Kiaj MB; Kiaj MD), Lutitas de Macanal Miembro (Kilm D1)	Arcillolitas; Lodolitas; Limolitas
Lutitas de Macanal Miembro (Kilm C)	Intercalación Lutitas Areniscas de grano fino
Areniscas de Las Juntas Miembro (Kiaj MA)	Areniscas de Grano fino
Areniscas de Las Juntas Miembro Kiaj MC	Arenisca de Grano medio

Fuente: Elaboración propia.

1.4.3. *Entrada de los datos*

Las entradas son las variables primarias y constituyen el insumo principal para el análisis. La base de datos que almacena las características de las fracturas (tabla de Excel con los datos de los puntos muestreados) y la información espacial, representada por un Shape (archivo donde se almacena la información geométrica de los objetos) con el área de interés, son la fuente primaria para desarrollar el modelo.

1.4.4. *Análisis exploratorio de los datos*

El análisis exploratorio consistió en identificar inicialmente la normalidad, tendencias y valores extremos de los datos para cada variable utilizando diagramas de caja e histogramas. Adicionalmente se generaron gráficos de dispersión útiles tanto para la detección de relaciones entre variables como para la identificación de tendencias en el valor promedio de la variable en la región (relación entre la variable medida y las coordenadas geográficas). Los gráficos de dispersión para las variables abertura, número de diaclasas, espaciamiento y orientación de las diaclasas se constituyeron tomando como eje de las ordenadas la variable en estudio. La observación de la nube de puntos resultante, permite establecer de manera empírica si existe dicha tendencia; en el caso de

las variables analizadas para el cálculo de la permeabilidad secundaria se observó que no hay una tendencia que relacione la variable con su posición geográfica, esto debido a que estas variables dependen de las características de la roca donde se generan las discontinuidades y de las fuerzas compresionales a las cuales fueron sometidas las formaciones rocosas. En la Figuras 2, 3, 4 y 5 se muestran los gráficos de caja, Semivariogramas y covariogramas para las variables analizadas.

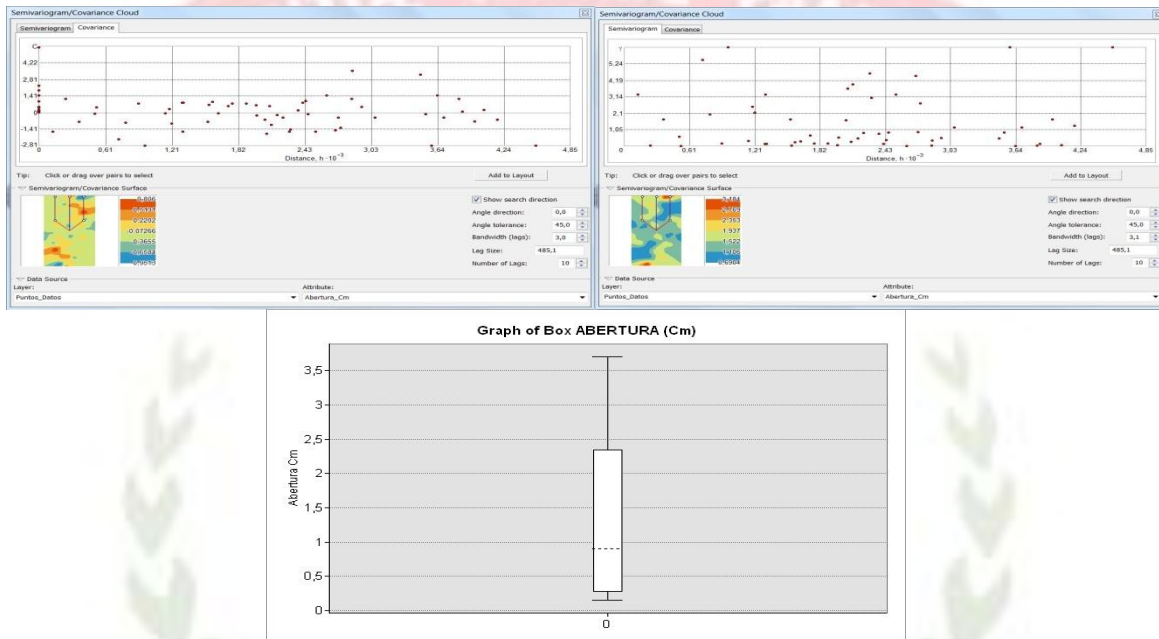


Fig. 2. Gráfico de Covariograma, Semivariograma y Grafico de Caja para la variable abertura.
Fuente: Elaboración propia.

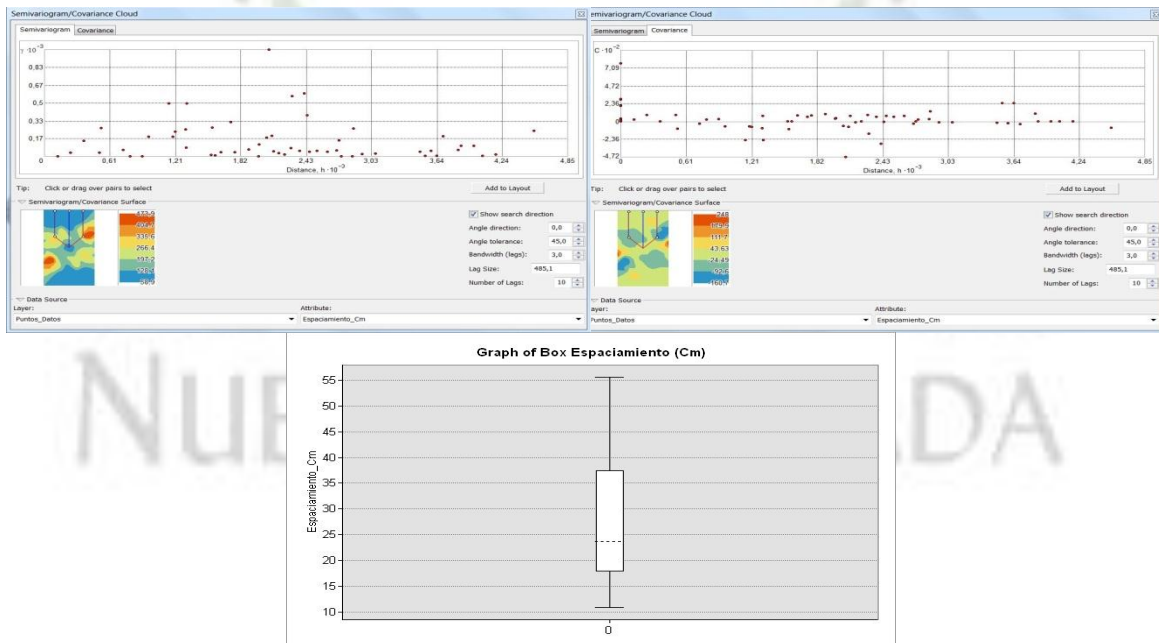


Fig. 3. Gráfico de Covariograma, Semivariograma y Grafico de Caja para la variable espaciamento.

