

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA
DE UNIDADES GEOLÓGICAS.
CASO ÁREA PALMAREJO, CHIHUAHUA.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

CARLOS VALENCIA SAUCEDA

Hermosillo, Sonora, Febrero del 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

**DR. JESUS ROBERTO VIDAL SOLANO
COORDINADOR DEL PROGRAMA DE MAESTRIA
EN CIENCIAS, GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
PRESENTE:**

Por este conducto nos permitimos someter a su consideración el tema de Tesis:

**MODELACION GEOESTADISTICA DE UNIDADES GEOLOGICAS.
CASO AREA PALMAREJO, CHIHUAHUA.**

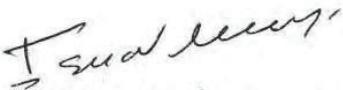
Con el fin de que el estudiante:

Carlos Valencia Saucedo

Se encuentre en condiciones de presentar su examen de grado para la obtención de su Título de Maestro en Ciencias- Geología.

Sin otro particular, quedamos de usted

ATENTAMENTE


**M.C. ISMAEL MINJÁREZ SOSA
DIRECTOR DE TESIS**


**DR. JOSE ARTURO MONTOYA LAOS
CO-DIRECTOR DE TESIS**

Ccp. Interesado
Ccp archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora a 21 de enero de 2016

M.C. Ismael Minjárez Sosa
Director de Tesis
Dr. José Arturo Montoya Laos
Co-Director de Tesis

Por este conducto les comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

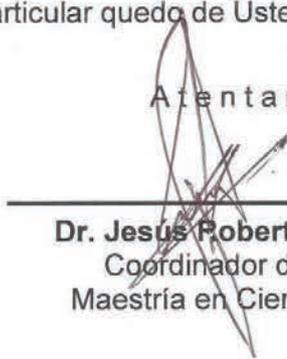
**"MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA DE UNIDADES GEOLÓGICAS. CASO
AREA PALMAREJO, CHIHUAHUA"**

Esto es con el fin de que el alumno: **VALENCIA SAUCEDA CARLOS** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Dr. Carlos Manuel Minjárez Sosa	Presidente
Dr. I. Guadalupe Espinoza Maldonado	Secretario
Dr. Arturo Montoya Laos	Vocal
M.C. Ismael Minjárez Sosa	Vocal

Sin otro en particular quedo de Ustedes

Atentamente


Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

NOMBRE DE LA TESIS:

**"MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA DE UNIDADES GEOLÓGICAS. CASO AREA
PALMAREJO, CHIHUAHUA"**

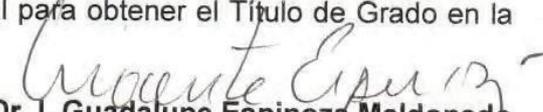
NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

CARLOS VALENCIA SAUCEDA

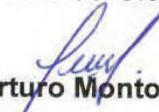
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Carlos Manuel Minjárez Sosa

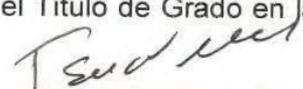
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. I. Guadalupe Espinoza Maldonado

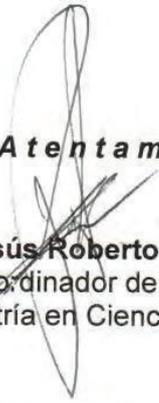
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Arturo Montoya Laos

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

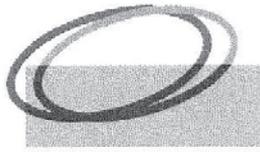

M.C. Ismael Minjarez Sosa

Atentamente


Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



COEUR MEXICANA®

Hermosillo, Sonora México. 01 de Diciembre de 2015

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador del programa
Maestría en Ciencias-Geología
Universidad de Sonora

En relación a la tesis de maestría denominada; "Modelación Geoestadística de Unidades Geológicas. Caso Área Palmarejo Chihuahua", realizada con información referente a la base de datos de perforación del Proyecto Palmarejo, Chihuahua; compilada hasta Diciembre del 2004, propiedad de Coeur Mining, hago de su conocimiento que dicha compañía autoriza al Geólogo Carlos Valencia Saucedo para que utilice esta información con fines académicos.

Me despido de usted enviándole un cordial saludo y agradeciéndole su atención.

Ing. Cástulo Molina Sotelo
VP de Coeur Mining en México

DEDICATORIA

Esta aventura de seguir estudiando y buscar ampliar las fronteras de mi conocimiento tiene un árbol genealógico de etiquetas, donde mi esposa Ingrid y mi hijo Carlos tienen el papel principal, a ellos les dedico estas páginas y agradezco por estar ahí todo el tiempo de estudio, esfuerzo, desvelos, esos momentos donde hay que tomar fuerzas y seguir adelante, por aguantarme y alentarme.

A mi hermano Javier, que es mi cómplice permanente en esta y el resto de las aventuras que emprendemos y que llamamos vida, a Gaby y mis sobrinos Javier y María ...

A mi hermana Sylvia, mis sobrinos Sofía y Rodrigo Javier, que siempre están presente en cada momento y que han abordado con nosotros el barco de "hágalo usted mismo", por eso y más..

A mi hermano Enrique, que siempre está presente en las buenas y en las malas y con quien siempre hay tiempo de una mesa redonda..

A mis hermanitas las nenitas Sara y Mirna ..

Con gran cariño y admiración a mi MADRE Y DAVID que siempre nos apoyaron e incitaron en estudiar.

Ya después lo demás viene solo decían, gracias siempre...

A mi Padre, mi tata Joel, mi nana Chayo, a Pedro donde quiera que estén..

A mi abuela Aurora, por sus enseñanzas y cuidados fuertes y suaves..

A mis tíos Saucedo, Rodolfo, David, Jorge, Arturo y Lupita

A mis tíos Valencia, Joel, Julio, Javier, Concepción y Linda.

A mi Familia Huitron, mi suegra Oralita, Juan, Arleth, Juan Pablo, Arlin y Mailin por estar ahí apoyándonos en todo..

A mis amigos...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme aceptado como becario con número de registro 504572 en el plan de Maestría en Ciencias-Geología, durante el período de Agosto de 2012 a Agosto de 2014.

Al personal del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora por los espacios, medios y equipos proporcionados para el desarrollo de este trabajo.

A mi hermano Javier Valencia Saucedo que siempre cree en mí aunque yo mismo no lo haga e invariablemente apoyarme profesionalmente.

A mi director de tesis José Ismael Minjarez Sosa por aceptarme, respaldarme por esa paciencia que lo caracteriza, mi más apreciable agradecimiento.

A mi co-director de tesis José Arturo Montoya Laos por su soporte siempre incondicional, sus enseñanzas, así como apoyarme siempre con mis ideas.

A mis sinodales Inocente Guadalupe Espinoza y Carlos Minjarez Sosa por su valiosa colaboración y sustento en este trabajo académico.

A M. Griselda Minjarez Sosa y Jose Alfredo Ochoa G. por su apoyo e ideas.

Al Ingeniero Cástulo Molina de "Coeur Mining", agradezco por su amable apoyo y cooperación ya que sin su ayuda no se hubiese podido realizar este trabajo.

A Mi tío David Saucedo quien me propuso este tema de tesis y que hoy se ha visto ya materializado.

A Albita y por su amistad sus correcciones, sugerencias y apoyo.

A Sofía por su amistad y apoyo ortográfico ;)

A todos mis compañeros de trabajo y amigos, Gracias!!!

INDÍCE DE CONTENIDO

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- PROBLEMÁTICA.....	2
1.2.- OBJETIVO.....	3
1.2.1.- OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3.- ALCANCES	3
2.- ANTECEDENTES	4
2.1.- MODELAMIENTO GEOLÓGICO TRADICIONAL	4
2.2. – BASES DE LA GEOESTADÍSTICA.....	5
2.2.1.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	5
2.3.- SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA.....	7
2.3.1.- SIMULACIÓN SECUENCIAL DE INDICADORES.....	8
2.4.- KRIGING DE INDICADORES	9
3.- GENERALIDADES.....	11
3.1.- LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	11
3.2.- GEOLOGÍA LOCAL	12
3.1.1.- ESTRATIGRAFÍA.....	14
3.1.2.- ESTRUCTURAS	16
3.1.3.- MINERALIZACIÓN.....	16
4.- METODOLOGÍA.....	19
4.1.- CASO ÁREA PALMAREJO CHIHUAHUA	19

4.1.1.- CODIFICACIÓN DE VARIABLES CATEGÓRICAS EN INDICADORES	19
4.2.- ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	20
4.2.1.- BASE DE DATOS A UTILIZAR	20
4.2.2.- UBICACIÓN ESPACIAL	21
4.2.3.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LITOLOGÍAS	22
4.2.4.- ESTADÍSTICA BÁSICA	23
4.2.5.- GRILLA	25
4.3.- MAPA VARIOGRÁFICO	25
4.4.- ANÁLISIS VARIOGRÁFICO	26
4.4.1.- KTal	26
4.4.2.- KTam	28
4.4.3.- KTap	30
4.4.4.- KTapp	32
4.4.5.- KTat	34
4.4.6.- KTrt	36
4.4.7.- VBX	40
4.5.- SIMULACIÓN: CASO ÁREA PALMAREJO CHIHUAHUA	43
4.5.1.- RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
4.6.- VALIDACIÓN	75
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	81

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio	11
Figura 2. Mapa geológico del área de estudio	13
Figura 3. Columna estratigráfica del área de estudio	15
Figura 4. Mapa de planta con litologías y compósitos.....	22
Figura 5. Ubicación 3D de los compósitos proyectados en vista al este	22
Figura 6. Ubicación 3D de los compósitos proyectados en vista al norte	23
Figura 7. Grilla del área de estudio.....	25
Figura 8. Mapa variográfico KTal.....	27
Figura 9. Mapa variográfico KTam	29
Figura 10. Mapa variográfico KTap	31
Figura 11. Mapa variográfico KTapp	33
Figura 12. Mapa variográfico KTat	35
Figura 13. Mapa variográfico KTrt	37
Figura 14. Mapa variográfico VBX.....	40
Figura 15. Vista de planta unidad geológica KTal simulación 1	44
Figura 16. Vista de planta unidad geológica KTal simulación 2	44
Figura 17. Vista de planta unidad geológica KTal simulación 3	45
Figura 18. Vista al Este unidad geológica KTal simulación 1	45
Figura 19. Vista al Este unidad geológica KTal simulación 2	46
Figura 20. Vista al Este unidad geológica KTal simulación 3	46
Figura 21. Vista al Norte unidad geológica KTal simulación 1.....	47
Figura 22. Vista al Norte unidad geológica KTal simulación 2.....	47
Figura 23. Vista al Norte unidad geológica KTal simulación 3.....	48
Figura 24. Vista de planta unidad geológica KTam simulación 1	48
Figura 25. Vista de planta unidad geológica KTam simulación 2	49
Figura 26. Vista de planta unidad geológica KTam simulación 3	49
Figura 27. Vista al Este unidad geológica KTam simulación 1	50
Figura 28. . Vista al Este unidad geológica KTam simulación 2	50
Figura 29. Vista al Este unidad geológica KTam simulación 3	51

Figura 30. Vista al Norte unidad geológica KTam simulación 1	51
Figura 31. Vista al Norte unidad geológica KTam simulación 2	52
Figura 32. Vista al Norte unidad geológica KTam simulación 3	52
Figura 33. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 1	53
Figura 34. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 2	53
Figura 35. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 3	54
Figura 36. Vista al Este unidad geológica KTap simulación 1	54
Figura 37. Vista al Este unidad geológica KTap simulación 2	55
Figura 38. Vista al Este unidad geológica KTap simulación 3	55
Figura 39. Vista al Norte unidad geológica KTap simulación 1	56
Figura 40. Vista al Norte unidad geológica KTap simulación 2	56
Figura 41. Vista al Norte unidad geológica KTap simulación 3	57
Figura 42. Vista de planta unidad geológica KTapp simulación 1	57
Figura 43. Vista de planta unidad geológica KTapp simulación 2	58
Figura 44. Vista de planta unidad geológica KTapp simulación 3	58
Figura 45. Vista al Este unidad geológica KTapp simulación 1	59
Figura 46. Vista al Este unidad geológica KTapp simulación 2	59
Figura 47. Vista al Este unidad geológica KTapp simulación 3	60
Figura 48. Vista al Norte unidad geológica KTapp simulación 1	60
Figura 49. Vista al Norte unidad geológica KTapp simulación 2	61
Figura 50. Vista al Norte unidad geológica KTapp simulación 3	61
Figura 51. Vista de planta unidad geológica KTat simulación 1	62
Figura 52. Vista de planta unidad geológica KTat simulación 2	62
Figura 53. Vista de planta unidad geológica KTat simulación 3	63
Figura 54. Vista al Este unidad geológica KTat simulación 1	63
Figura 55. Vista al Este unidad geológica KTat simulación 2	64
Figura 56. Vista al Este unidad geológica KTat simulación 3	64
Figura 57. Vista al Norte unidad geológica KTat simulación 1	65
Figura 58. Vista al Norte unidad geológica KTat simulación 2	65
Figura 59. Vista al Norte unidad geológica KTat simulación 3	66

Figura 60. Vista de planta unidad geológica VBX simulación 1.....	66
Figura 61. Vista de planta unidad geológica VBX simulación 2.....	67
Figura 62. Vista de planta unidad geológica VBX simulación 3.....	67
Figura 63. Vista al Este unidad geológica VBX simulación 1	68
Figura 64. Vista al Este unidad geológica VBX simulación 2	68
Figura 65. Vista al Este unidad geológica VBX simulación 3	69
Figura 66. Vista al Norte unidad geológica VBX simulación 1	69
Figura 67. Vista al Norte unidad geológica VBX simulación 2.....	70
Figura 68. Vista al Norte unidad geológica VBX simulación 3.....	70
Figura 69. Vista de planta simulación 1 de unidades geológicas	71
Figura 70. Vista de planta simulación 2 de unidades geológicas	71
Figura 71. Vista de planta simulación 3 de unidades geológicas	72
Figura 72. Vista al Este simulación 1 de unidades geológicas	72
Figura 73. Vista al Este simulación 2 de unidades geológicas	73
Figura 74. Vista al Este simulación 3 de unidades geológicas	73
Figura 75. Vista al Norte simulación 1 de unidades geológicas	74
Figura 76. Vista al Norte simulación 2 de unidades geológicas	74
Figura 77. Vista al Norte simulación 3 de unidades geológicas	75
Figura 78. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTal.....	76
Figura 79. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTam ..	76
Figura 80. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTap ...	77
Figura 81. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTapp .	77
Figura 82. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTat	77
Figura 83. Perforaciones excluidas de la simulacion 4 (vista rotada) VBX.....	78

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Codificación de litologías	21
Tabla 2. Coordenadas del origen y dimensiones del área de estudio.....	21
Tabla 3. Códigos, porcentajes y número de compósitos por litología	24

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Histograma de proporción de litologías.....	24
Gráfica 2. Variograma direccional KTal 116°	27
Gráfica 3. Variograma direccional KTal 26°	28
Gráfica 4. Variograma direccional KTam 165°	29
Gráfica 5. Variograma direccional KTam 75°	30
Gráfica 6. Variograma direccional KTap 175°	31
Gráfica 7. Variograma direccional KTap 85°	32
Gráfica 8. Variograma direccional Ktapp 85°	33
Gráfica 9. Variograma direccional Ktapp 175°	34
Gráfica 10. Variograma direccional KTat 165°	35
Gráfica 11. Variograma direccional KTat 75°	36
Gráfica 12. Variograma direccional KTrt 0°	37
Gráfica 13. Variograma direccional KTrt 45°	38
Gráfica 14. Variograma direccional KTrt 90°	38
Gráfica 15. Variograma direccional KTrt 135°	39
Gráfica 16. Variograma omnidireccional KTrt	39
Gráfica 17. Variograma direccional VBX 0°	40
Gráfica 18. Variograma direccional VBX 45°	41
Gráfica 19. Variograma direccional VBX 90°	41
Gráfica 20. Variograma direccional VBX 135°	42
Gráfica 21. Variograma omnidireccional VBX.....	42



1.- INTRODUCCIÓN

Los depósitos epitermales conocidos hasta la fecha en México son de edad Terciaria Eoceno medio a Mioceno temprano (desde el Luteciano hasta el Aquitaniano) y su distribución espacial coincide con la distribución espacial determinada por la evolución del vulcanismo de la Sierra Madre Occidental y de la Sierra Madre del Sur.

El ambiente epitermal, tal como indica la propia etimología de este término, se halla a escasa profundidad en referencia a la superficie terrestre y, en concreto, define la parte superior de los sistemas hidrotermales naturales. (Camprubí, Albinson et al; 2006).

Este trabajo está basado en uno de estos tipos de depósito, en específico La Mina Palmarejo. Con el cual se pretende ejemplificar el uso de herramientas geoestadísticas para la estimación de las unidades geológicas.

En todo proyecto minero, el manejo de información del yacimiento es de vital importancia para la toma de decisiones, dados los altos costos de exploración, es por eso que es fundamental contar con información geológica precisa y certera para poder evaluar económicamente un proyecto.

Con esta idea en mente, comenzamos a trabajar con simulación o modelo numérico, el cual consiste en construir una variable regionalizada que “se parece” a aquella que se estudia, es decir, que reproduce su continuidad espacial y también coincide con los valores medidos en los sitios de los datos. Se recurre a las técnicas de simulación porque el conocimiento exhaustivo de la variable real es imposible, por falta de tiempo y presupuesto o a causa de obstáculos naturales. Estas técnicas se apoyan en la interpretación de la variable regionalizada como una realización de una función aleatoria y en el modelamiento de su distribución espacial.



Actualmente los modelos geológicos son generalmente construidos a través del conocimiento geológico de especialistas, de forma determinística, imposibilitando la cuantificación de la incertidumbre asociada.

Nosotros utilizaremos la técnica geoestadística de simulación secuencial de indicadores para generar modelos probabilísticos con variables categóricas, esta técnica interpreta la distribución real de las variables como una realización de una función aleatoria. Si bien, de este modo es posible cuantificar la variabilidad e incertidumbre sobre la variable regionalizada, en estos métodos se infiere la continuidad espacial a partir de relaciones entre pares de puntos a la vez, por ejemplo mediante variogramas.