Fuente: Elaboración propia.

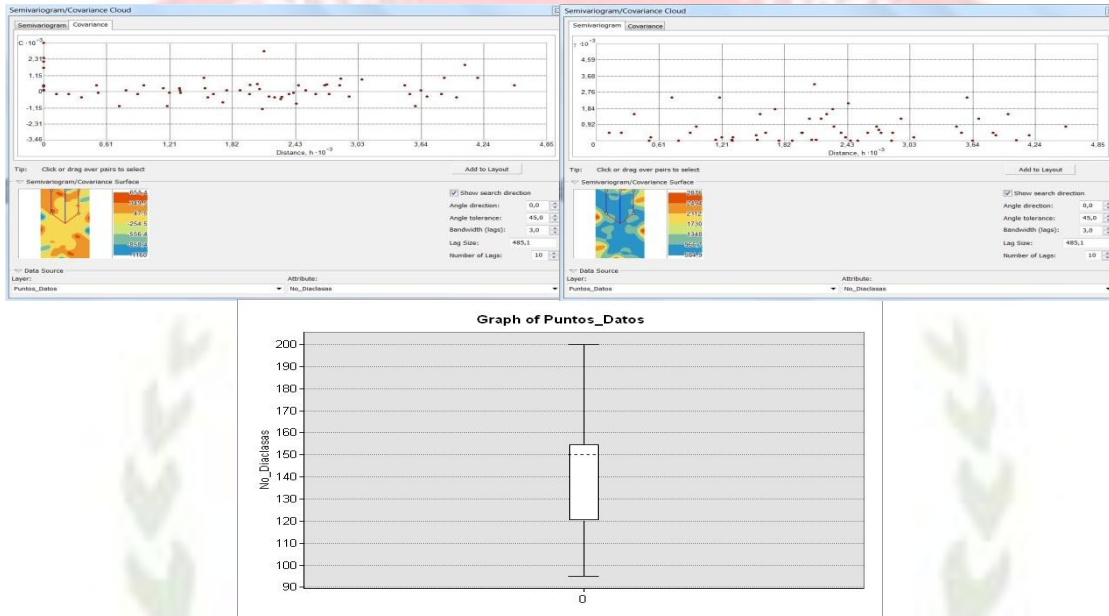


Fig. 4. Gráfico de Covariograma, Semivariograma y Grafico de Caja para la variable No. De Diaclasas.

Fuente: Elaboración propia.

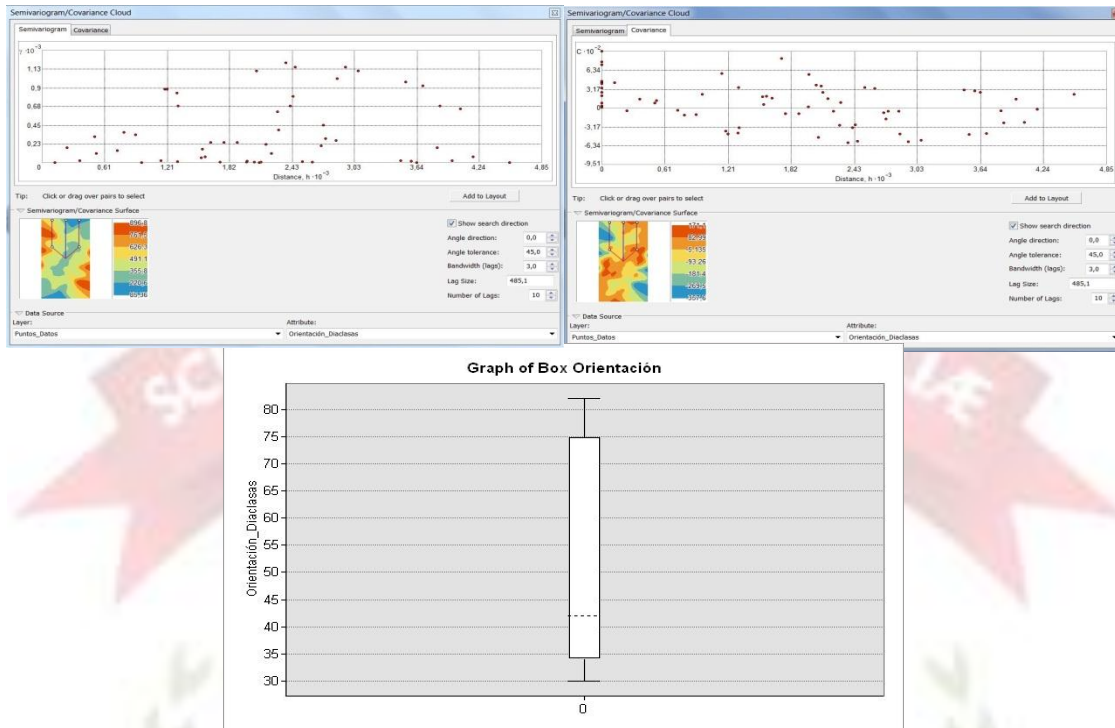


Fig. 5. Gráfico de Covariograma, Semivariograma y Grafico de Caja para la variable orientación de las diaclasas.

Fuente: Elaboración propia.

Los Semivariogramas experimentales encontrados indican que las variables no presentan estructuras de dependencia espacial, puesto que en ningún caso la semivarianza es constante en función de la distancia; se observan valores en los cuales la distancia entre los puntos con mayor variación es de 4.5 Km teniendo en cuenta que la distancia más larga en el área de estudio es de 4.87 km estos se consideran como puntos extremos; sin embargo estos datos no fueron removidos del modelo debido a que representan el comportamiento de las fracturas en afloramientos rocosos fuera del área de estudio. El cumplimiento de las consideraciones anteriores establece que no existen problemas de estacionariedad, permitiendo continuar con el tratamiento geoestadístico.

1.4.5. Modelamiento de la distribución de las características del fracturamiento aperturas, densidad de fracturamiento, cantidad de buzamiento de las diaclasas y el factor de flujo en unidades rocosas con fracturas rellenas.

El método utilizado para la interpolación o estimación espacial es denominado “Kriging”, consiste en determinar un dato desconocido a partir de otros conocidos, teniendo como premisa que los datos más cercanos tienen una mayor influencia sobre él. Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el Análisis Exploratorio de los Datos donde se observó una independencia espacial de las variables; se utilizó como modelo predictivo el Kriging Universal el cual independientemente de la distribución es el mejor predictor linealmente

inesgado. En la Figura 6 se observa el modelo completo empleado para la generación de las capas de salida finales.

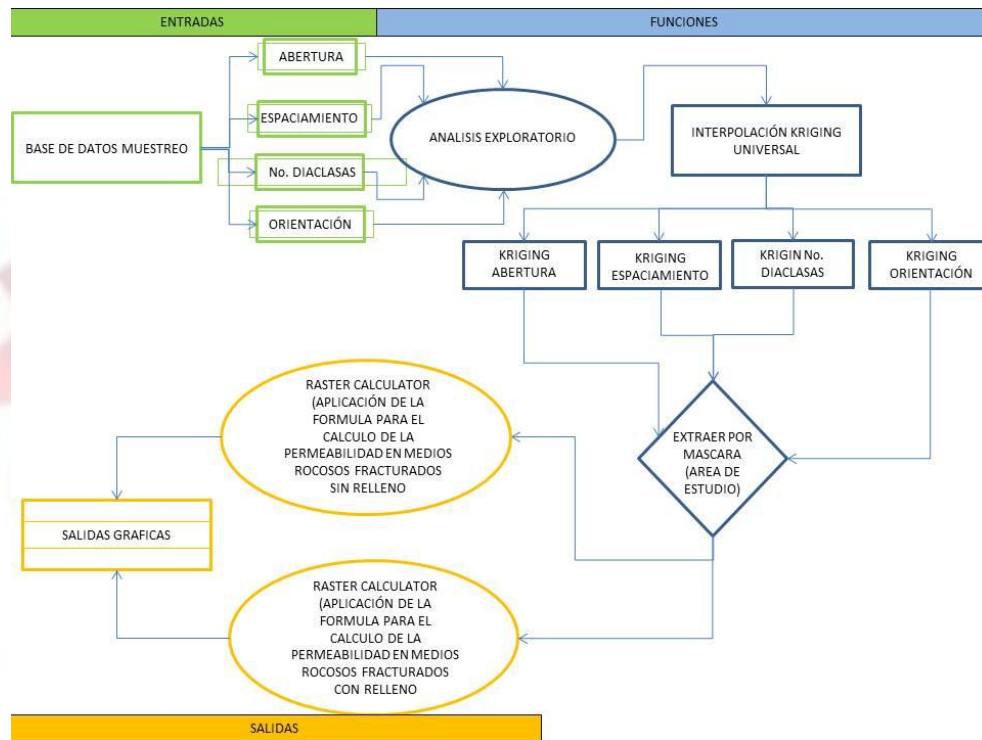


Fig. 6. Modelo espacial para la generación de las capas de salida.
Fuente: Elaboración propia.

✓ *Densidad de Fracturamiento (No. de Diaclasas)*

La densidad de fracturamiento no es otra cosa que la cantidad de fracturas que se pueden encontrar en un volumen determinado de roca, por tal razón este parámetro se graficó en unidades de número de diaclasa o fracturas. El mapa generado arrojó que el área de mayor fracturamiento se ve concentrado donde las rocas empiezan a sufrir un cambio en la dirección debido al intenso plegamiento por fuerzas tectónicas al que fue sometida esta zona, las tonalidades en colores naranjas y amarillos claros representan zonas donde el fracturamiento es menos intenso, ya sea por la resistencia de los materiales o porque los esfuerzos compresionales en estas zonas fueron menores, en ambos casos el fracturamiento pudo haberse visto enmascarado por la frondosa vegetación y la falta de afloramientos rocosos descubiertos en algunas formaciones. En la Figura 7 se muestra el mapa de densidad de fracturamiento y en la Tabla 2 los rangos de clasificación.

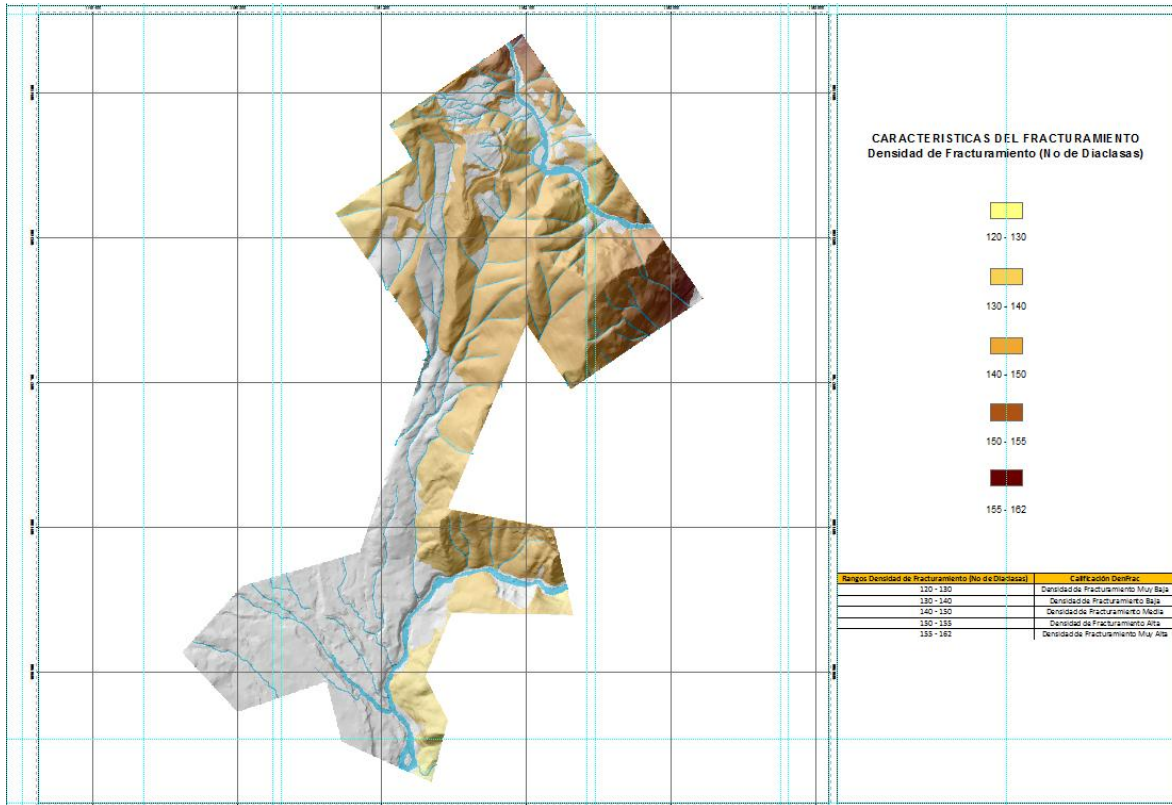


Fig. 7. Modelo de densidad de Fracturamiento área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Rangos de clasificación para densidad de Fracturamiento.