1.1.- PROBLEMÁTICA

Es mostrar una forma de hacer simulación geológica para variables categóricas a través del uso de herramientas geoestadísticas implementadas en software libre.

La información recabada de las etapas preliminares de exploración de los proyectos mineros nos permite hacer, entre otras cosas, un modelamiento geológico tradicional determinístico en el sentido de la generación de un único modelo a partir de la información disponible e interpretación geológica. Es claro que el modelamiento geológico es subjetivo y potencialmente distinto dependiendo del personal a cargo de realizarlo.

La metodología que se propone en este trabajo es una herramienta de apoyo para la interpretación de unidades geológicas (variables categóricas), por el método de simulación secuencial de indicadores. Con el cual se podrá discutir con los geólogos de proyecto la interpretación geológica, con el fin de producir información lo más precisa posible de lo que esperamos encontrar en el subsuelo en nuestra exploración con los datos de perforación.



1.2.- OBJETIVO

1.2.1.- OBJETIVO GENERAL

Examinar, evaluar y aplicar técnicas y metodologías para realizar un estudio de simulación de unidades geológicas mediante métodos geoestadísticos con el apoyo de software de uso libre.

1.2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Investigación, identificación y alcances de los diversos software libres que existen actualmente para la simulación geoestadística de una base de datos de perforación minera.
- b) En base a la información disponible de software libre identificar cuáles son los idóneos para la simulación de unidades geológicas para el caso de estudio.
- c) Aplicar y evaluar metodologías para la utilización de variables categóricas codificadas en variables binarias que servirán en la implementación de un algoritmo matemático que se ajuste a la información de la base de datos de perforación minera en particular a la descripción litológica del área.
- d) En base al software y el algoritmo implementado, hacer las simulaciones correspondientes de las unidades geológicas.
- e) Validar cualitativamente de manera visual las simulaciones obtenidas del software libre SGeMS, a partir de un criterio geológico conceptual.

1.3.- ALCANCES

Este trabajo consiste en aplicar los métodos geoestadísticos que incorporen unidades geológicas. Para ello, se cuenta con datos reales adquiridos en las campañas de perforación del proyecto Palmarejo, correspondientes a los años 2003 y 2004. Para validarlos se registran las litologías por compósito en cada barreno.



2.- ANTECEDENTES

2.1.- MODELAMIENTO GEOLÓGICO TRADICIONAL

El modelamiento geológico tradicional de yacimientos se encarga de establecer la extensión espacial o volúmenes de unidades asociadas a cierto atributo petrofísico como litología, alteración, zonas minerales, etc.

A grandes rasgos la puesta en marcha del modelamiento geológico tradicional posee las siguientes etapas:

- Revisión y recopilación de la información recabada de exploración.
- Selección del área de estudio a modelar, así como, establecer los atributos a modelar.
- Conceptualización de la genética y fenomenología del depósito en estudio.
- Trazado de un mallado de secciones sobre el área de estudio e interpretación.
- Realización de una correlación del mallado de secciones interpretadas, información de barrenos y geología de superficie.
- Generación de sólidos por litología.
- Elaboración de un modelo tridimensional, uniendo todos los sólidos obtenidos.

En la práctica, la realización consiste en la interpretación manual en planos de las unidades a modelar a partir de la información disponible. Esta interpretación debe respetar tanto los conceptos geológicos planteados, así como las muestras disponibles.

La interpretación geológica tiene un carácter subjetivo, sujeta al juicio particular del responsable en realizarlo. En cierta medida, la información se encuentra sesgada a la experiencia y concepción del modelo.



2.2. – BASES DE LA GEOESTADÍSTICA

La palabra “geoestadística” fue acuñada por Georges Matheron en 1962. El prefijo “geo” alude a las ciencias de la tierra, que ha sido históricamente la disciplina donde la geoestadística se ha desarrollado. Los campos de aplicación actuales alcanzan los dominios más variados, como la evaluación de recursos naturales (mineros, forestales, gas, petróleo, etc.), ciencias del suelo y medio-ambientales, topografía, oceanografía, geofísica, agricultura y análisis de imágenes, por nombrar algunos. El término “estadística” se refiere al uso de herramientas estadísticas y probabilísticas.

Con respecto a la estadística clásica, la geoestadística busca tomar en cuenta las dependencias entre las observaciones disponibles, considerando que ellas están ubicadas en el espacio. (Emery, 2007).

La Geoestadística se define como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales (Journel y Huijbregts, 1978) o simplemente, el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio (Chauvet, 1994), siendo una herramienta útil en el estudio de estas variables (Zhang, 1992). Su punto de partida es asumir una intuición topoprobabilista (Matheron, 1970).

2.2.1.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Variable aleatoria (VA): Variable que puede tomar una serie de posibles valores de acuerdo a su distribución de probabilidad.

Variable regionalizada (VR): Denotada como $z(x)$ corresponde a una descripción numérica del fenómeno regionalizado (fenómeno distribuido en una región del espacio), donde x corresponde a un sitio o porción del espacio (muestreado o no).



Como ejemplo de variables regionalizadas es posible mencionar: las leyes minerales, concentración de contaminantes, densidad de roca, etc.

Una variable regionalizada presenta un aspecto dual: Localmente presenta un carácter errático o aleatorio, donde una descripción probabilística es adecuada y por otro lado, un aspecto global más estructurado, en el cual una interpretación funcional es necesaria. En el caso multivariable, se habla de coregionalización para indicar un conjunto de variables regionalizadas.

Variables discretas o categóricas: Permiten codificar un conjunto de dominios que subdividen el espacio (por ejemplo, dominios definidos por tipos de roca) o representar variables con un número limitado de valores.

Campo (D): Es la región del espacio donde tiene lugar el fenómeno regionalizado o hasta donde tiene sentido estudiarlo, típicamente en minería, el límite de un yacimiento. Es usual trabajar en una porción del campo denominada Dominio.

Soporte: Se denomina soporte de una variable regionalizada a la superficie o el volumen sobre el cual una variable regionalizada puede definirse, no sólo en cada punto del espacio, sino que también en una superficie (2D) o en un volumen (3D).

Función aleatoria (FA): Una de las suposiciones básicas en geoestadística es la interpretación de cada valor en el espacio de la variable regionalizada $z(x)$ como el resultado o realización de una variable aleatoria $Z(x)$. Al conjunto de variables aleatorias $\{Z(x); x \in D\}$ se le denomina función aleatoria Z . Por su parte el conjunto $\{z(x); x \in D\}$ que corresponde a la variable regionalizada se entiende como una realización de la función aleatoria Z .

Esta interpretación permite representar el carácter dual de la variable regionalizada, el aspecto errático local entregado por la variable aleatoria $Z(x)$ y el aspecto estructurado entregado por las correlaciones espaciales existentes entre las



variables aleatorias $Z(x)$ que constituyen la función aleatoria Z . Por otro lado, dicha interpretación permite pensar que los datos disponibles constituyen una de las posibles realizaciones de Z en los sitios de muestreo.

Distribución espacial: Como antes se mencionó la función aleatoria Z se compone de varias variables aleatorias definidas en el espacio. La descripción de la FA corresponde al conjunto de las distribuciones de los vectores aleatorios $(Z(x_1), \dots, Z(x_k))$ para todos sus posibles tamaños k y para todas las posibles ubicaciones, donde la distribución de un vector aleatorio corresponde a la distribución conjunta de sus componentes es dada por:

$$F_{X_1, \dots, X_k}(z_1, \dots, z_k) = \text{prob}(Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k)$$

Este conjunto de distribuciones, $\{F_{X_1, \dots, X_k}(z_1, \dots, z_k); \forall k \in \mathbb{N}, \forall x_i \in D\}$, constituye la distribución espacial de la función aleatoria Z .

En la práctica, la distribución espacial es inasequible y en cierta medida innecesaria, pues en general, con caracterizar los primeros momentos de la distribución espacial es posible generar un modelo aceptable de la realidad. (Caceres, 2010)

2.3.- SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA

Las simulaciones geoestadísticas son utilizadas para construir una variable regionalizada ficticia que reproduzca la variabilidad y estructura espacial de una variable regionalizada real. Para ello, se interpreta la variable regionalizada real como una realización de una función aleatoria. Las simulaciones se obtienen como realizaciones de esta función en el espacio. De este modo, es posible construir escenarios que reproducen la variabilidad espacial real, a diferencia de los métodos de estimación, los cuales, si bien estiman en promedio correctamente, suavizan los



valores extremos y ocultan información relevante para realizar ciertos análisis de importancia.

Una simulación que simplemente reproduce la variabilidad espacial de una variable regionalizada, conociendo la distribución espacial de una función aleatoria, se conoce como simulación no-condicional. En el caso de tener datos reales conocidos (por ejemplo sondajes), contenidos dentro del espacio que se pretende simular, se desea generalmente que los modelos respeten y reproduzcan estos valores. En estos casos se habla de simulación condicional, las cuales se pueden describir como una realización de una función aleatoria, que respeta su estructura espacial y que reproduce ciertos valores conocidos en las posiciones correspondientes.

Con respecto a la variable a simular, ésta puede ser de 3 tipos: Una variable continua, como por ejemplo una ley de un elemento, una variable categórica como por ejemplo litologías o un objeto como conjunto y con una morfología en el espacio determinada.

En este trabajo en particular, se construirán simulaciones de unidades geológicas (litologías) condicionados a la información de sondajes, es decir, se realizarán simulaciones categóricas condicionales. La inferencia de la estructura espacial de la variable se hará a partir de estadísticas basadas en pares de puntos, como los variogramas.

2.3.1.- SIMULACIÓN SECUENCIAL DE INDICADORES

Se aplica kriging indicador de manera secuencial donde una categoría precisa es dibujada por simulación de Monte Carlo en cada ubicación. Todas las ubicaciones son visitadas de forma secuencial con un incremento en el nivel de condicionamiento. Se sigue un orden aleatorio evitando los objetos. La realización de la simulación reproduce el variograma indicador de acuerdo con el mismo principio de kriging



sencillo utilizado en las variables continuas. Desviaciones en la relación de orden conducen a una falta de la reproducción.

La simulación secuencial de indicadores corresponde a una de las técnicas más utilizadas de los llamados enfoques no paramétricos, combina el formalismo de indicador con el paradigma de secuencial a simulación continua no paramétrica o distribución categórica. En el caso continuo, en todos los puntos a lo largo de la trayectoria de simulación, los valores no paramétricos de la función de distribución condicional acumulada, se estiman uno por valor de umbral utilizando kriging indicador del dato transformado en indicador del vecino más cercano.

Para el caso categórico, la probabilidad para cada categoría que se produzca se estima por kriging indicador, (el cual se describe más adelante). Esta metodología puede ser aplicada tanto a variables categóricas como a variables continuas, mediante la codificación en indicadores. (Remy, Boucher, Jinbing Wu, 2009)

En aplicaciones geológicas se procede con la codificación de las unidades geológicas en indicadores. La idea central es la construcción de una distribución local de probabilidad para las diferentes litologías, que representa la probabilidad de ocurrencia de cada litología en un punto del espacio. La obtención de la distribución local es obtenida por medio del kriging de indicadores asociados a las litologías.

2.4.- KRIGING DE INDICADORES

El kriging de indicadores, es un kriging en donde previamente se tienen los valores transformados a binarios, está basado en una codificación de la variable Z en un conjunto de variables binarias o indicadores, según si Z sobrepasa o no determinados umbrales (Emery, 2007), y se utiliza un variograma indicador apropiado como la función estructural del kriging. El estimador del kriging de indicadores a menudo se encuentra entre el intervalo [0,1] y puede ser interpretado como probabilidad.



Se utilizará este método para la variabilidad espacial de variables categóricas, como por ejemplo la presencia o ausencia de una litología específica, alteración, tipo de suelo etc.



3.- GENERALIDADES

3.1.- LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la Hoja Geológica G12-3 a 1:250,000 de Ciudad Obregón del INEGI y en el mapa topográfico 1:50,000 G12-B38 de Chínipas de Aldama de INEGI centrado en las coordenadas geográficas 27°23' de longitud y 108°26' de latitud (Figura 1). El sistema de coordenadas usado para todos los planos y secciones es Transversal Universal de Mercator (WGS 84) Zona 12 (Hemisferio Norte).



Figura 1. Ubicación del área de estudio



3.2.- GEOLOGÍA LOCAL

La mina Palmarejo está situado en la región geográfica de la Sierra Madre Occidental, está compuesto en gran parte de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Terciario intermedio. La mineralización en el área de tesis está hospedada en el Grupo Volcánico Inferior. El Grupo Volcánico Inferior se encuentra por debajo y en discontinuidad con el Grupo Volcánico Superior, el cual consiste predominantemente de una cama de ignimbritas. (Corbett 2004).

Riolitas basales, rocas volcanoclásticas y andesitas del Grupo Volcánico Inferior cubren la superficie y las exposiciones subterráneas en el área de estudio (Figura 2). Las ignimbritas del Grupo Volcánico Superior no están expuestas en el área de estudio, pero son visibles en las partes superiores de la sierra de los alrededores. Basado en una imagen de satélite Laurent, (2004) sugiere que Palmarejo está situado a el flanco suroeste de una pequeña caldera.

La estructura de La Prieta se extiende durante al menos dos kilómetros, tiene un rumbo aproximado de 115° , y un echado al sureste de 35° a 85° . (Corvett, 2004), fallas oeste-noroeste son identificadas como la estructura La Prieta, éstas pueden haberse mineralizado durante o posteriormente a el movimiento distensivo norte-noroeste así como la estructura de La Blanca.

La estructura de vetas de La Blanca con un rumbo alrededor de 160° echada 60° al sur-oeste se piensa que es una falla lítrica normal (Corvett, 2004) las cuales son paralelas a la tendencia de las fallas regionales de la Sierra Madre Occidental. Fallas con orientación muy similar son las estructuras comúnmente mineralizadas el área regionalmente.

Una amplia zona de stockwork mineralizado se forma en la intersección de las estructuras de La Blanca y La Prieta.



Las estructuras en el área de estudio siguen un tren hacia el norte-noroeste las cuales se van ensanchando con tendencia al norte en la intersección de La Blanca y La Prieta. (Beckton, 2004)

Existen en el área de estudio varias fallas extensionales con rumbo noroeste, echado noreste que se pueden trazar por varios kilómetros. Las vetas tienen rellenos de fisuras, brechas de vetas y zonas de stockwork con leyes altas de oro y plata (Hall 2003).

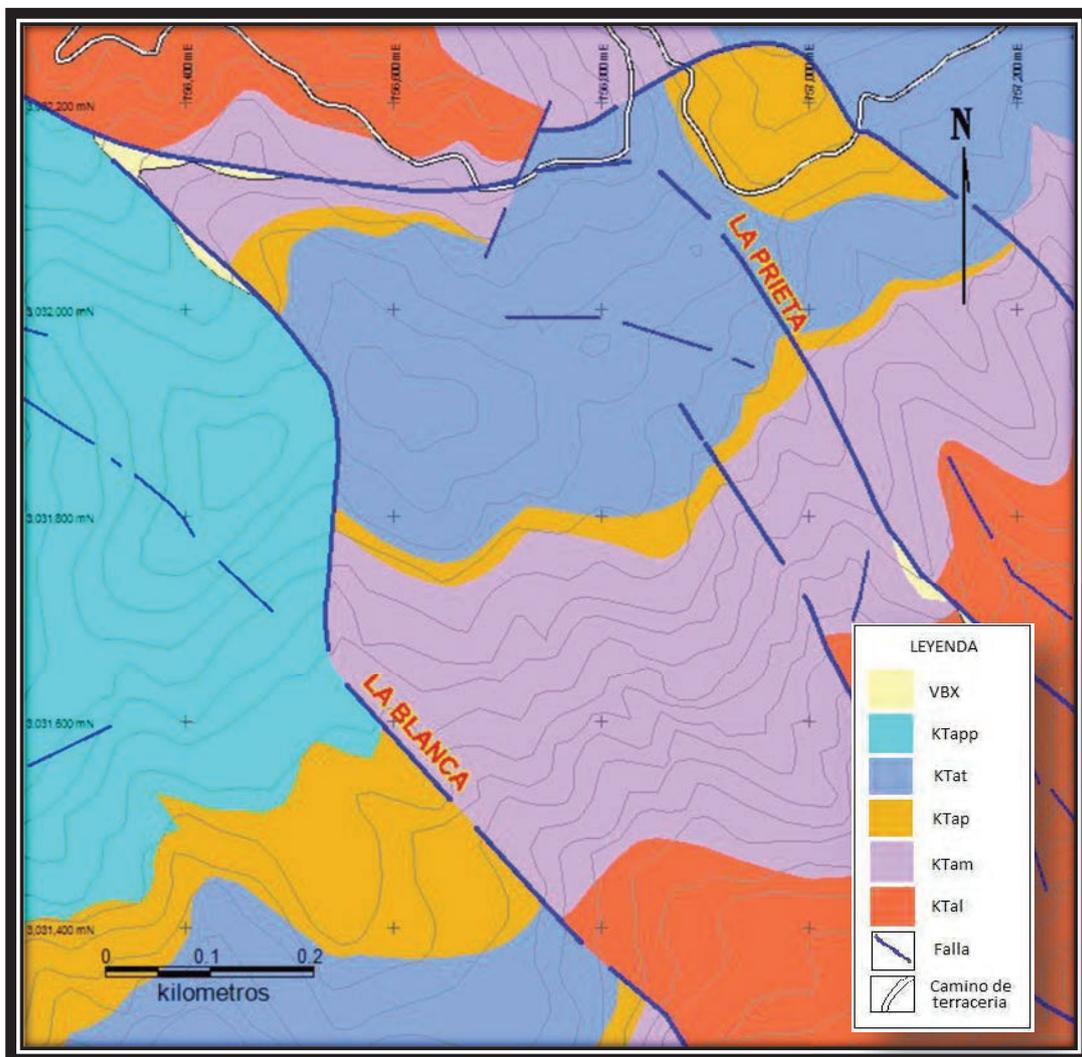


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio



3.1.1.- ESTRATIGRAFÍA

El área de estudio se encuentra cubierta en su totalidad por rocas volcánicas y volcanoclásticas del Grupo Volcánico Inferior del Terciario intermedio.