Rangos Densidad de Fracturamiento (No de Diaclasas)	Calificación DenFrac
120 - 130	Densidad de Fracturamiento Muy Baja
130 - 140	Densidad de Fracturamiento Baja
140 - 150	Densidad de Fracturamiento Media
150 - 155	Densidad de Fracturamiento Alta
155 - 162	Densidad de Fracturamiento Muy Alta

✓ *Cantidad y Rangos de Buzamientos*

Los rangos en las inclinaciones de las fracturas son un indicativo de la capacidad de una unidad rocosa a generar acumulación de agua en dichas fracturas, si el fracturamiento tiene una inclinación preferencial y relativamente homogéneo, la capacidad de almacenamiento de la roca se verá disminuida y la transmisividad favorecida. Los amplios y diferentes rangos de inclinaciones favorecen el entrapamiento de agua y disminuyen la pérdida de esta a otras unidades.

Aunque los rangos de buzamientos encontrados en las rocas del área de estudio son amplios, se observa una tendencia en dirección de la inclinación de la formación rocosa Figura 8, lo que valida y respalda que la zona concerniente al proyecto es de recarga hídrica para un acuífero de estructura regional, como es el caso del núcleo del Sinclinal del Desespero.

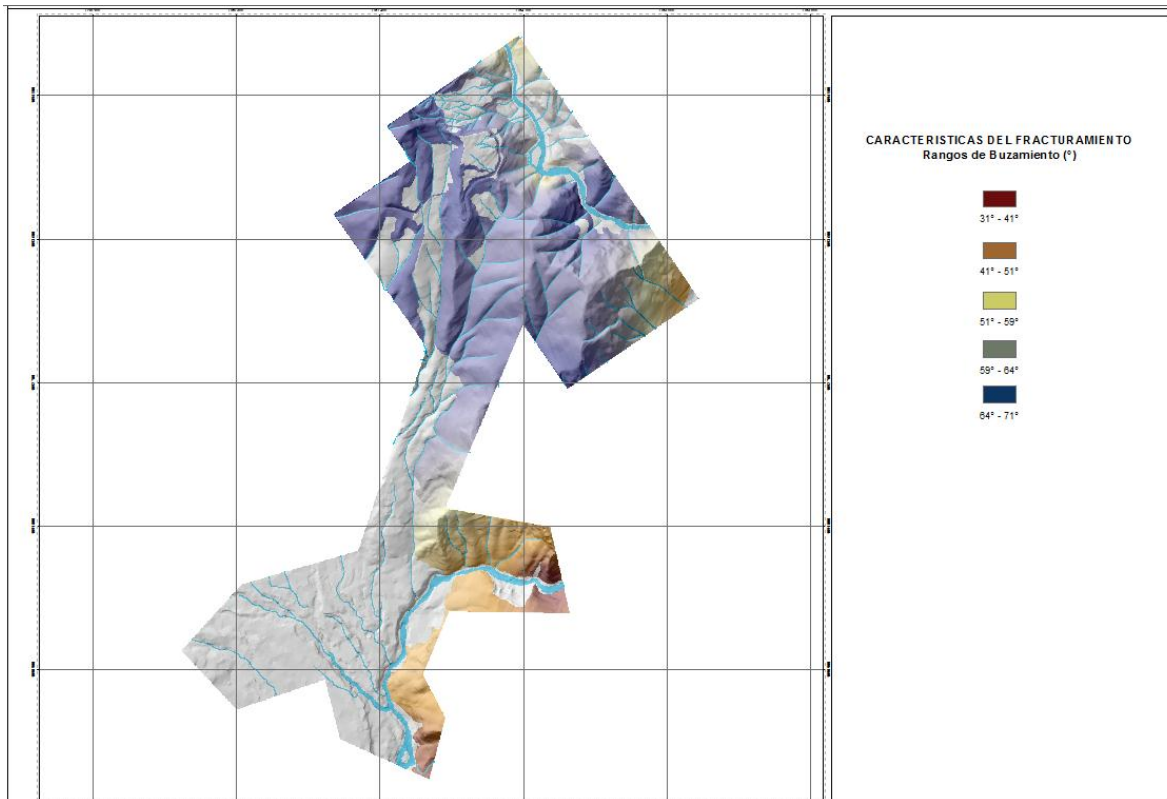


Fig. 8. Modelo de Rangos de Buzamientos área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

✓ *Distribución de Aperturas*

Las aberturas en las fracturas es un parámetro muy importante debido a que la permeabilidad y transmisividad hidráulica por la roca se ve directamente condicionado a ellas, se puede decir que son directamente proporcionales (a mayor abertura de la fractura, mayor caudal de agua transcurrirá por ella), sin embargo este es un parámetro con un cierto grado de incertidumbre, ya que no se puede estar seguro de si esa abertura vista en afloramiento se mantenga longitudinalmente a profundidad. Para llevar a cabo el análisis de este parámetro se utilizaron los datos obtenidos en campo, por medio del Software ArcMap se agruparon y se les dio un manejo estadístico, los datos finales fueron modelados por medio de las herramientas Geostatistical Analyst (Kriging Universal) para interpolación de datos espaciales. Los resultados finales se muestran en la Figura 9.

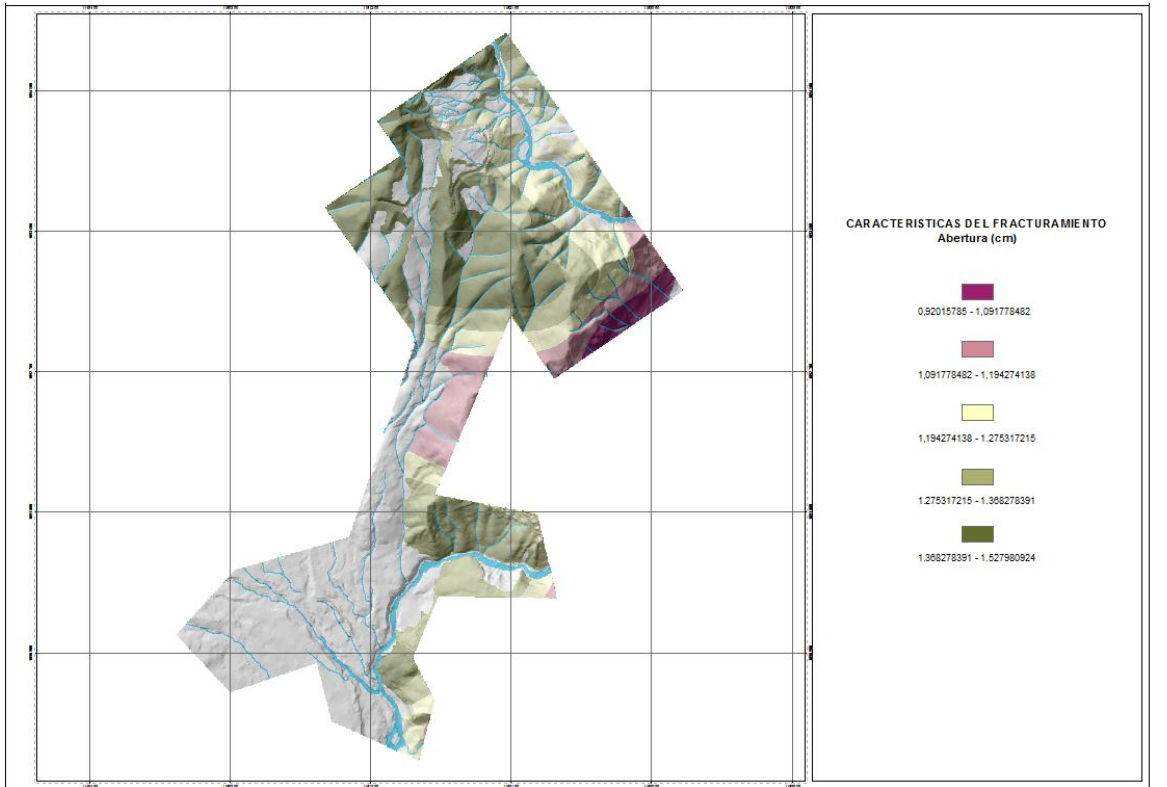


Fig. 9. Modelo de Rangos de Abertura de las Diaclasas área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

✓ *Espaciamiento entre Fracturas*

El espaciamiento entre las fracturas es un factor inverso a la permeabilidad secundaria, ya que, si el espaciamiento entre ellas es muy amplio indica que la roca es muy resistente y contiene muy pocas fracturas, mientras que si el espaciamiento es reducido podemos estar seguros de que el material rocoso se encuentra altamente fracturado. El espaciamiento es un factor inversamente proporcional a la permeabilidad secundaria y es un indicativo confiable de la resistencia del material; por tal razón es necesario conocer sus variaciones debidos a cambios litológicos y extensión de la unidad rocosa.

Para el caso del área del proyecto se obtuvieron rangos que oscilan entre los 11 cm y los 45 cm, los rangos más altos de espaciamiento entre fracturas se observan en las rocas de los miembros arenosos de la Formación Arenisca de las Juntas (MA-MD), los rangos intermedios se observan en las intercalaciones entre areniscas y limolitas y lutitas del Miembro D2 de la formación Lutitas de Macanal y los rangos bajos se observan en las unidades Kilm C (Lutitas de Macanal Miembro C) y Kilm D1 (Lutitas de Macanal Miembro D1); por lo tanto las Lutitas como unidad rocosa presentan más cantidad de fracturas por unidad métrica de longitud; sin embargo por el tipo de roca y el tipo de meteorización que presentan, las fracturas se encuentran en gran medida rellenas de material arcilloso lo que disminuye la permeabilidad. Por otro lado los miembros de la formación Areniscas de las Juntas presentan las fracturas en un rango de espaciado mayor, indicando una resistencia mayor de estos materiales, igualmente el relleno en las fracturas es escaso dejando las aberturas libres y dándole unas mejores características de permeabilidad Figura 10.

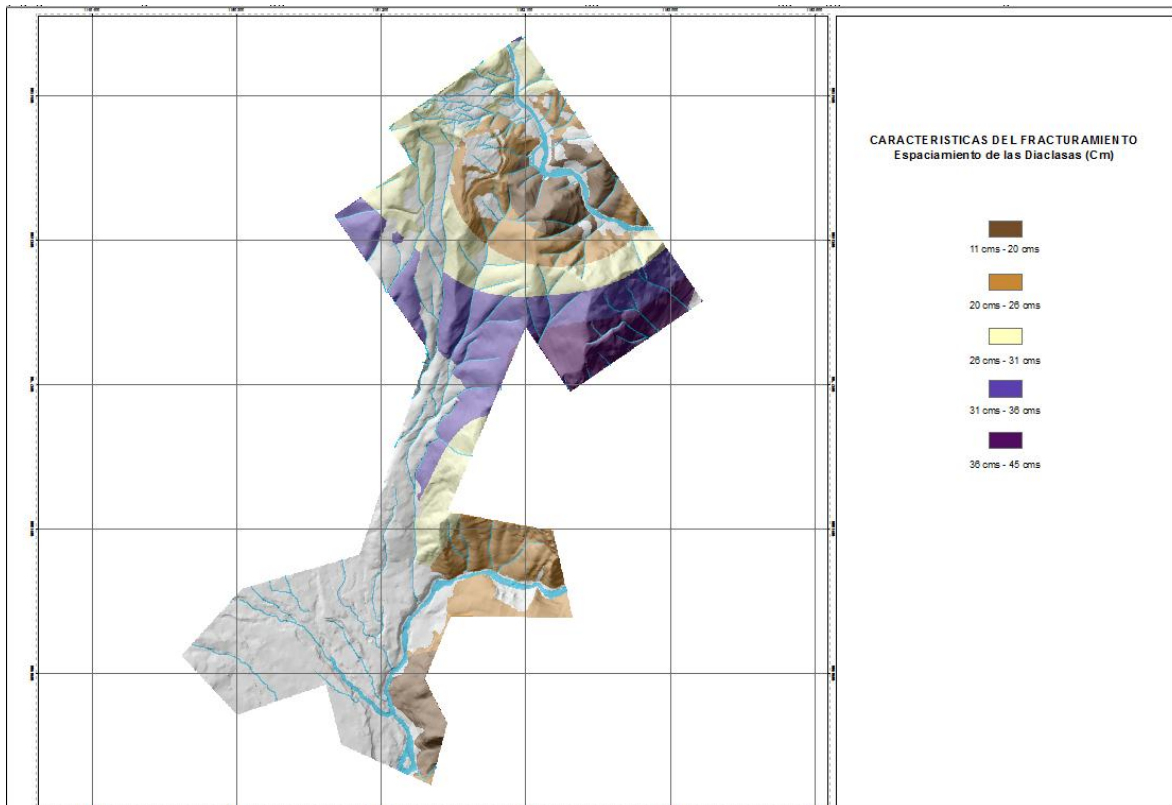


Fig. 10. Modelo de Espaciamiento de las Diaclasas área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

✓ *Permeabilidad Secundaria*

La permeabilidad a través de las discontinuidades, o permeabilidad secundaria, es función de la densidad de fracturamiento y de la estructura geológica de la unidad rocosa. Su variación con la dirección puede ser importante, ya que las discontinuidades agrupan en familias con direcciones preferentes que canalizan el flujo de agua.

La permeabilidad de una unidad rocosa puede verse aumentada en zonas determinadas de falla o de fracturación intensa.