La secuencia estratigráfica en el área son manifestaciones volcánicas de fines del Terciario intermedio (Figura 3), estas rocas se clasificaron de manera macroscópica por los geólogos del proyecto como se muestra a continuación.

HYBX – Brecha hidrotermal: Variación de silificación saturada a brechas de expansión, rellenas de cuarzo y sistemas de vetas intercaladas.

QVBX – Brecha de veta de cuarzo: Brecha de expansión rellena de cuarzo y sistemas de vetas intercaladas.

KTapp – Andesita porfídica: Roca de color púrpura, café a café rojizo, pórfido de plagioclasas, rico en fenocristales de feldespatos euhedrales equigranulares con matriz finamente recristalizada, parches de arcillas con orientación aparente, débilmente magnético. Vista en afloramiento, se distingue del KTap por tener una matriz granular casi holocristalina en partes.

KTap – Dacita porfídica: Presenta una coloración gris a café oscuro, textura porfídica, fenocristales máficos anhedrales, cristales de hornblenda usualmente intemperizados a óxidos de fierro de color gris.

KTat – Toba lapilli lítica: Roca de color gris a café verdoso. Volcanoclástica tobácea mal clasificada, angular a sub-redondeada, compuesta de fragmentos líticos de composición andesítica, localmente presenta estratificación gradada.

KTam –Andesita basáltica amigdaloides: Roca de color gris oscuro a verde, presenta textura amigdaloidal con fenocristales tabulares de feldespato alineados en textura traquítica, matriz afanítica gris a negra, localmente abundan amígdalas



rellenas de calcita o calcedonia, a veces con anillos de clorita, débilmente magnética, localmente ocurre en forma de almohadillas.

KTal – Toba de ceniza: Roca volcanoclástica laminada o en capas delgadas de color morado intemperizada a café, moderadamente clasificada, arenisca fina y limo depositado en capas delgadas, localmente calcáreo, las capas a veces tienen grietas de desecación, el material es más grueso hacia el fondo de la unidad con conglomerados de grava redondeada en la base.

KTrt – Ignimbrita con cristales y líticos: Toba riolítica color rosa a gris claro, marcas de flama, líticos, ojos de cuarzo anhedrales, riolita no deformada en matriz vítrea afanítica, textura eutaxítica, resistente forma escarpes grandes.

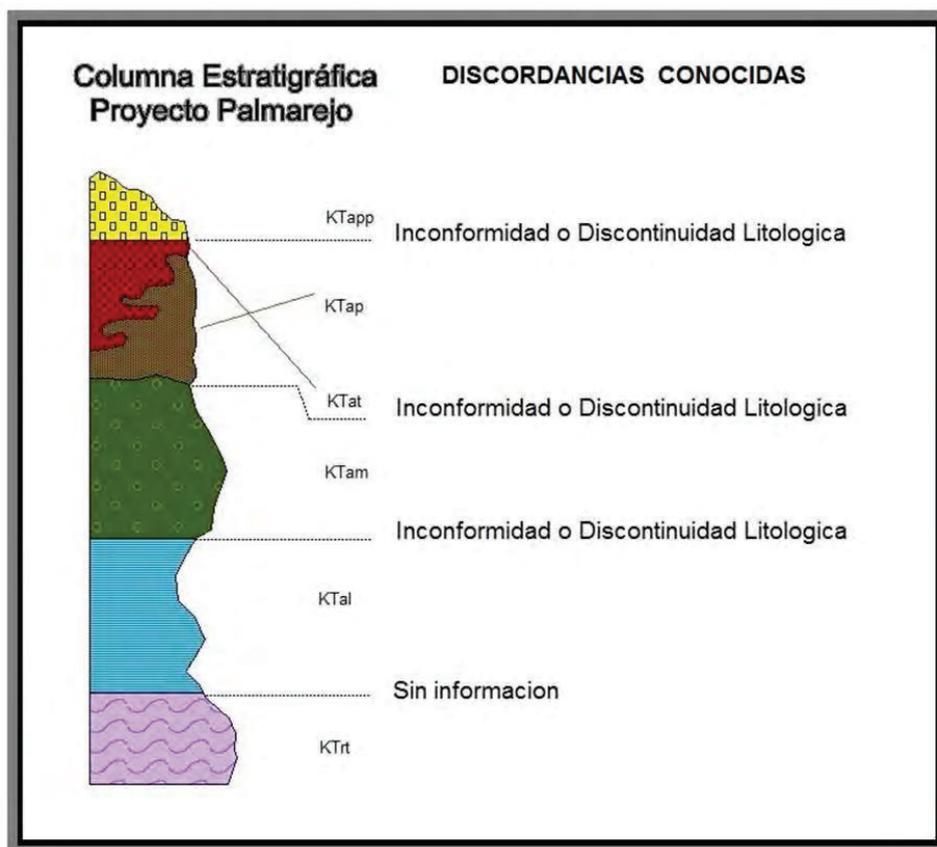


Figura 3. Columna estratigráfica del área de estudio



3.1.2.- ESTRUCTURAS

Las estructuras más antiguas conocidas del área de estudio se ven al lado este del pueblo Palmarejo, siendo las siguientes estructuras principales:

La estructura de La Prieta, hospeda la mayor parte de la mineralización perforada a la fecha y fue el centro de la explotación histórica. Tiene una longitud de dos kilómetros, el rumbo es variable pero promedia 115° azimutales con un echado entre 35° y 85° grados al suroeste.

La estructura de La Blanca, tiene un rumbo 157° azimutales que es la orientación de fallas regionales para la Sierra Madre Occidental (Corbett 2004). Esta orientación para estructuras mineralizadas es también aparente en las direcciones de La Patria y Guadalupe. La estructura de La Blanca se termina en la intersección con la estructura La Prieta. En esta intersección estructural se han registrado las intercepciones mineralizadas más significantes.

Las estructuras dominantes en el área de estudio están orientadas al noroeste en la misma dirección general que La Blanca. También están presentes desplazamientos al norte de estas estructuras. Estas últimas características probablemente desplacen las estructuras mineralizadas de La Blanca y La Prieta. Trabajos anteriores (Sánchez, 1991) nombran sólo una falla post-mineral que se ha marcado como normal pues yuxtapone rocas riolíticas del volcánico superior contra andesitas de volcánico inferior del reliz del bajo.

3.1.3.- MINERALIZACIÓN

La mineralización de Au-Ag es hospedada dentro de vetas de cuarzo y brechas, descrita como una variación de silisificación penetrante, el cuarzo llena brechas de expansión y cubre sistemas de vetas. Brechas bandeadas locales rellenas y vetas, son el indicativo que representa actividad hidrotermal, variando de calcedonia a cuarzo combinado dependiendo de la tasa de enfriamiento. Mucha de la



cristalización sílice/vetas de brechas formadas durante la Etapa 1 Evento hidrotermal ocurre una diseminación de sulfuros, y un grado de bandeamiento de vetas y brechas de calcedonia y ópalo durante la Etapa 2 de mineralización. Variaciones de Mn/Mg carbonatos y rodonita fueron depositados a través de los eventos de mineralización.

Dos eventos de alteración y mineralización son aparentes en el área de estudio:

Etapa I

Un evento inicial de mineralización polimetálica Au-Ag ocurre como pirita>esfalerita>galena>sulfuro negro (¿? Argentita) dentro de las brechas/vetas de cuarzo. Se interpreta que la pirita diseminada refleja una asociación con mineralización temprana de Au estilo cuarzo-sulfuro que es previa a la mineralización polimetálica Au-Ag en la mayoría de los depósitos Au-Ag relacionados a epitermales de baja sulfuración (clasificación de Corbett, 2002). En todos los demás lugares en Palmarejo, la mineralización formada a niveles de la corteza terrestre muy superficial se enfría con rapidez y por lo tanto, se caracteriza por tener sílice calcedonio de grano fino y ópalo con sulfuros diseminados.

Es importante mencionar que el evento inicial de gradación de cuarzo-sulfuro a mineralización polimetálica Au-Ag por lo general muestra mineralización Au-Ag de bajo grado pero está relacionado con la formación de brechas/vetas de cuarzo, que actúan como hospedantes para mineralización posterior.

Etapa II

La mineralización epitermal de baja sulfuración de Au-Ag posterior es discernible como bandas y brechas rellenas de sulfuros negros comprendiendo principalmente pirita, argentita, electrum y comúnmente hospedadas en calcedonia de más baja temperatura a sílice de opalina. En muchos casos bandas de ginguro están en paralelo con vetas de calcedonia y parecen ocurrir comúnmente en los



márgenes de vetas o zonas de veta/brecha. En los demás lugares, material de ginguro rellena la matriz de la brecha y ocurre dentro de fragmentos de veta en brecha (Corbett, 2004).



4.- METODOLOGÍA

4.1.- CASO ÁREA PALMAREJO CHIHUAHUA

4.1.1.- CODIFICACIÓN DE VARIABLES CATEGÓRICAS EN INDICADORES

El uso de indicadores es un método que utilizaremos para la caracterización de la variabilidad espacial de variables categóricas, como es la presencia o ausencia de una unidad geológica en específico. Esta estrategia nos permite estimar la distribución espacial de las unidades geológicas, o sea la distribución se transforma a una distribución binaria por unidad geológica.

Considerando K diferentes categorías. Ellas son mutuamente excluyentes – solo una categoría puede existir en una ubicación particular. Ellas son exclusivas – una de las categorías puede existir en todos los lugares. Las variables categóricas se expresan como una serie de variables indicadores K:

$$i(\mathbf{u}; k) = \begin{cases} 1, & \text{si la categoría } k \text{ existe en la localización } \mathbf{u} \\ 0, & \text{si no existe} \end{cases}, \quad k = 1, \dots, K$$

Una variable de indicador a menudo se interpreta como la probabilidad de una categoría para prevalecer en una determinada ubicación: La probabilidad es 1 si prevalecen y 0 si no lo hace. Las mediciones locales duras son codificadas en 1s y 0s. mediciones imprecisas o blandas pueden codificarse en probabilidades continuas entre 0 y 1. La inferencia de la geoestadística clásica se lleva a cabo usando datos indicador incluyendo desagrupación de proporciones representativas y variografía para comprender la continuidad espacial de cada variable indicador K. (Deutsch Clayton V.).



4.2.- ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

Es un conjunto de técnicas estadísticas y gráficas que permiten establecer un buen entendimiento básico del comportamiento de los datos y de las características existentes entre las variables que se estudien.

Este análisis corresponde a la etapa inicial de cualquier simulación o estimación. Consiste en estudiar los datos disponibles verificando la consistencia de los datos, analizando su distribución global, su necesidad de desagrupamiento (en caso de malla de muestreo irregular), sus distribuciones por unidades geológicas, la presencia de datos atípicos o aberrantes, registros duplicados, entre otros.

Este trabajo de análisis exploratorio de datos corresponde a la perforación de lo que fue el proyecto de exploración de Palmarejo el cual actualmente se encuentra en operación minera.

El análisis exploratorio de datos está fundamentado en tres objetivos principales.

- Analizar mediante herramientas estadísticas simples la cantidad, calidad y ubicación de los datos disponibles.
- Definir la o las zonas de estudio. Una división del campo en varias sub-zonas puede ser relevante si uno observa cambios abruptos en la distribución espacial de valores, o si la geología del fenómeno lo indica.
- Anticipar dificultades o problemas que puedan surgir en la fase de estimación local por ejemplo la presencia de valores atípicos.

4.2.1.- BASE DE DATOS A UTILIZAR

La base de datos cuenta con 54,111 compósitos, correspondientes a 555 barrenos. La longitud del compósito varía entre 1.52 y 1.53 metros de longitud en el 82.13% de los compósitos y los datos pertenecen a varias campañas de perforación.



Los datos de los compósitos registran coordenadas en (X, Y, Z) y cada compósito está asociado a una litología.

La codificación de la base de datos final para esta tesis contiene siete litologías presentadas en la Tabla 1.

CÓDIGO	LITOLOGÍAS
KTapp	Pórfido de plagioclasas rico en fenocristales
VBX	Brecha de cuarzo
KTam	Andesita amigdaloidal
KTal	Andesita volcanoclástica laminada
KTat	Arenisca volcanoclástica tobácea
KTap	Andesita (dacita) Pórfido de plagioclasa
KTrt	Ignimbrita riolita soldada

Tabla 1. Codificación de litologías

4.2.2.- UBICACIÓN ESPACIAL

Las muestras se encuentran en barrenos sub-verticales e inclinados con espaciamiento en planta promedio de 25 a 50 metros aproximadamente. Los datos se concentran al noroeste del área de estudio sobre un rumbo de 115° Azimutales. Las coordenadas del origen para la generación del grid donde se ubican espacialmente los datos de esta tesis se muestran en la Tabla 2.

DIRECCIÓN	COORDENADAS EN EL ORIGEN WGS 84 12N	DIMENSIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO EN METROS
X	756,063	1,014
Y	3,031,166	1,116
Z	666.87	588

Tabla 2. Coordenadas del origen y dimensiones del área de estudio



4.2.3.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LITOLOGÍAS

En las Figuras 4, 5 y 6 se observan los contactos litológicos, así como los diferentes espesores de las litologías.

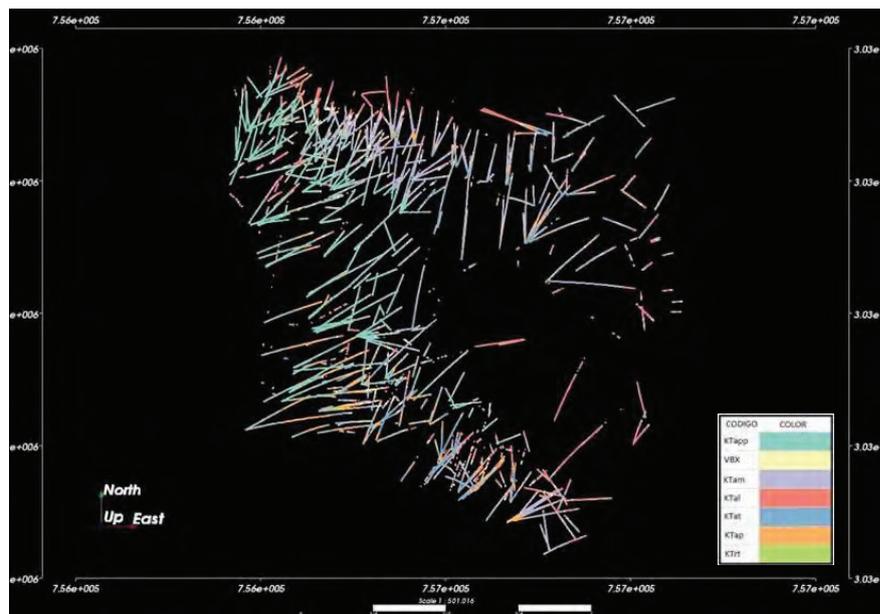


Figura 4. Mapa de planta con litologías y compósitos

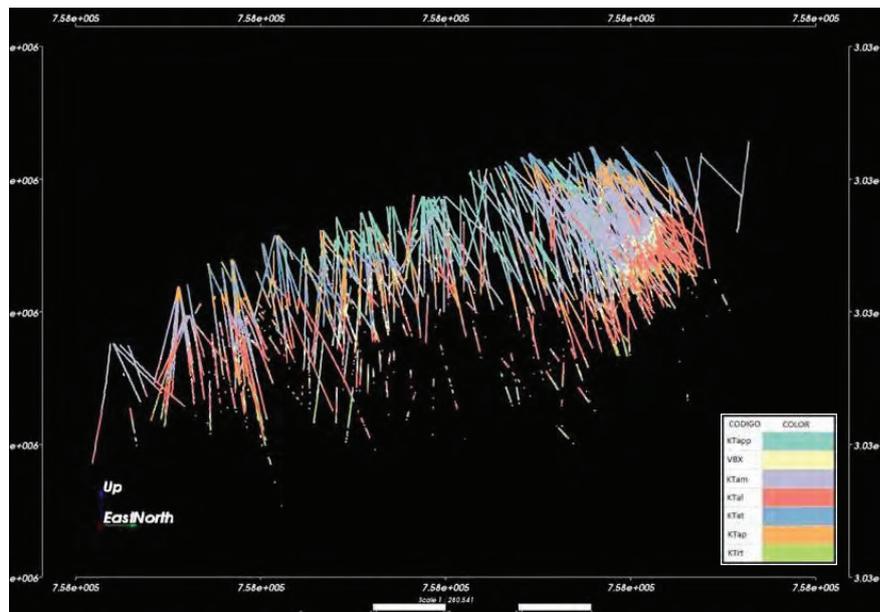


Figura 5. Ubicación 3D de los compósitos proyectados en vista al este

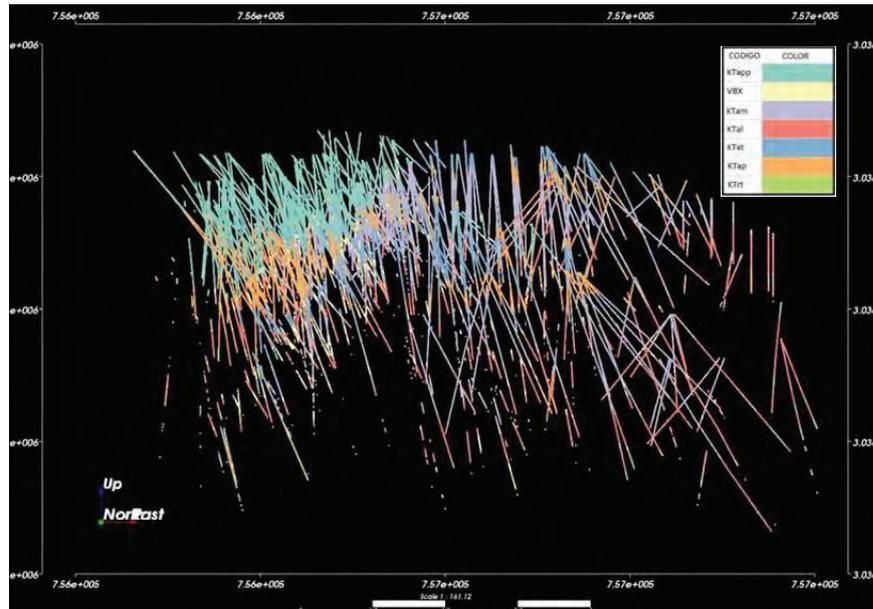


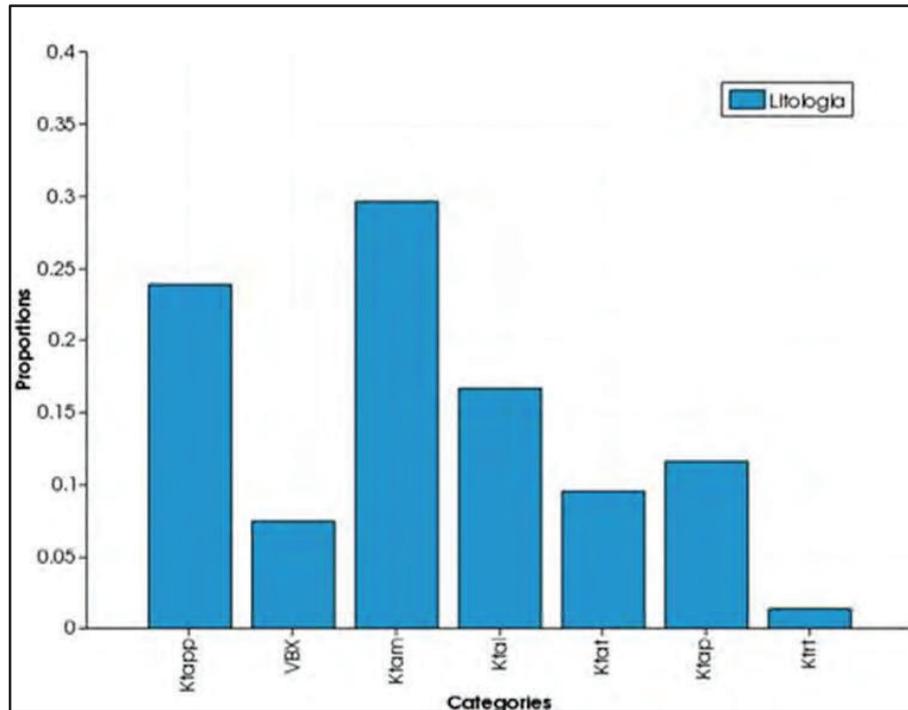
Figura 6. Ubicación 3D de los compósitos proyectados en vista al norte

4.2.4.- ESTADÍSTICA BÁSICA

En esta etapa, se realiza un estudio preliminar con el fin de detectar la existencia de datos aberrantes duplicados o inconsistencias en el código de unidades geológicas que pudiesen afectar en el trabajo posterior.