Cuando existen alternancias de materiales con distinta competencia se produce una gran diferencia de permeabilidad entre ellos; al presentar mayor densidad de fracturas los estratos más duros, su permeabilidad es mayor. Para el proyecto se llevó a cabo la determinación de la permeabilidad secundaria por medio de la Ecuación (1) (Tomada de Hoek y Bray, 1977). Que depende de la abertura de las discontinuidades y el espaciamiento entre ellas.

$$K = \frac{g \cdot e^3}{12 \cdot \nu \cdot b} \quad (1)$$

Dónde:

$e =$ Apertura de las Juntas

$v =$ Viscosidad del agua ($0.0101 \text{ cm}^2/\text{s}$
para agua destilada a 20°C)

$b =$ Espaciado entre las juntas

$g =$ Aceleración de la gravedad ($981 \text{ cm}/\text{s}^2$)

Ecuación 1. Fórmula para determinación de la permeabilidad secundaria (conductividad hidráulica) en unidades rocosas fracturadas sin relleno.

La zona de estudio presenta cinco zonas de permeabilidad claramente definidas y que se pueden asociar a las formaciones rocosas aflorantes en el proyecto, estas zonas se ven controladas no solo por los parámetros de abertura y espaciado de las discontinuidades, sino también por los cambios litológicos y de granulometría que se presentan en las formaciones, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan los rangos de permeabilidad obtenidos para el Proyecto, y su asociación con las unidades Geológicas de la zona.

Tabla 3. Rangos de permeabilidad y su asociación litológica.

Rangos de Permiabilidad (Cm/Seg)	Calificación_Perm	Litología Roca	Granulometría Macro de las Rocas
153,49 - 486,54	Permeabilidad Muy Baja	Kilm D2; Kilm D3	Lutitas Negras
486,54 - 689,50	Permeabilidad Baja	Kiaj MB; Kiaj MD; Kilm D1	Arcillolitas; Lodolitas; Limolitas
689,50 - 861,237	Permeabilidad Media	Kilm C	Intercalacion Lutitas Areniscas de grano fino
861,237 - 1137,04	Permeabilidad Alta	Kiaj MA	Areniscas de Grano fino
1137,04 - 1480,51	Permeabilidad Muy Alta	Kiaj MC	Arenisca de Grano medio

Las unidades litológicas que presentan una mayor permeabilidad son los miembros arenosos de la Formación Arenisca de las Juntas debido a que litológicamente se componen de areniscas cuarzosas de grano fino a medio con cemento silíceo, altamente fracturadas pero sin relleno en las juntas, esporádicamente intercaladas con arcillolitas negras fisibles ferruginosas, la unidad Kiaj MC se observa con los mejores rangos de permeabilidad debido a que es 95% arenosa sus características de fracturamiento son apropiadas para el almacenamiento y conductividad de agua subterránea. Debido a que el proyecto no contempla un análisis completo de balance hídrico no se puede llegar a hablar del potencial de acumulación de estas rocas arenosas, se suma a lo anterior el hecho geológico de que la zona actúa como recarga para un acuífero estructural como lo es el Sinclinal del Desespero.

Las tonalidades amarillas en el mapa representan zonas con baja permeabilidad, estas tonalidades también se pueden observar en las unidades rocosas arenosas debido a que el grado de fracturamiento en la roca no es el mismo entre un afloramiento y otro. Las unidades rocosas miembros de la formación Lutitas de Macanal presentan permeabilidades bajas debido a sus propiedades intrínsecas como material rocoso arcilloso y al relleno arcillosos-ferruginoso encontrado entre sus discontinuidades; el presentar bajos rangos en las aberturas de las fracturas, la permeabilidad se ve reducida drásticamente Figura 11.

Las características del fracturamiento son muy variables y están condicionadas a factores como esfuerzos compresionales, que no son los mismos a lo largo de una unidad rocosa.

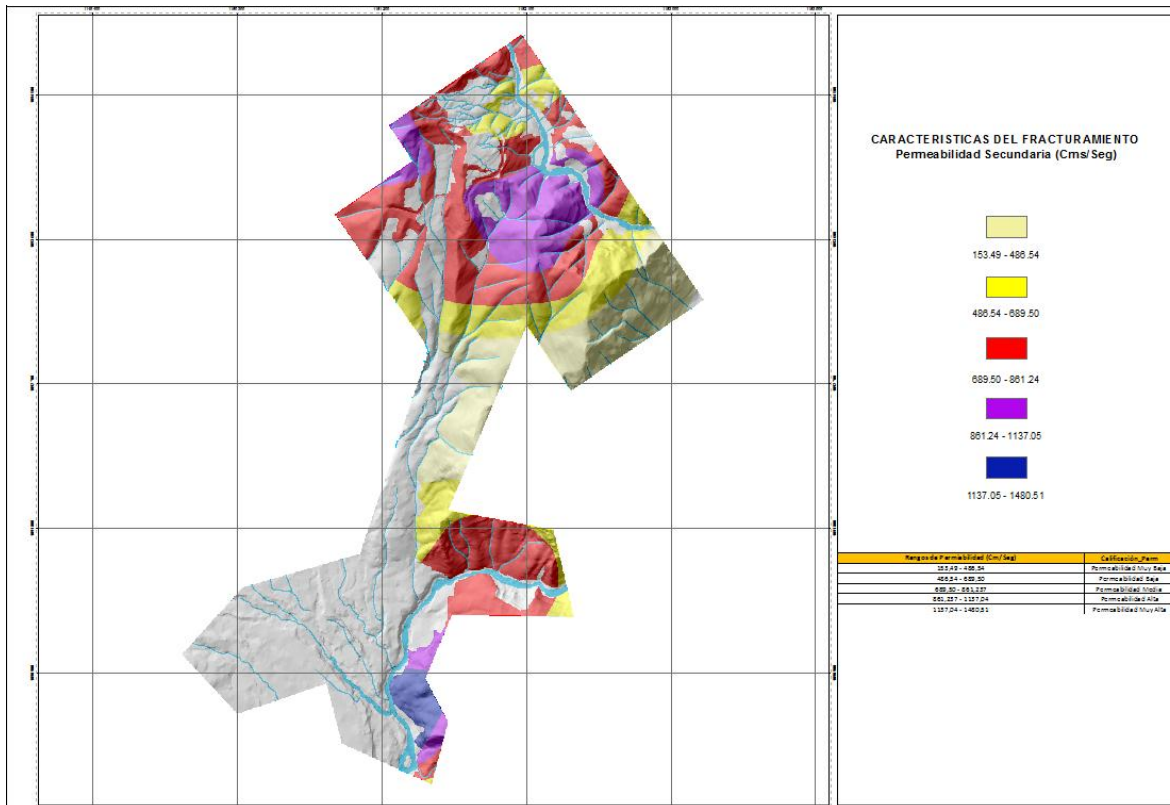


Fig. 11. Modelo de permeabilidad secundaria sin relleno en las juntas, área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Después de hacer un análisis detallado de los valores de permeabilidad para el área de estudio, se pudo observar como estos son bastante altos para la conductividad hidráulica en un medio continuo; sin embargo a lo largo del estudio se aclaró que las fracturas pueden llegar a presentar variaciones considerables con respecto a cambios en el tipo de roca y adicionalmente estar rellenas de algún tipo de material, ya sea de menor o mayor permeabilidad que la roca encajante, por esto se procedió a calcular la permeabilidad secundaria teniendo en cuenta el tipo de relleno presente en las discontinuidades, dicho cálculo se realizó con la ecuación (2) tomada de Hoek y Bray, 1977 en la cual intervienen los mismos parámetros característicos de las fracturas abertura y espaciamento con la variación de que se suponen todas las diaclasas rellenas de diferentes tipos de materiales. En la Figura 12 se puede observar el resultado de modelar esta ecuación y su distribución espacial en el área de estudio