En estos gráficos no se detectó ningún dato aberrante, duplicado o sin código.

En el histograma de la Gráfica 1 se representan las frecuencias de ocurrencia en función del valor de unidades geológicas. Esto consiste en dividir el rango de los valores en intervalos y así, visualizar la proporción de datos que caben dentro de cada intervalo, siendo la función de distribución de probabilidad. Así como también nos conduce a la verificación entre los datos de varias “poblaciones” susceptibles a estar geográficamente separadas, estas separaciones se deben a que representan diferentes tipos de rocas.



Gráfica 1. Histograma de proporción de litologías

En la Tabla 3 se presentan los códigos litológicos (variable categórica), porcentajes y número de compósitos por unidad geológica.

CÓDIGO	%	COMPÓSITOS
KTapp	0.238547	12,908
VBX	0.0743102	4,021
KTam	0.296132	16,024
KTal	0.166454	9,007
KTat	0.0951747	5,150
KTap	0.115836	6,268
KTrt	0.0135462	733
TOTAL	100.00%	54,111

Tabla 3. Códigos, porcentajes y número de compósitos por litología



4.2.5.- GRILLA

Para hacer una estimación en la zona de estudio se debe de realizar una grilla (Figura 7) con el fin de estandarizar todos los resultados obtenidos por el método de estimación, esta grilla consta de las siguientes características:

- Dimensiones de celda en metros (3, 3, 3)
- Número de celdas (X,Y,Z) = (338, 372, 196)
- Coordenadas de origen X=756,063 Y=3,031,166 y Z= 666.87

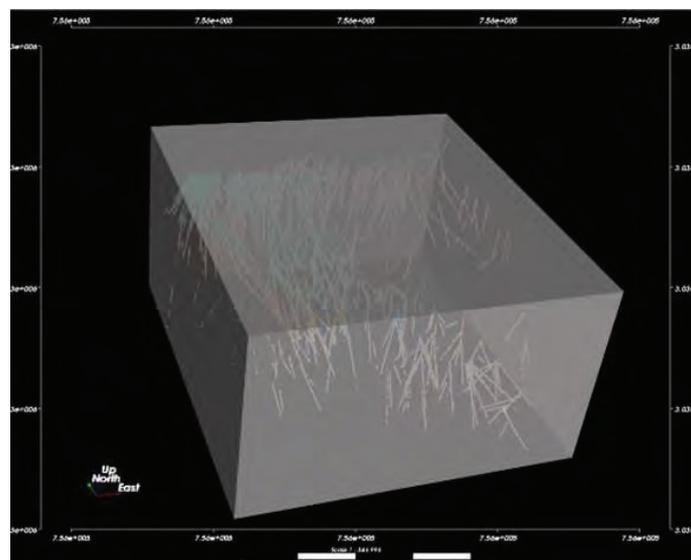


Figura 7. Grilla del área de estudio

4.3.- MAPA VARIOGRÁFICO

Consiste en visualizar el mapa variográfico en todas las direcciones del espacio, bajo la forma de un mapa con escala de color o de grises. Esto nos ayuda a distinguir si existe anisotropía, para luego calcular el modelo de variograma a lo largo de las direcciones principales de anisotropía.

Inicialmente realizamos un mapa variográfico para cada litología con la intención de obtener las direcciones principales de anisotropía de cada unidad geológica.



Estos mapas de variograma se elaboraron con el apoyo del software Surfer y un algoritmo auxiliar que proporcionan los creadores del software.

4.4.- ANÁLISIS VARIOGRÁFICO

Una vez obtenidos los mapas variográficos por unidades geológicas, se determinó si éste tiene una dirección de anisotropía o no, de ser anisotrópicos se calcularon sus direcciones principales de anisotropía, de lo contrario se determinaron omnidireccionales.

Una vez obtenidas las direcciones principales de anisotropía, se realizaron los variogramas direccionales con el Software libre SGeMS, para cada unidad geológica.

4.4.1.- K_{Tal}

El mapa variográfico de los datos de K_{Tal} (Figura 8), dibujan una dirección de mayor continuidad con una orientación azimutal de 116° aproximadamente (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños). Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales direccionales donde se aprecia un crecimiento más lento en la dirección 116° Azimutal y más rápido en la dirección ortogonal 26° Az. Para el modelamiento se prefiere utilizar estos variogramas direccionales en lugar de omnidireccionales, puesto que este último no captura el cambio de continuidad espacial con la dirección (anisotropía).

El modelo de variograma fue calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (116° y 26° Azimut) (Gráfica 2 y 3).

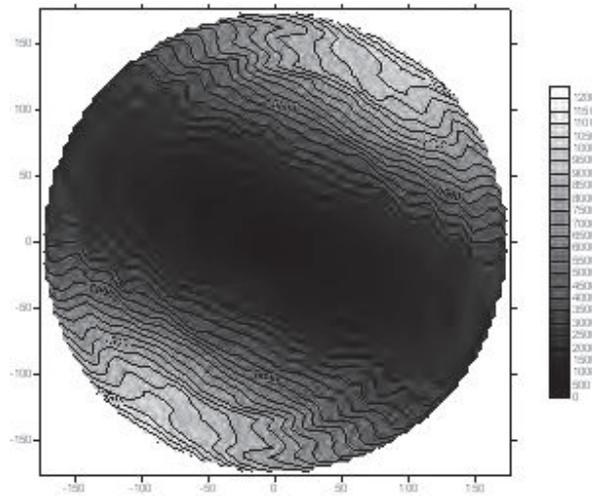
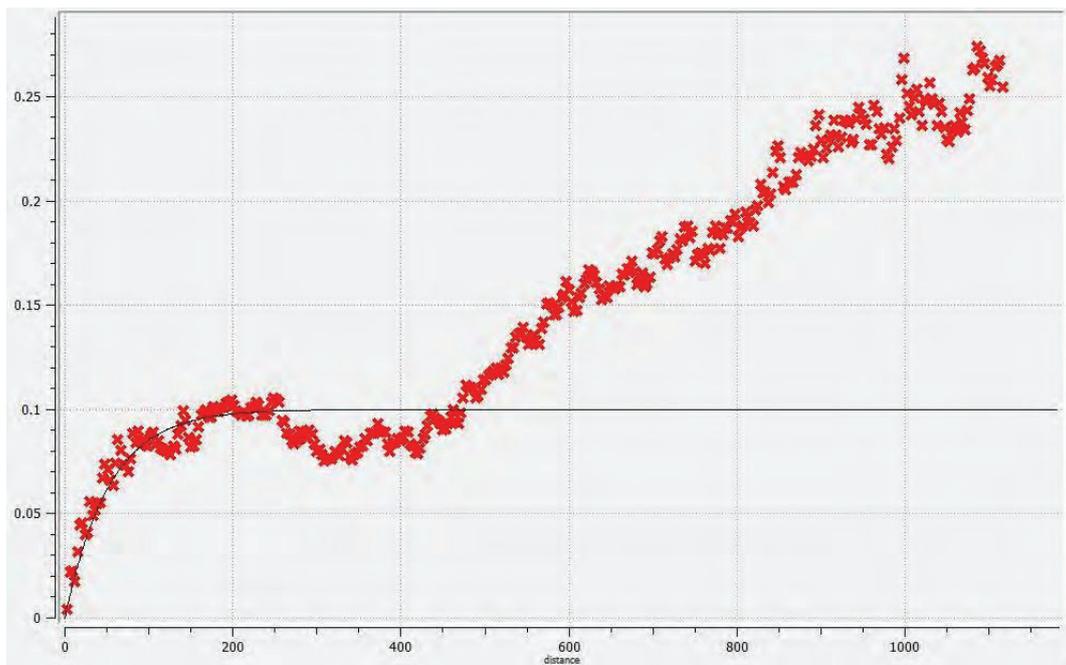
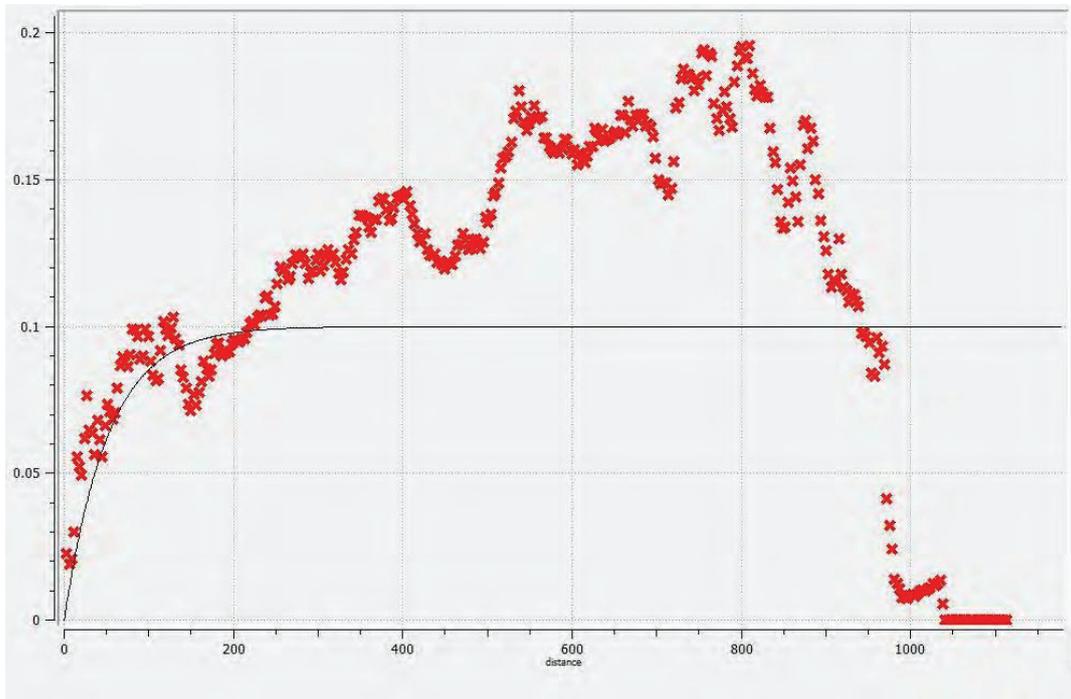


Figura 8. Mapa variográfico KTal



Gráfica 2. Variograma direccional KTal 116°



Gráfica 3. Variograma direccional KTa1 26°

4.4.2.- KTam

El mapa variográfico de los datos de Ktam (Figura 9) dibujan una dirección de mayor continuidad con una orientación azimutal de 165° aproximadamente. Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales direccionales donde se aprecia un crecimiento más lento en la dirección 165° Azimutales y más rápido en la dirección ortogonal 75 °Az. (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños).

El modelo de variograma de Ktam fue calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (165° y 75° Azimut) (Gráfica 4 y 5).

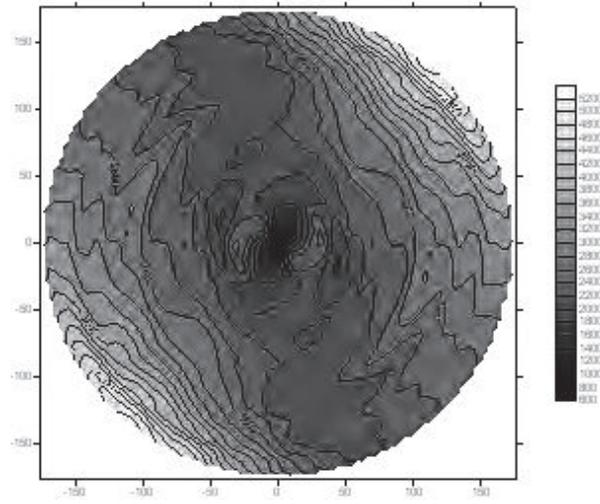
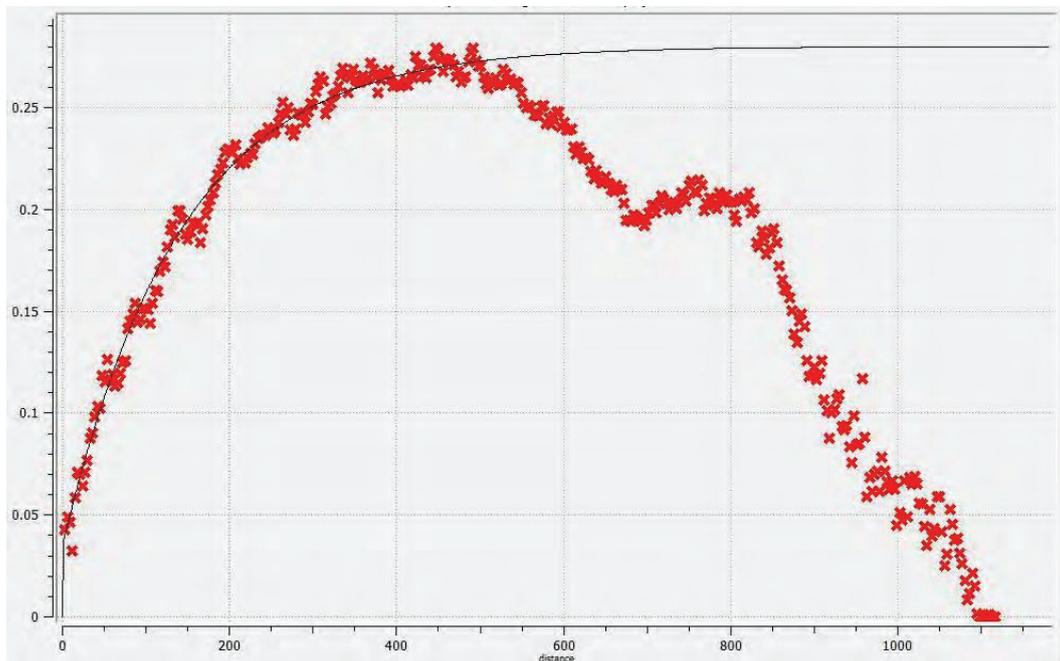
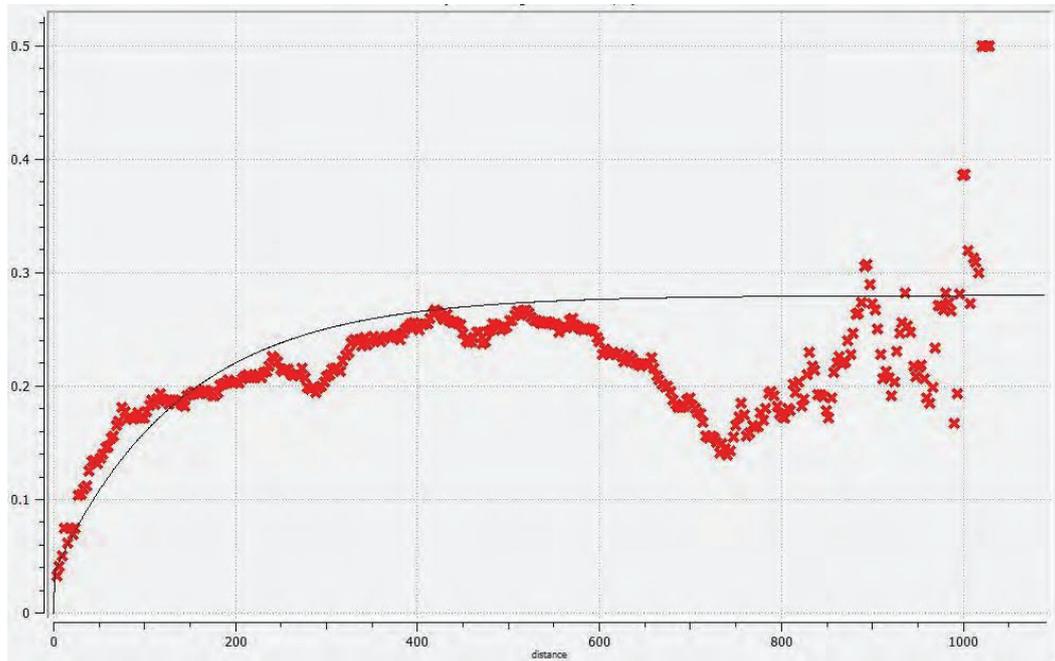


Figura 9. Mapa variográfico KTam



Gráfica 4. Variograma direccional KTam 165°



Gráfica 5. Variograma direccional KTam 75°

4.4.3.- KTap

El mapa variográfico de los datos de Ktap (Figura 10) dibujan una dirección de mayor continuidad con una orientación azimutal de 175° aproximadamente. Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales direccionales donde se aprecia un crecimiento más lento en la dirección 175° Azimutal y ligeramente más rápido en la dirección ortogonal 85° Az. (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños).

El modelo de variograma de Ktap fue calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (175° y 85° Azimut) (Gráfica 6 y 7).

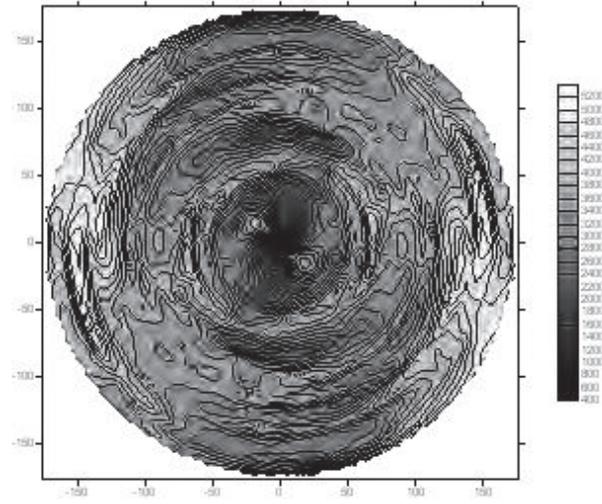
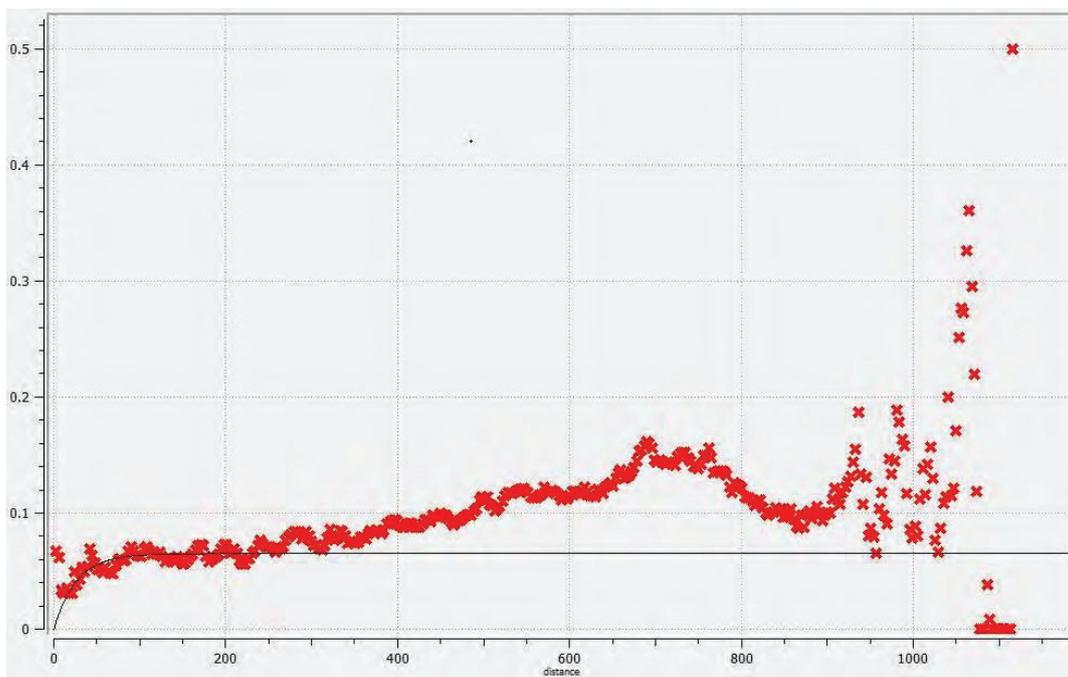
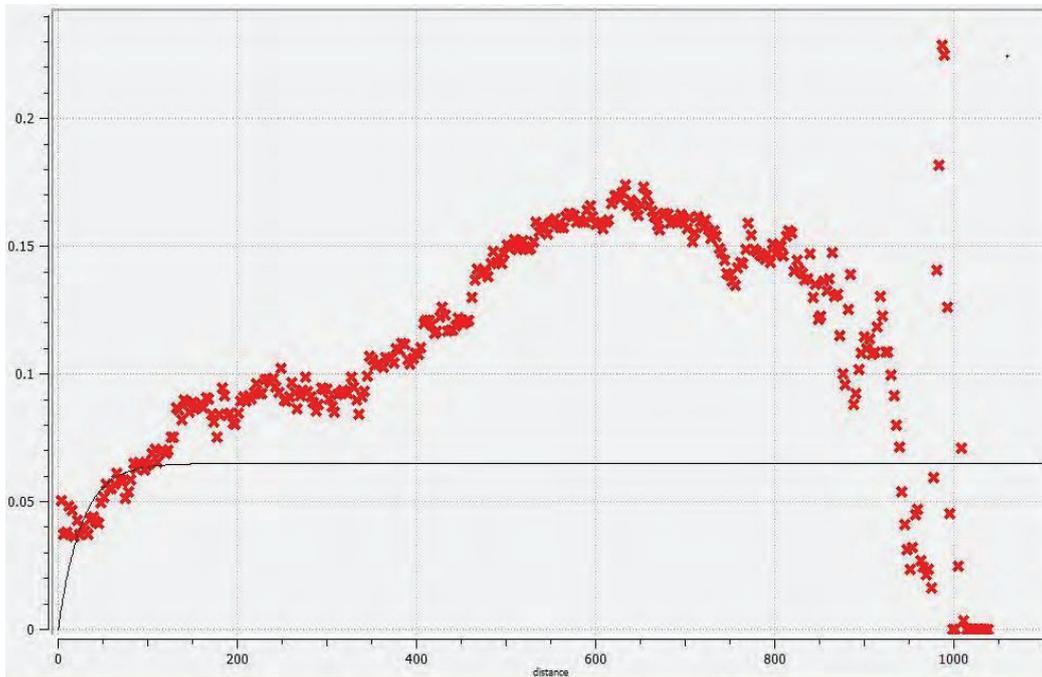


Figura 10. Mapa variográfico KTap



Gráfica 6. Variograma direccional KTap 175°



Gráfica 7. Variograma direccional KTap 85°

4.4.4.- KTap

El mapa variográfico de los datos de KTap (Figura 11) dibujan una dirección de mayor continuidad con una orientación azimutal de 85° aproximadamente (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños). Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales direccionales donde se aprecia un crecimiento más lento en la dirección 85° Azimutal y más rápido en la dirección ortogonal 175 °Az. Para el modelamiento se prefiere utilizar estos variogramas direccionales en lugar de omnidireccionales, puesto que este último no captura el cambio de continuidad espacial con la dirección (anisotropía).

El modelo de variograma de KTap fue calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (175° y 85° Azimut) (Gráfica 8 y 9).

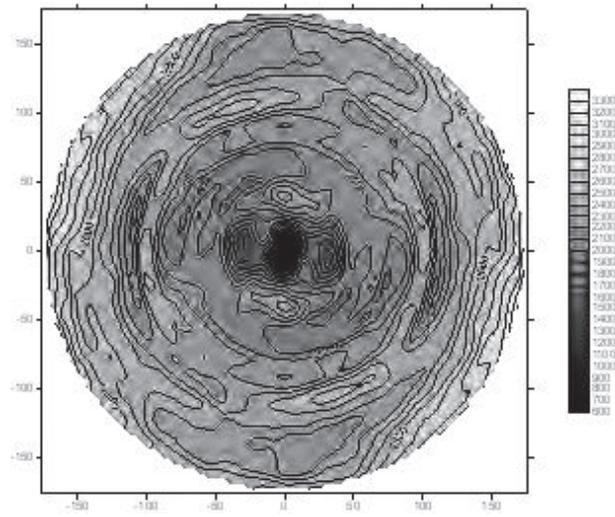
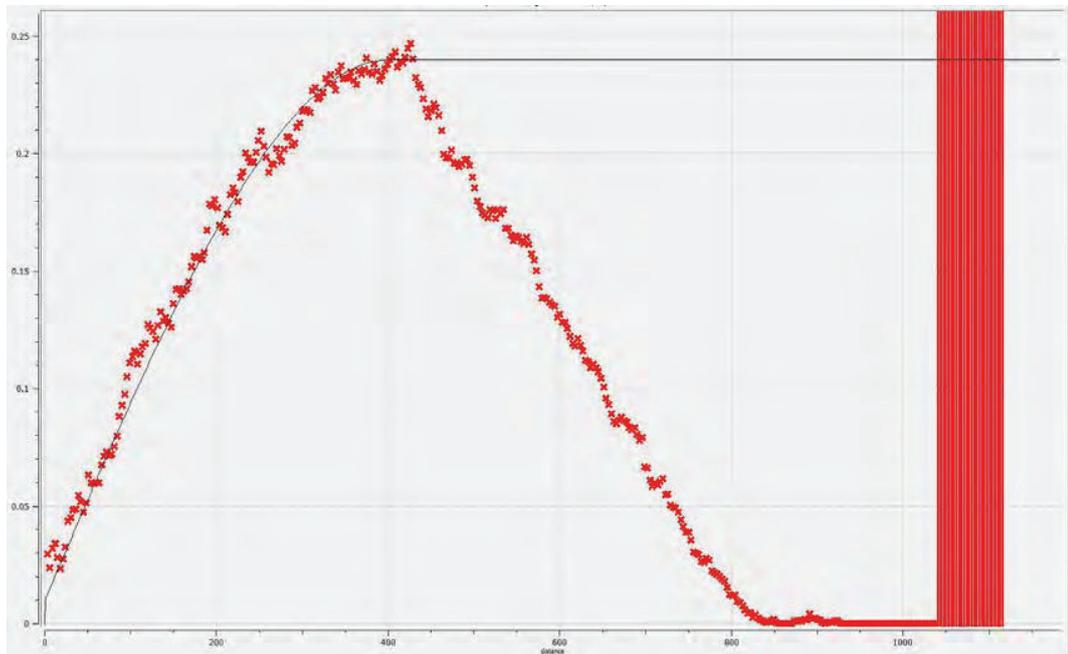
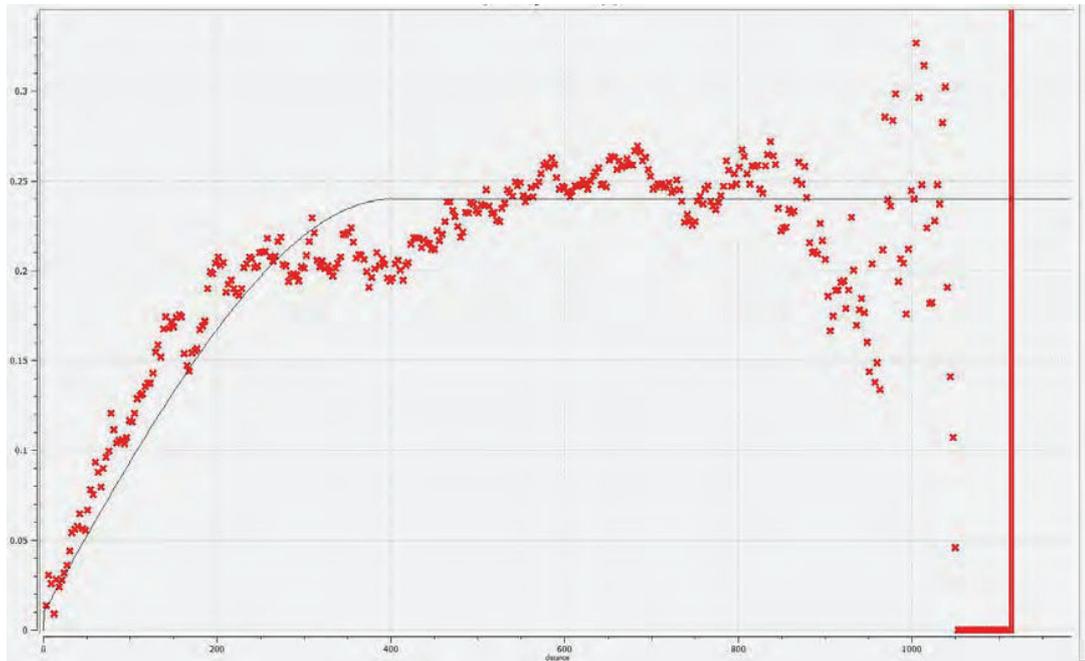


Figura 11. Mapa variográfico KTapp



Gráfica 8. Variograma direccional Ktapp 85°



Gráfica 9. Variograma direccional Ktapp 175°

4.4.5.- KTat

El mapa variográfico de los datos de KTat (Figura 12) dibujan una dirección de mayor continuidad con una orientación azimutal de 165° aproximadamente (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños). Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales direccionales donde se aprecia un crecimiento más lento en la dirección 165° Azimutal y más rápido en la dirección ortogonal 75 °Az. Para el modelamiento se prefiere utilizar estos variogramas direccionales en lugar de omnidireccionales, puesto que este último no captura el cambio de continuidad espacial con la dirección (anisotropía).

El modelo de variograma de KTat fue calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (165° y 75° Azimut) (Gráfica 10 y 11).

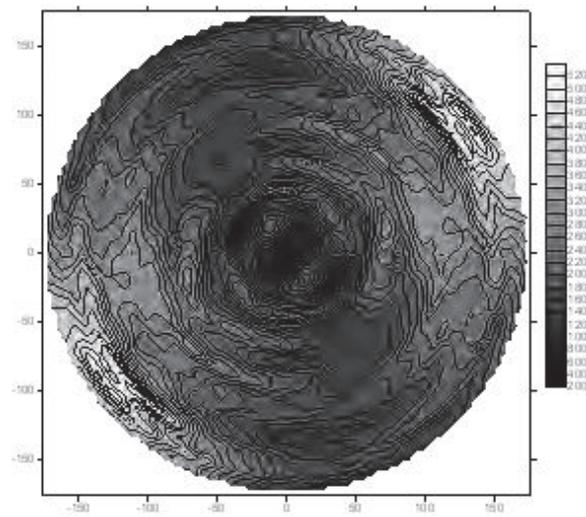
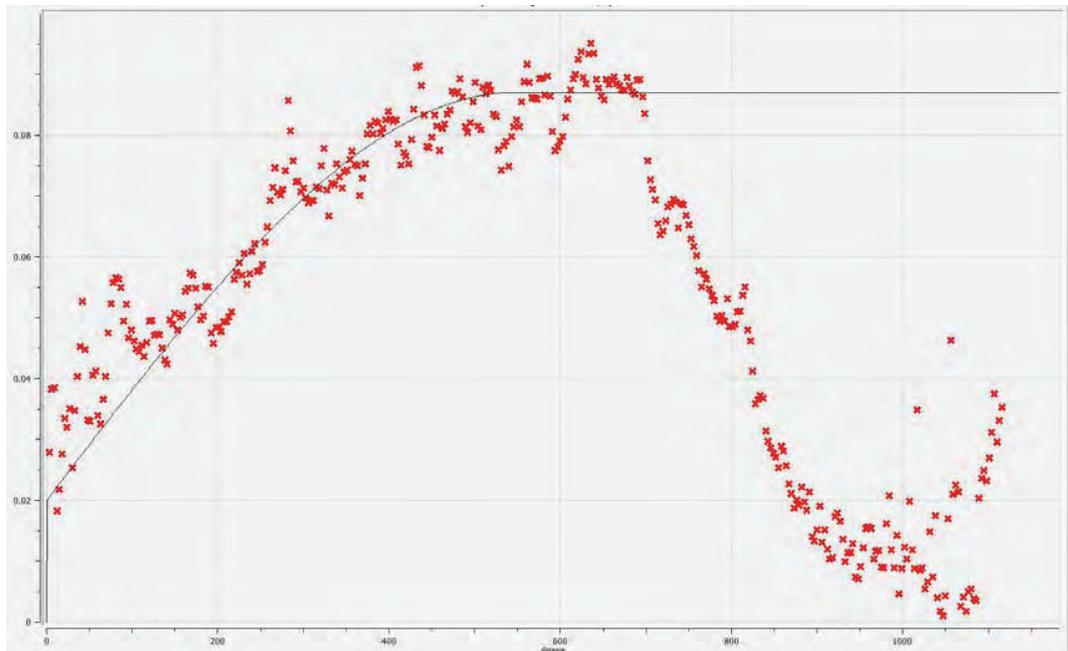
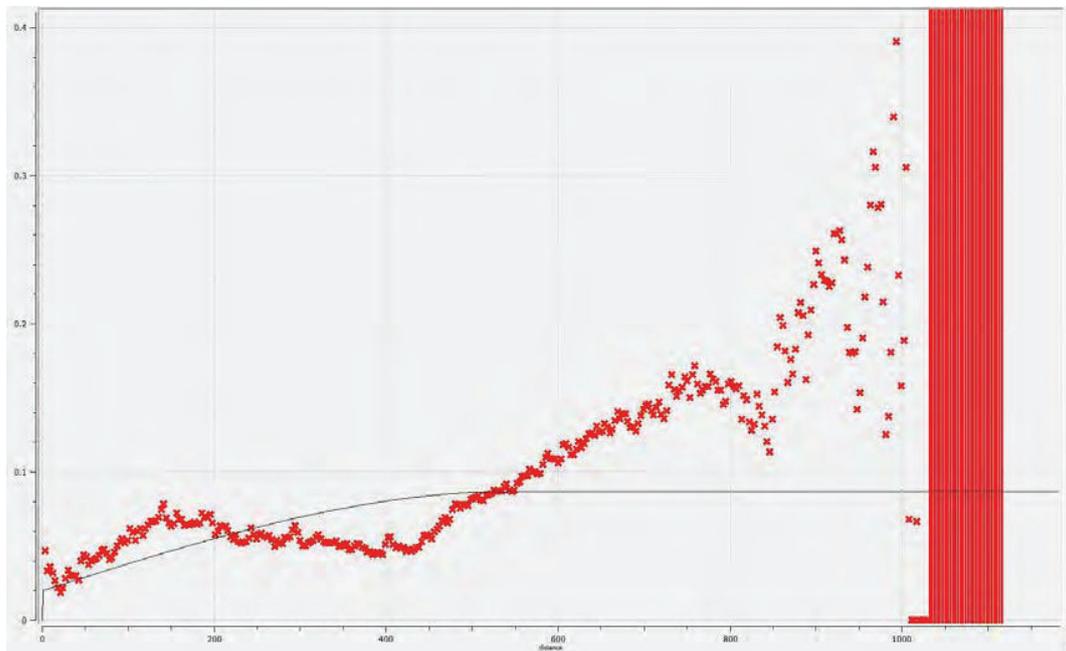


Figura 12. Mapa variográfico KTat



Gráfica 10. Variograma direccional KTat 165°



Gráfica 11. Variograma direccional KTat 75°

4.4.6.- KTrt

El mapa variográfico de los datos de KTrt (Figura 13) no dibuja una dirección de mayor continuidad. Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales en las cuatro direcciones principales 0°, 45°, 90° y 135° (Gráficas de la 12 a la 16). Así como omnidireccionalmente. (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños).