$$K = \frac{e \cdot K_f}{b} + K_r \quad (2)$$

Dónde:

e = Apertura de las Juntas

K_f = Conductividad Hidraulica del Relleno

b = Espaciado entre las juntas

K_r = Conductividad Hidraulica de la roca intacta

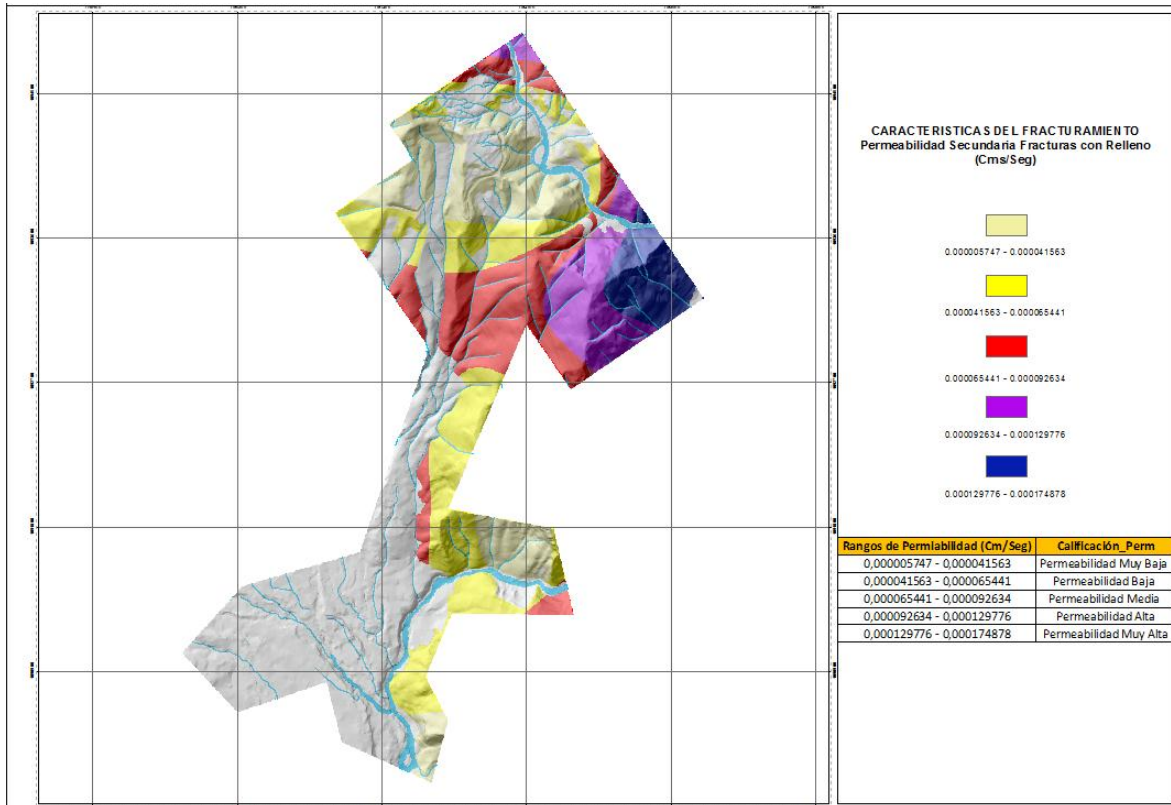


Fig. 12. Modelo de permeabilidad secundaria con relleno en las juntas, área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En este modelo es fácil apreciar un mejor ajuste de las áreas obtenidas con las unidades geológicas presentes en el área de estudio, esto debido a que también se tiene en cuenta la conductividad hidráulica en la roca intacta. Existe una relación directa entre estos valores y el tipo de roca por lo tanto hay una dependencia espacial entre la variable y la posición geográfica del muestreo. Habiendo resaltado lo anterior, se debe también hacer especial énfasis en que esta ecuación no tiene en cuenta que un alto porcentaje de las diaclasas se presentan sin relleno, por lo tanto los valores obtenidos en este modelo son aproximados mas no exactos.

1.4.6. Agrupamiento de los paquetes litológicos como unidades hidroestratigráficas, con base en sus propiedades hidrogeológicas.

Las unidades se determinaron haciendo una agrupación de las características de fracturamiento tomando como límites los cambios litológicos bruscos entre formaciones o sus miembros; se les dio una mayor relevancia a la Permeabilidad Secundaria y a la Densidad de Fracturamiento, ya que estos dos parámetros son los de mayor peso a la hora de calificar una unidad en términos de conductividad Hidráulica, acumulación de fluido y potencial como acuífero Tabla 4.

Tabla 4. Rangos de permeabilidad y su asociación litológica

Rangos de Permeabilidad (Cm/Seg)	Calificación_Perm	Rangos Densidad de Fracturamiento (No de Diaclasas)	
0,000005747 - 0,000041563	Permeabilidad Muy Baja	120 - 130	
0,000041563 - 0,000065441	Permeabilidad Baja	130 - 140	
0,000065441 - 0,000092634	Permeabilidad Media	140 - 150	
0,000092634 - 0,000129776	Permeabilidad Alta	150 - 155	
0,000129776 - 0,000174878	Permeabilidad Muy Alta	155 - 162	
Calificación DenFrac	Unidad Hidroestratigrafica (Roca)	Litología Roca	Granulometría Roca
Densidad de Fracturamiento Muy Baja	Unidad Hidroestratigrafica 1	Kilm D1	Lutitas Negras
Densidad de Fracturamiento Baja	Unidad Hidroestratigrafica 2	Kilm D2	Arcillolitas; Lodolitas; Limolitas
Densidad de Fracturamiento Media	Unidad Hidroestratigrafica 3	Kilm C; Kiaj MA	Intercalacion Lutitas Areniscas de grano fino
Densidad de Fracturamiento Alta	Unidad Hidroestratigrafica 4	Kiaj MB; Kiaj MC	Areniscas de Grano fino
Densidad de Fracturamiento Muy Alta	Unidad Hidroestratigrafica 5	Kiaj MD	Arenisca de Grano medio; Intercaladas con lutitas muy fracturadas

En la Figura 13 se observan las unidades Hidroestratigraficas en roca y su relación las formaciones rocosas del área de estudio, las tonalidades verdes representan las unidades con características hidrogeológicas poco favorables, las tonalidades azules representan las unidades con permeabilidades altas, alta densidad de fracturamiento y condiciones hidrogeológicas propicias como unidad hidroestratigrafica de alto potencial.