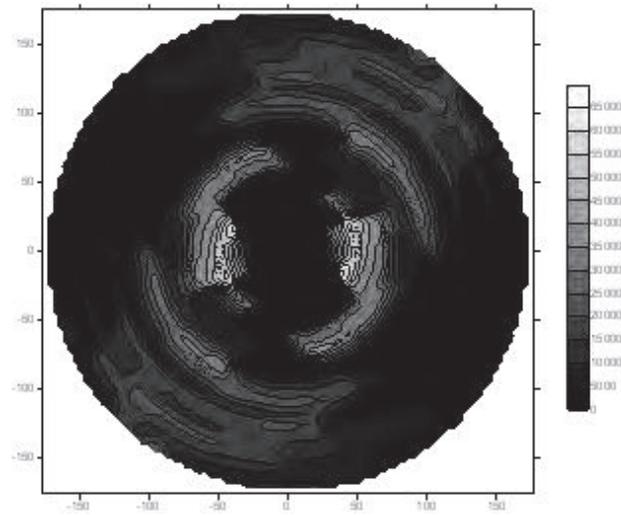
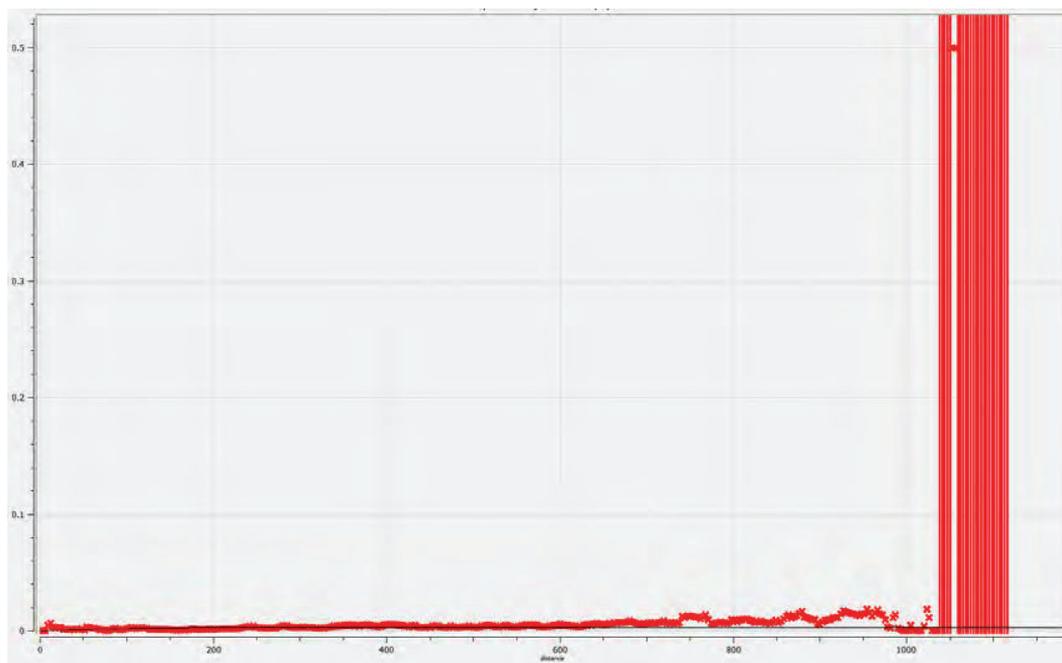
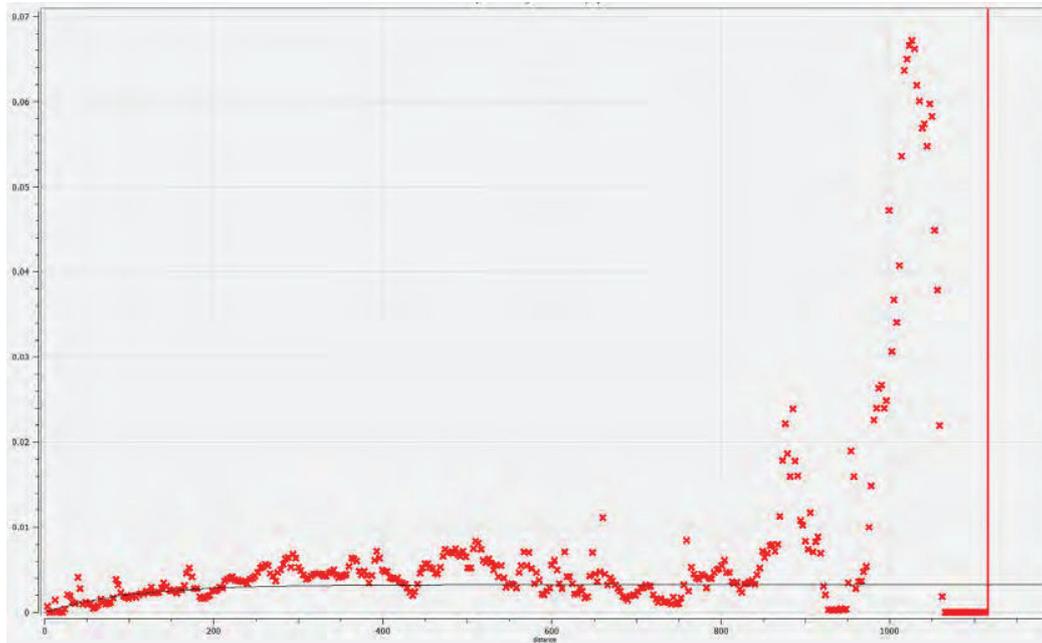


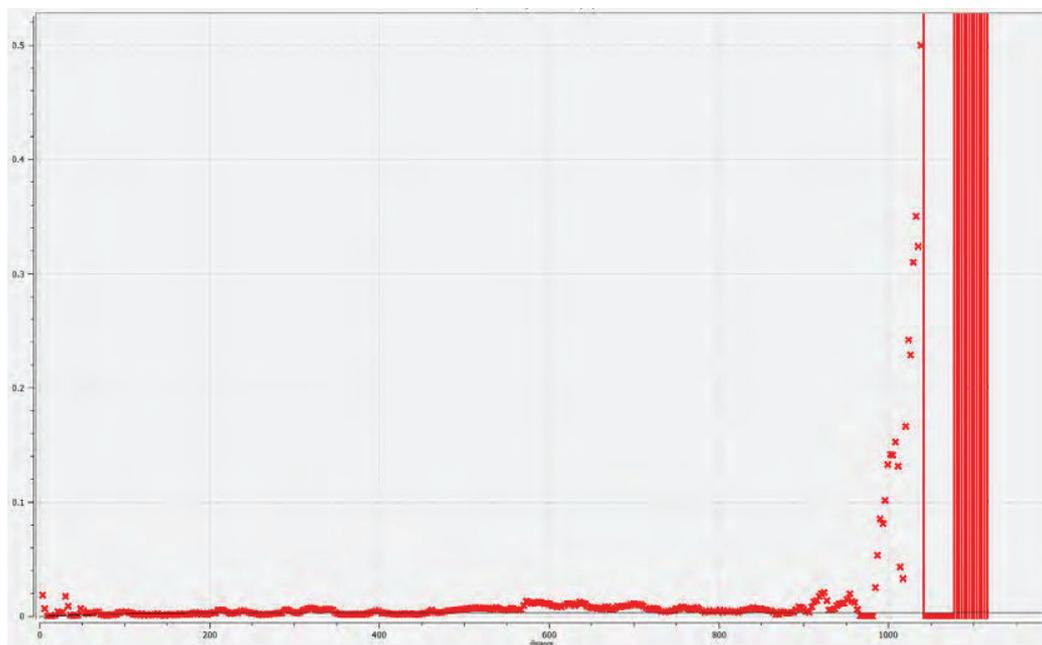
Figura 13. Mapa variográfico KTrt



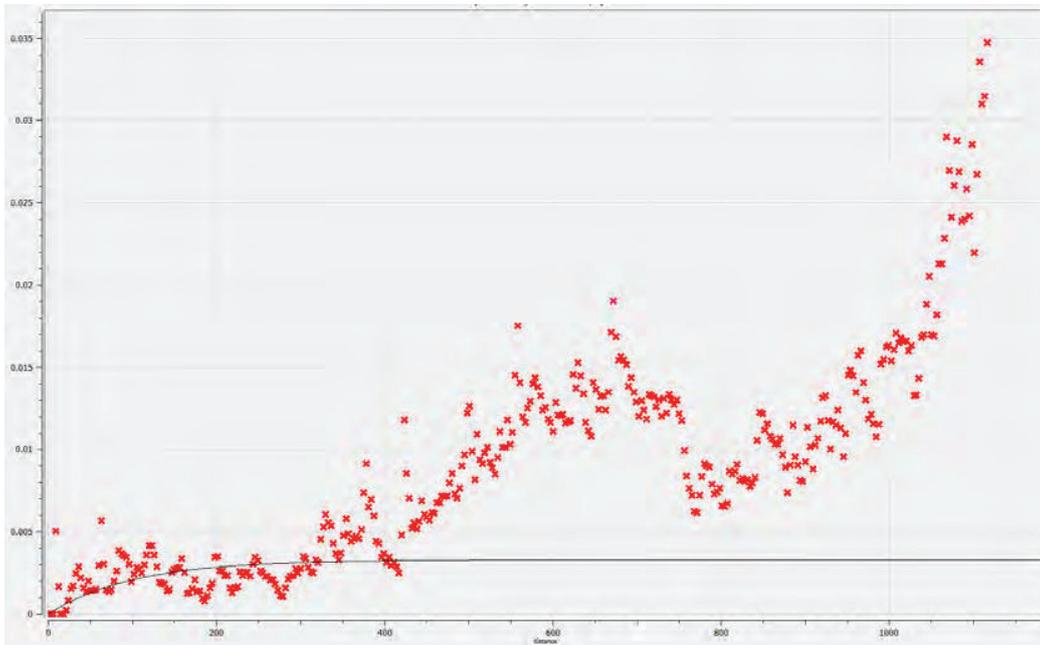
Gráfica 12. Variograma direccional KTrt 0°



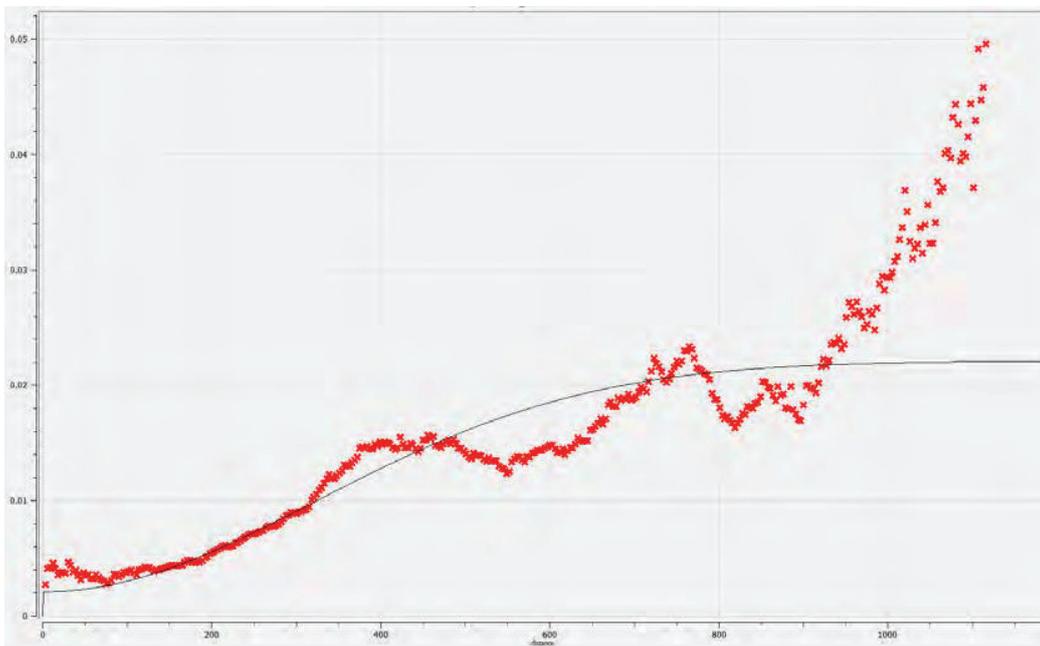
Gráfica 13. Variograma direccional KTrt 45°



Gráfica 14. Variograma direccional KTrt 90°



Gráfica 15. Variograma direccional KTrt 135°



Gráfica 16. Variograma omnidireccional KTrt



4.4.7.- VBX

El mapa variográfico de los datos de VBX (Figura 14) no dibuja una dirección de mayor continuidad. Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales en las cuatro direcciones principales 0° , 45° , 90° y 135° (Gráficas de la 17 a la 21). Así como, omnidireccionalmente. (los colores claros indican valores grandes para el modelo de variograma, mientras que los colores oscuros indican valores más pequeños).

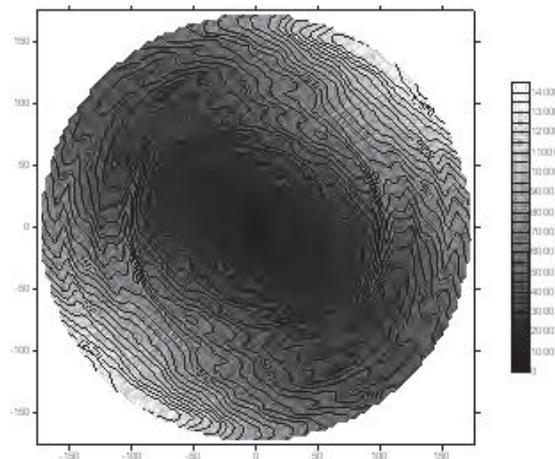
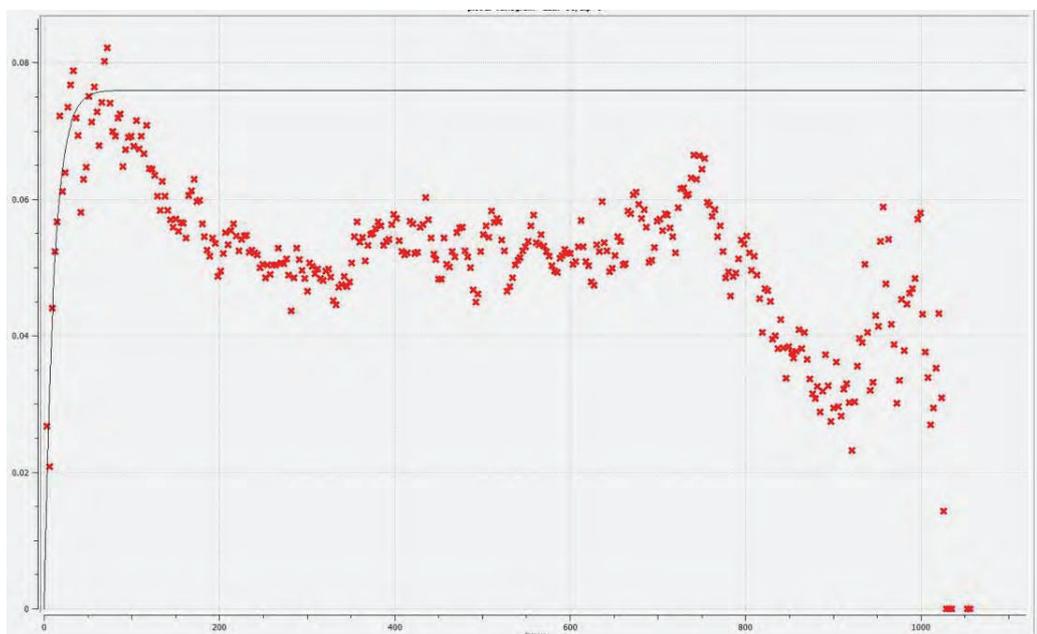
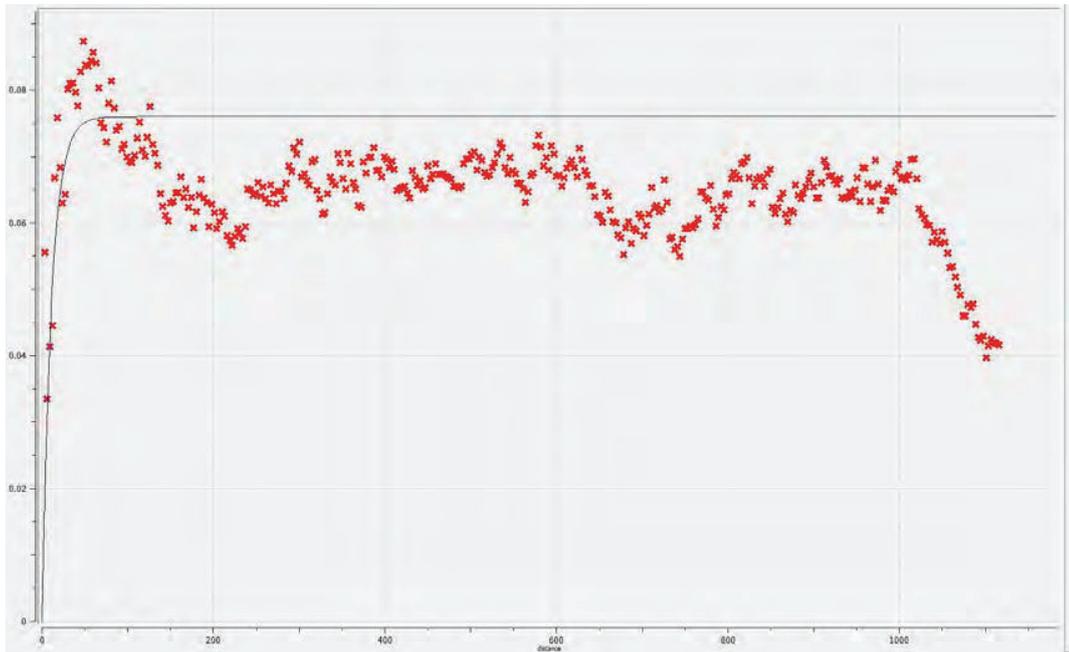


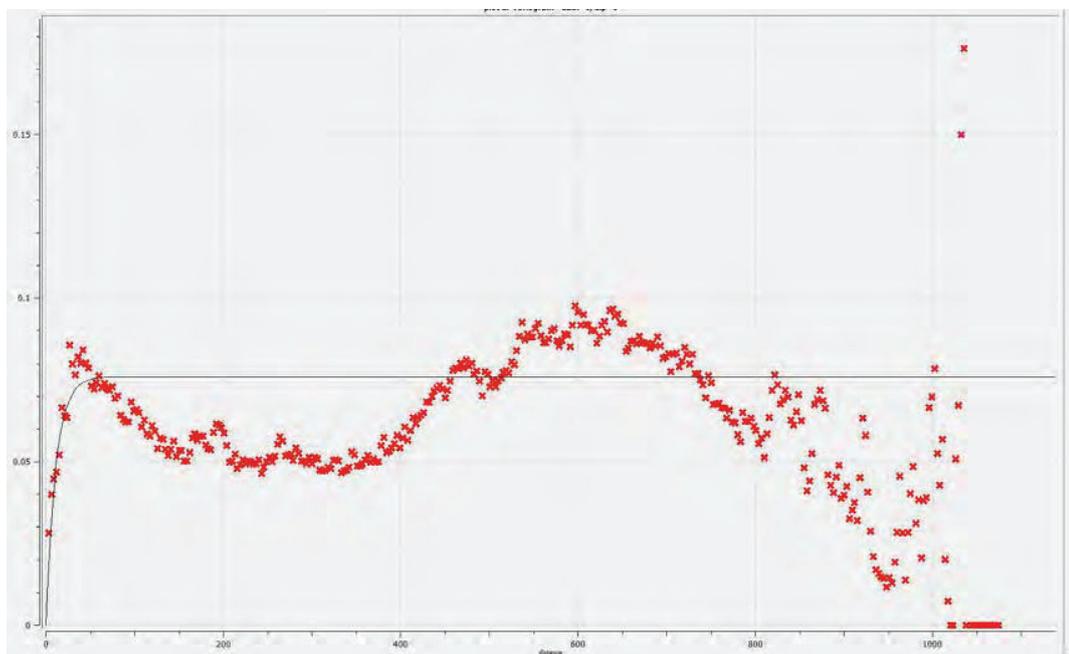
Figura 14. Mapa variográfico VBX



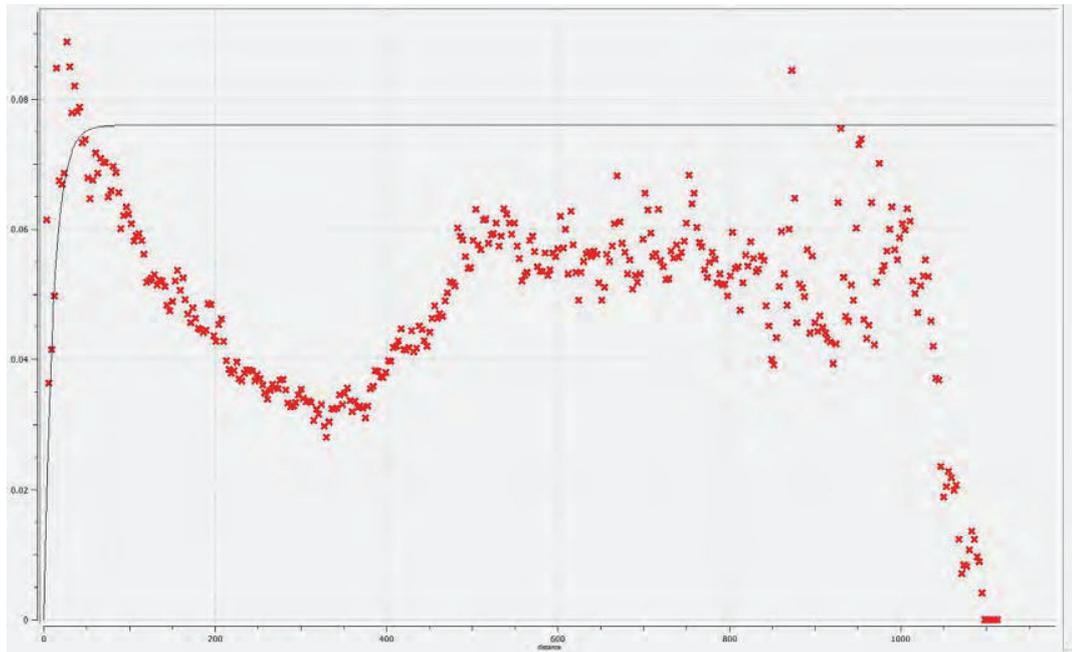
Gráfica 17. Variograma direccional VBX 0° .



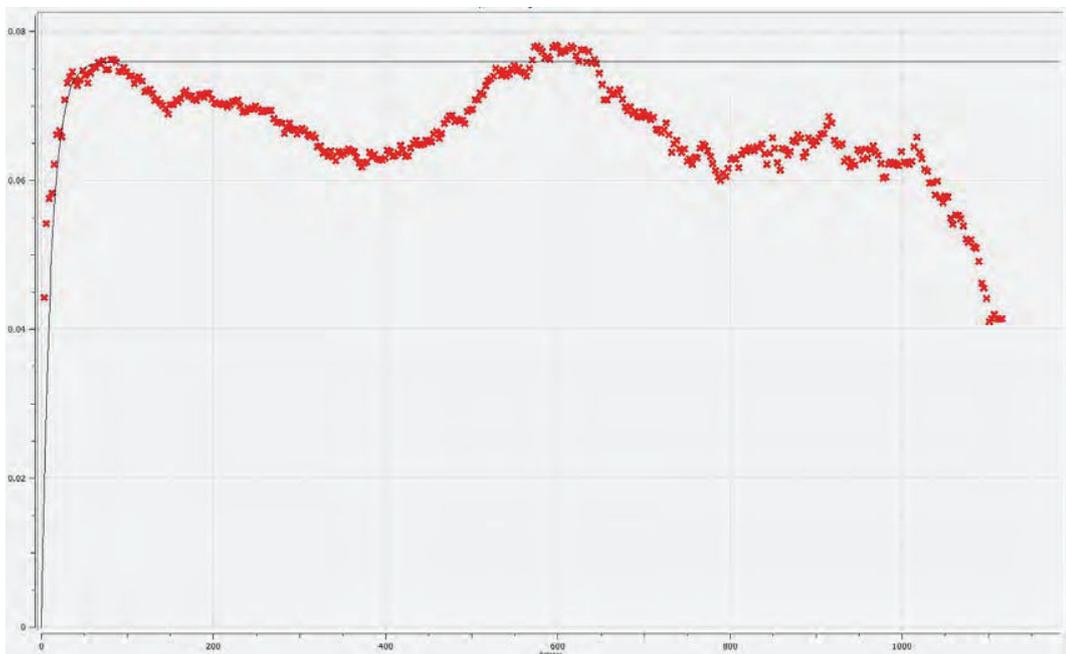
Gráfica 18. Variograma direccional VBX 45°.



Gráfica 19. Variograma direccional VBX 90°.



Gráfica 20. Variograma direccional VBX 135°.



Gráfica 21. Variograma omnidireccional VBX.



4.5.- SIMULACIÓN: CASO ÁREA PALMAREJO CHIHUAHUA

4.5.1.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran mediante imágenes en diferentes vistas los resultados obtenidos con el algoritmo SISIM simulación secuencial de indicadores, el cual se realizó con modelos de variogramas direccionales para cada unidad geológica. En la primera parte se muestran las simulaciones de las unidades geológicas individualmente (Figura de la 15 a la 68) para finalizar con la simulación de todas las unidades geológicas juntas (Figura de 69 a la 77).

Es importante puntualizar que debido a la poca información y el gran espaciamiento de los compósitos de KTrt, no se pudo realizar la simulación de esta litología.

Po otro lado, debido a la gran cantidad de tiempo en cálculos computacionales que lleva el realizar las simulaciones solo presentaremos en este trabajo tres simulaciones.

En este estudio no se realizará el cálculo de incertidumbre que arroja la simulación de las unidades geológicas.

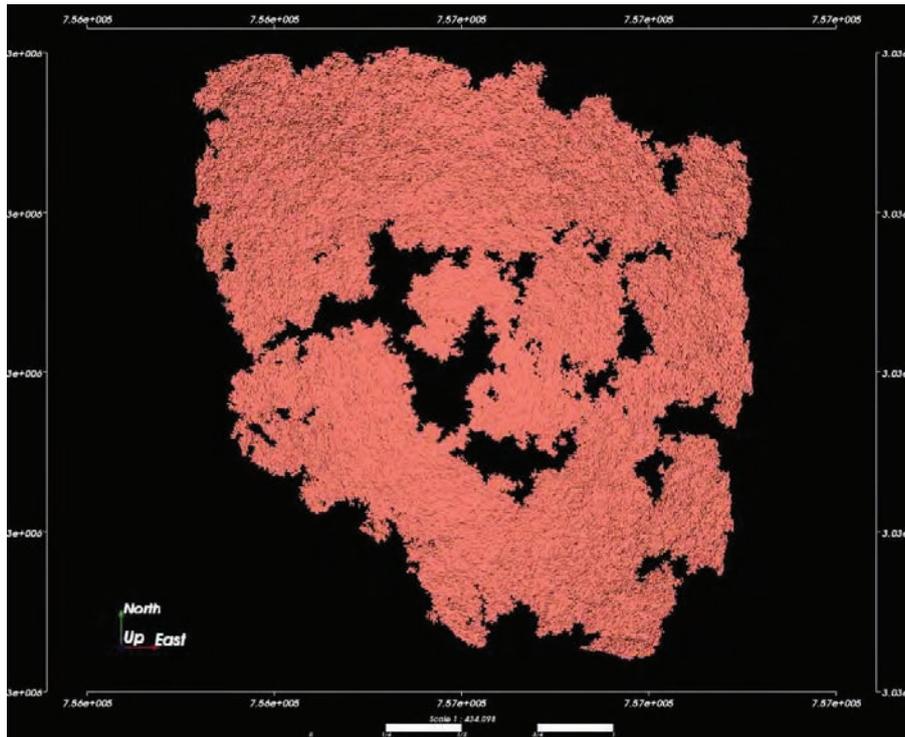


Figura 15. Vista de planta unidad geológica KTal simulación 1

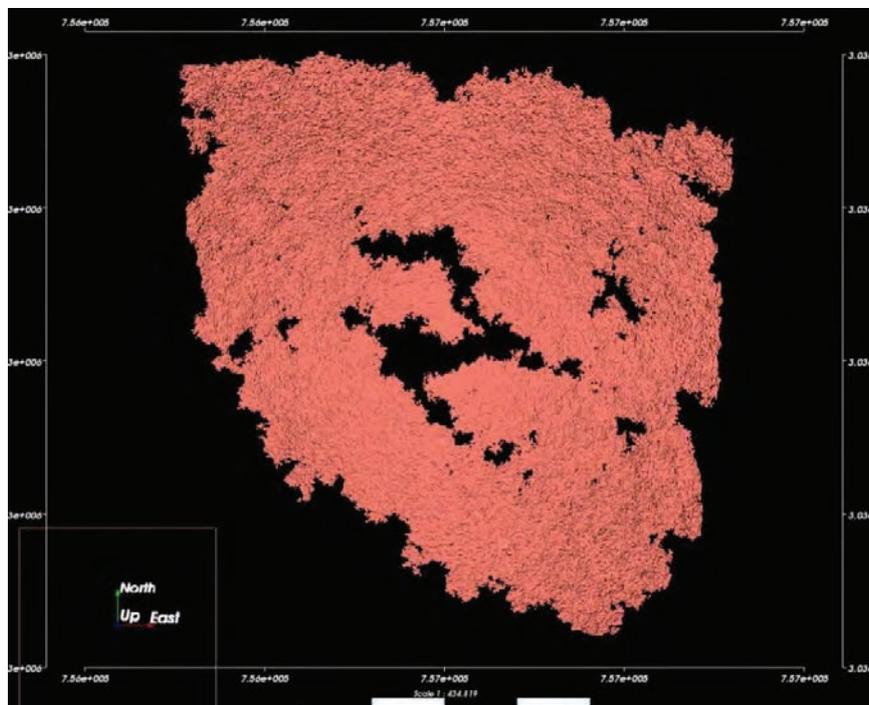


Figura 16. Vista de planta unidad geológica KTal simulación 2

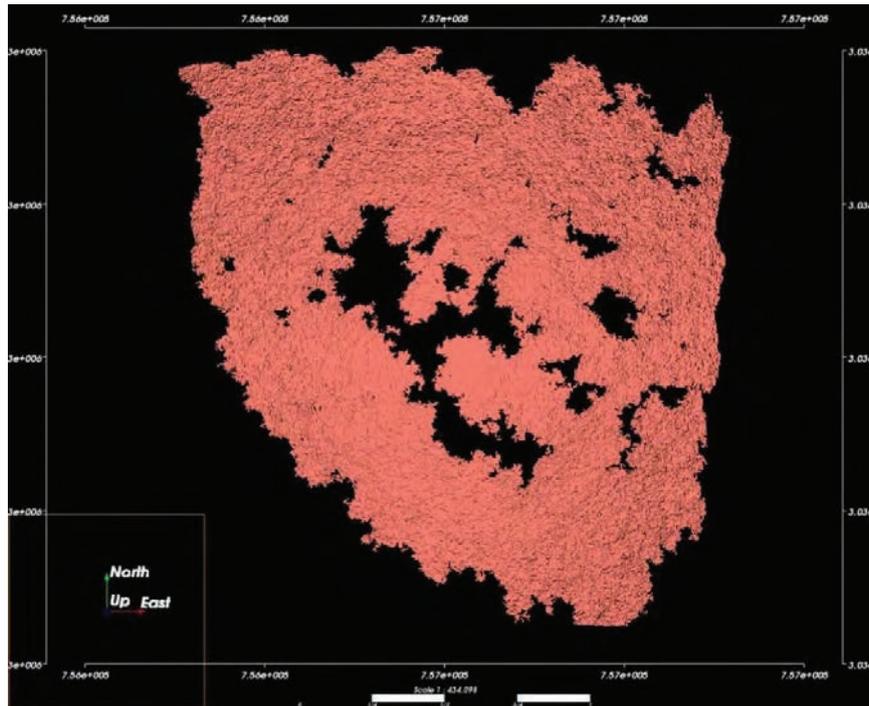


Figura 17. Vista de planta unidad geológica KTal simulación 3

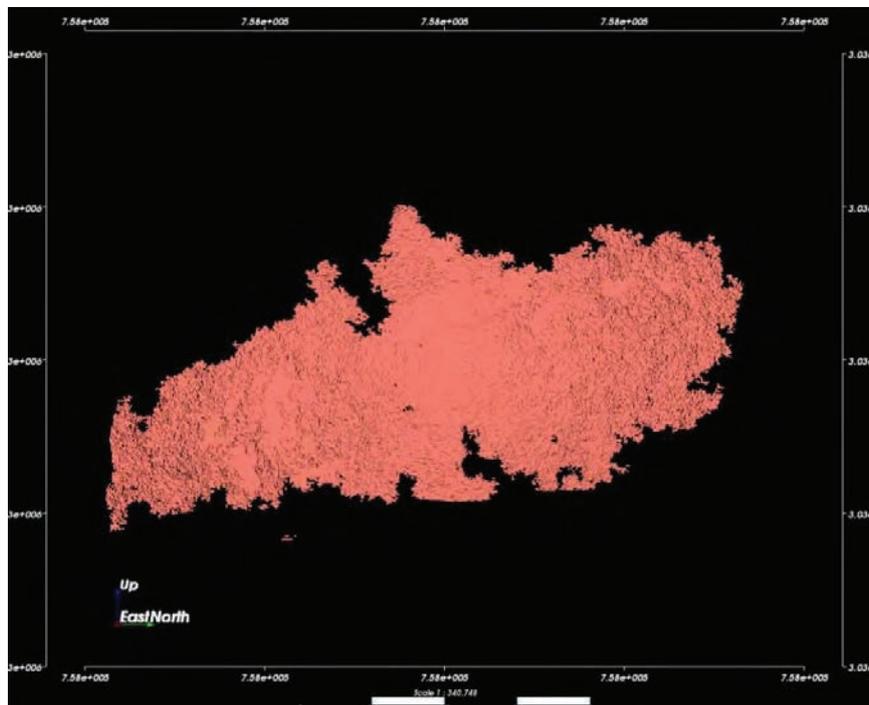


Figura 18. Vista al Este unidad geológica KTal simulación 1

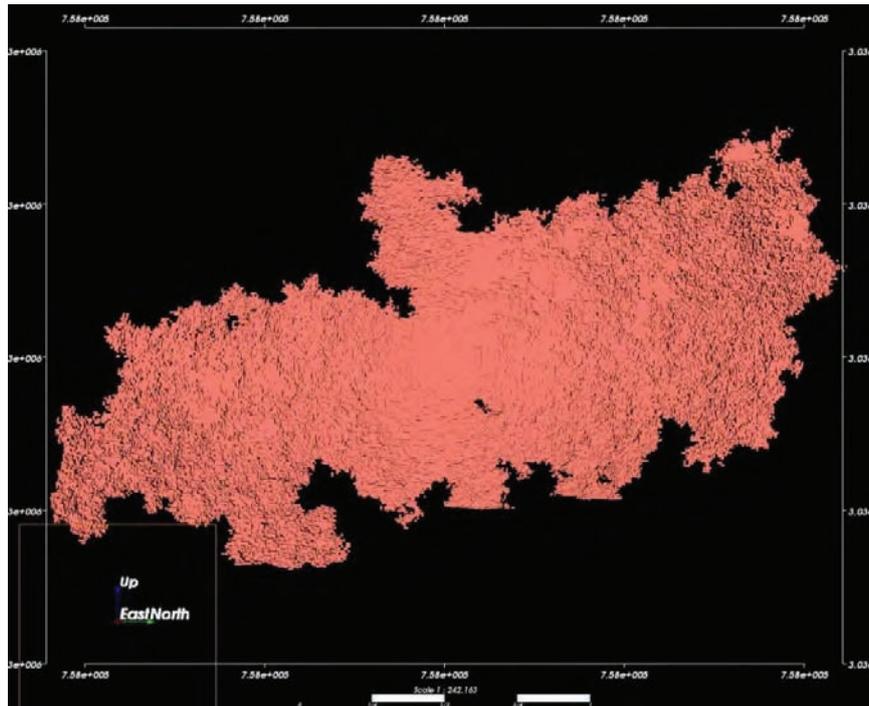


Figura 19. Vista al Este unidad geológica KTal simulación 2

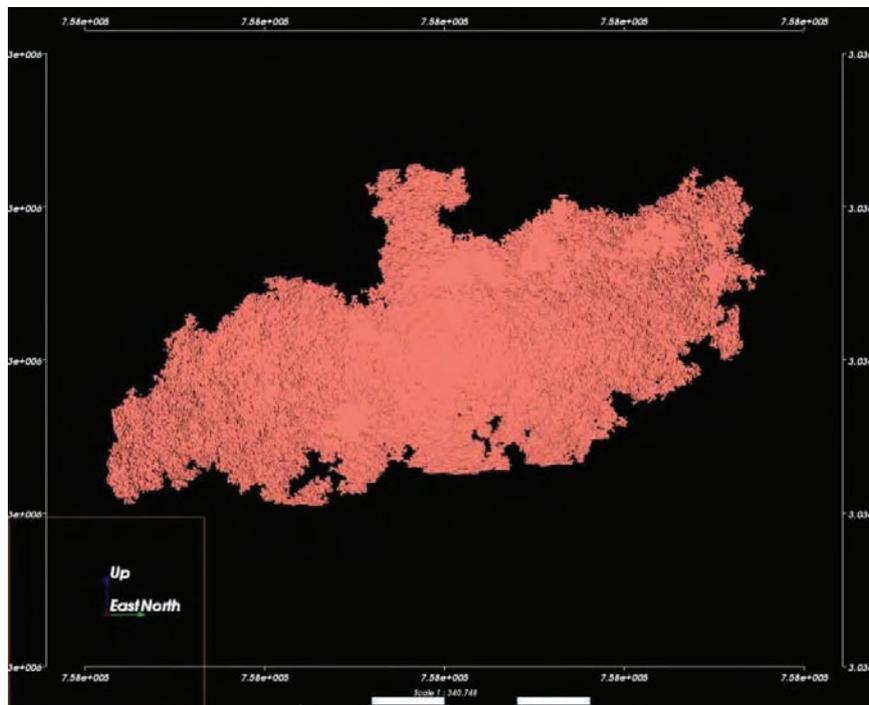


Figura 20. Vista al Este unidad geológica KTal simulación 3

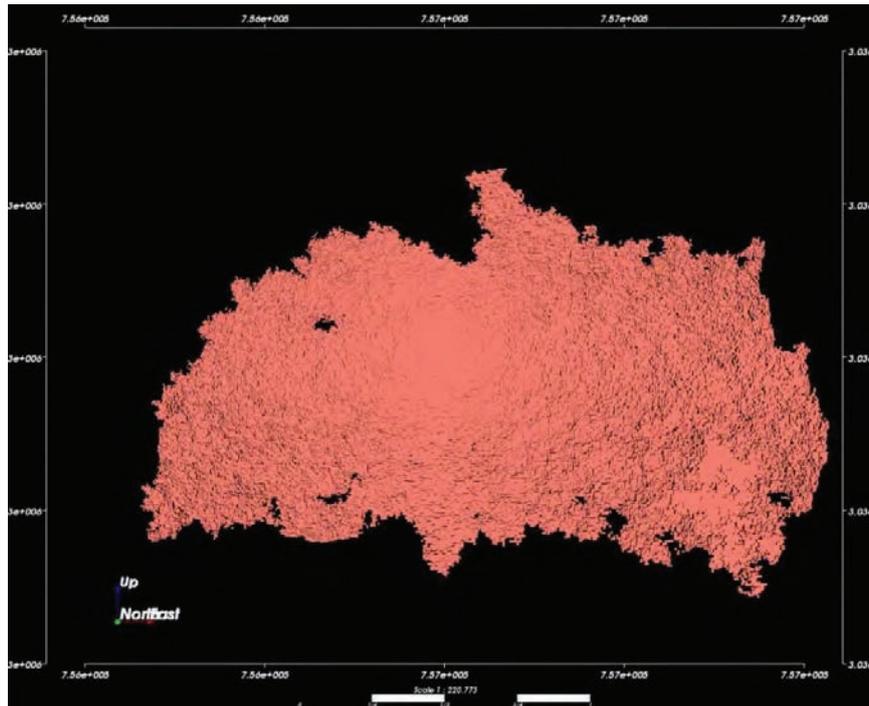


Figura 21. Vista al Norte unidad geológica KTal simulación 1

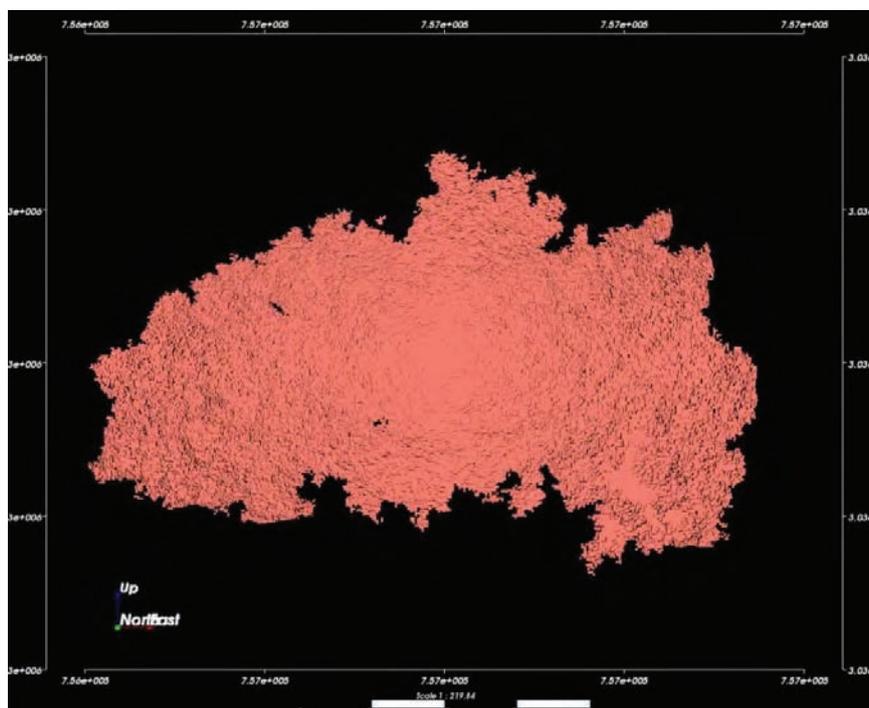


Figura 22. Vista al Norte unidad geológica KTal simulación 2

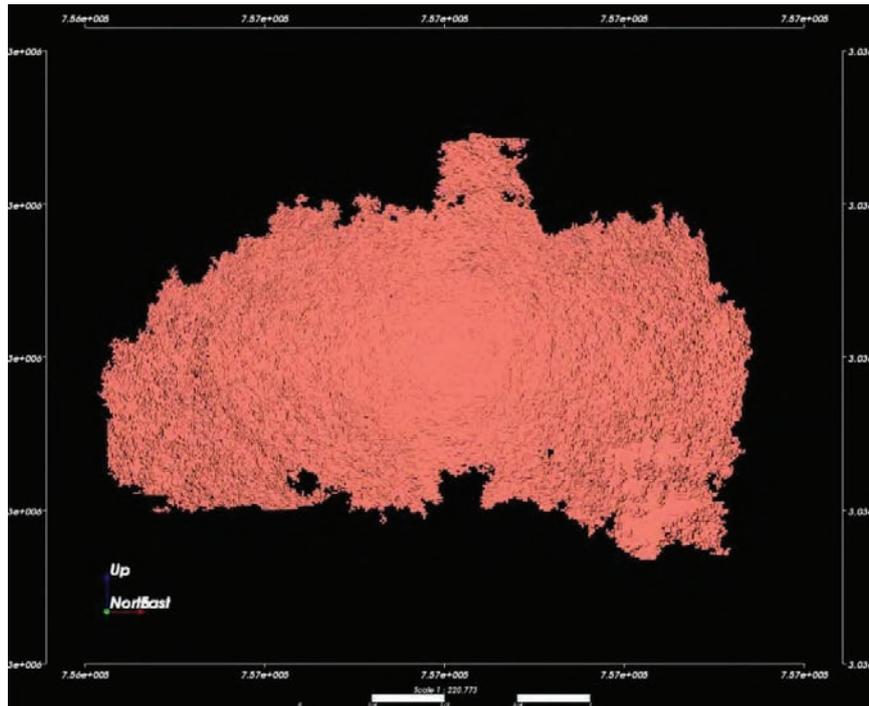


Figura 23. Vista al Norte unidad geológica KTal simulación 3

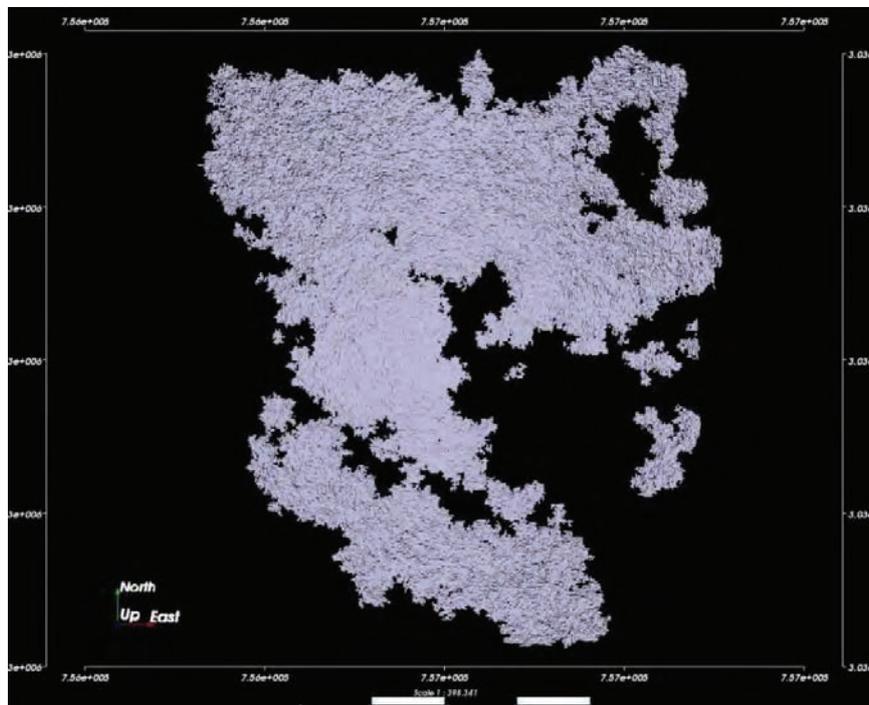


Figura 24. Vista de planta unidad geológica KTam simulación 1

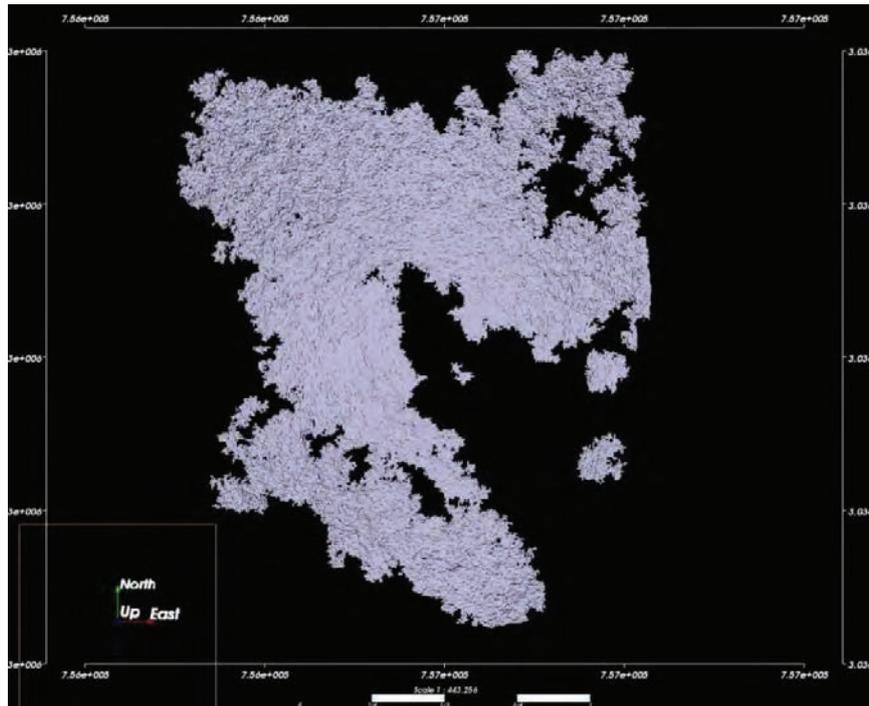


Figura 25. Vista de planta unidad geológica KTam simulación 2

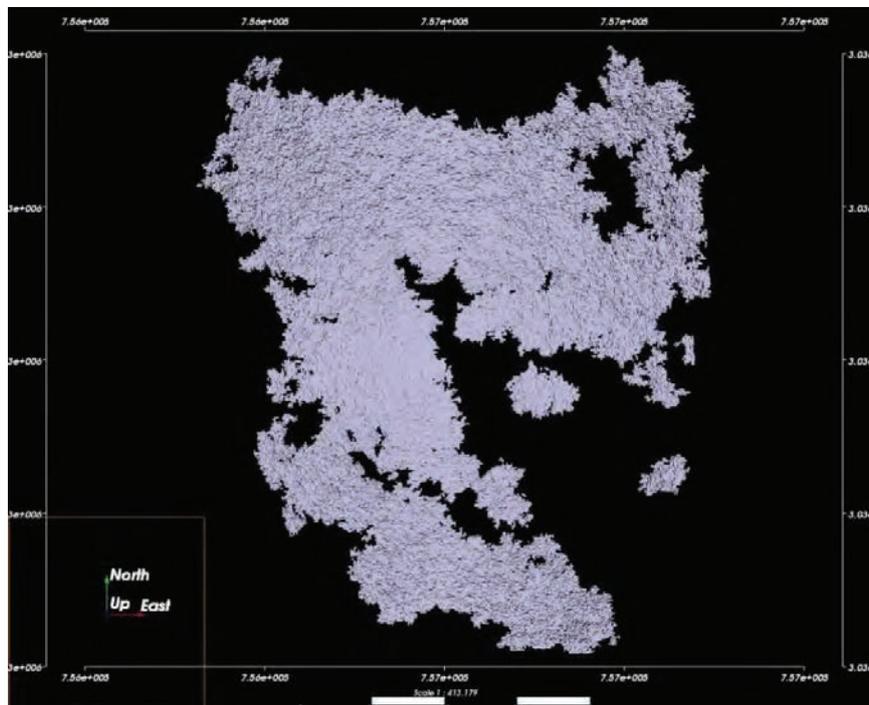


Figura 26. Vista de planta unidad geológica KTam simulación 3

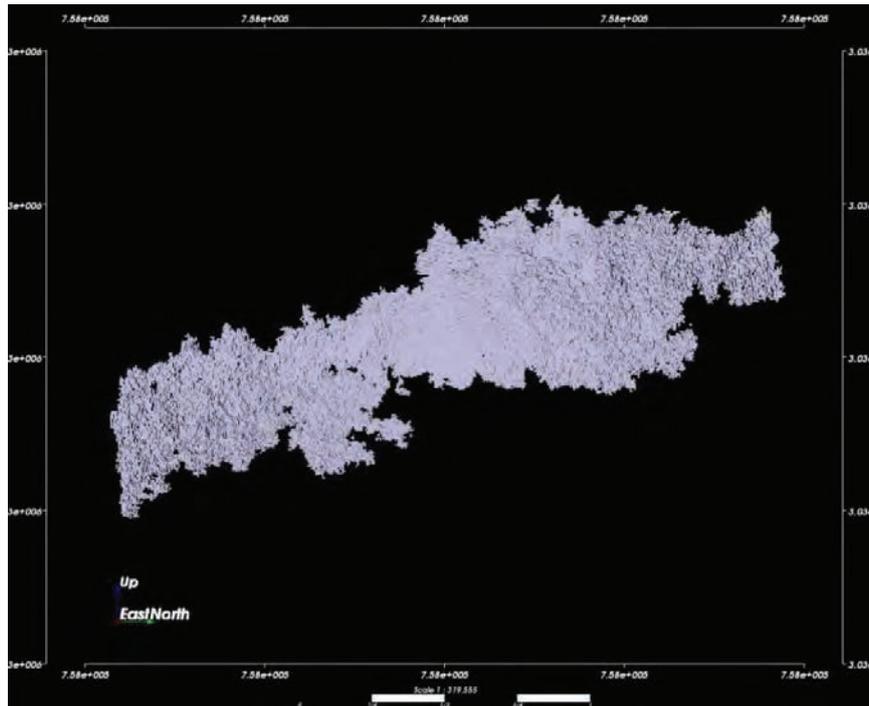


Figura 27. Vista al Este unidad geológica KTam