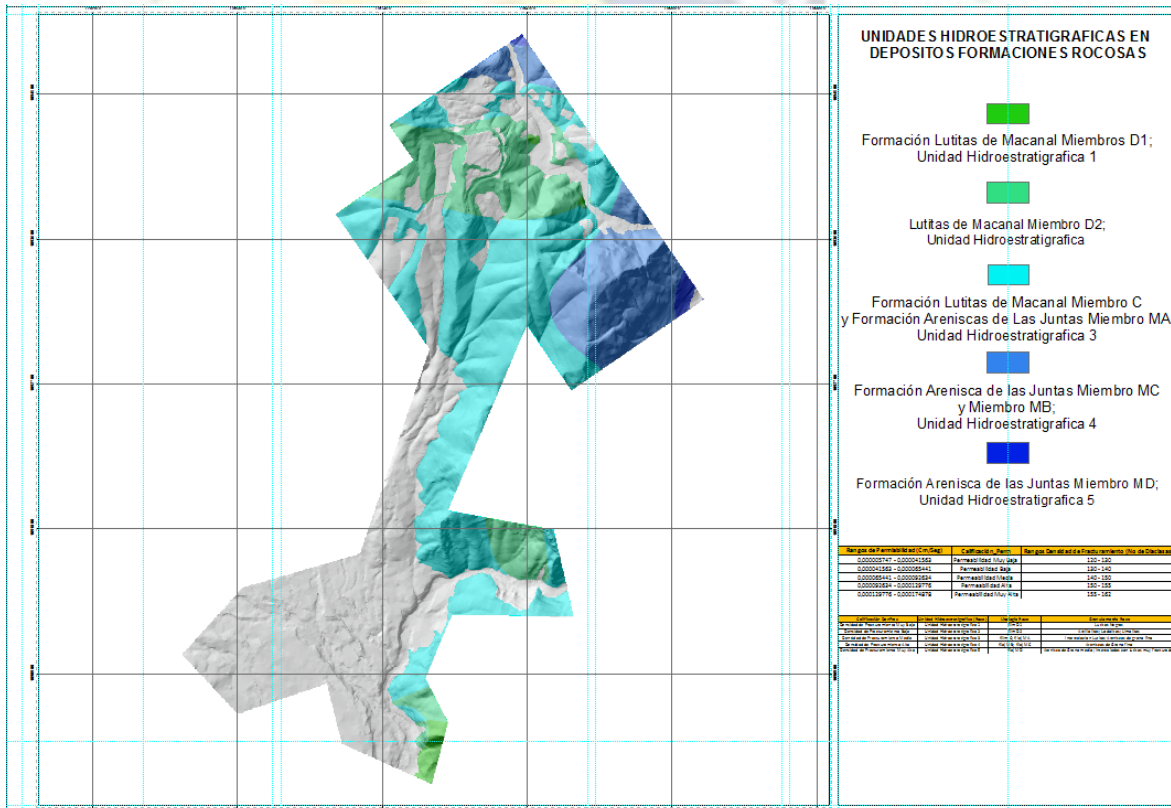


Fig. 13. Modelo de Hidroestratigraficas en unidades rocosas, área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

2. CONCLUSIONES

La existencia de valores extremos, ya sean por exceso o por defecto, pueden afectar la estacionariedad de los datos y en ultimas, la calidad de la estimación a la hora de generar el modelo. Definir si estos datos son eliminados o no, requiere del análisis contextual de dichos datos; para este estudio, los criterios utilizados en la inclusión de estos obedeció a la dificultad de encontrar afloramientos rocosos en la zona y a que estos eran extremos debido a esta falencia y no a errores en la toma de los mismos.

Las técnicas geoestadísticas en comparación con las tradicionales presentan mayores confiabilidades (hasta 90%), ya que consideran la correlación espacial para predecir un valor a partir de otros cercanos. Para este caso, el Kriging universal constituyo una técnica ideal para representar las variables que intervienen en el cálculo de la permeabilidad secundaria, presentando valores de error medio cuadrático inferiores a 3 en todos los casos.

El método de modelamiento Kriging Universal permito observar zonas en las cuales las variables cumplen en mayor o menor grado con las características de fracturamiento que pueden encontrarse, sin embargo al ser un método que se basa en la relación espacial entre las variables, no tiene en cuenta aspectos geológicos y tectónicos que influyentes en el fracturamiento de una unidad rocosa.

El uso de la fórmula para el cálculo de la permeabilidad (conductividad hidráulica) secundaria en medios rocosos fracturados sin tener en cuenta el relleno de las fracturas, arroja resultados demasiado altos debido a que supone que la fractura es un canal abierto y sin obstáculos significativos al movimiento del agua.

La fórmula para el cálculo de la permeabilidad (conductividad hidráulica) secundaria en medios rocosos fracturados teniendo en cuenta el relleno de las fracturas, proporciona resultados más acertados teniendo en cuenta que valora las variaciones de relleno (tipo); sin embargo asume que el porcentaje total de las fracturas se encuentran con algún tipo de material cementante, lo cual se pudo observar en campo que no siempre se cumple.

En estudios posteriores complementarios podría generarse una modificación a las formulas acá empleadas, contemplando variables como: continuidad de las fracturas, porcentaje de relleno en las fracturas y porcentaje de las mismas con relleno; factores que como vimos en este estudio, condicionan la exactitud en el cálculo de la conductividad hidráulica.

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

REFERENCIAS

Copeland, R., Upchurch, S.B., Scott, T.M., Kromhout, C., Arthur, J., Means, G., Rupert, P., Bond, P., 2009, Hydrogeological Units of Florida: Tallahassee, Florida, Florida Geological Survey Special Publication 28, 32 p.

Fetter C.W., 1994, Applied Hydrogeology: Nueva Jersey, EUA, Prentice Hall, pp. 691.

Maxey, G.B., 1964, Hydrostratigraphic units: Journal of Hydrology, Volume (2), pp. 124-129.

Poehls, D.J., Smith, G.J., 2009, Encyclopedic dictionary of hydrogeology: Amsterdam, Academic Press.

Seaber, P.R., 1986, Definition of hydrostratigraphic units: 2nd Annual Symposium on Florida Hydrogeology, Northwest Florida Water Management District Public Information Bulletin 82, 25-26.

Seaber, P.R., 1988, Hydrostratigraphic Units, en Back, W., Rosenshein, J.S., Seaber, P.R., (eds.), Hydrogeology: Boulder, Colorado, Geological Society of America, 9-14.

Monreal, R., Rangel, M., Morales, M., Montoya, A.G., Sosa, I.M, 2011, Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 63, Num. 1, pp. 119-135.



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA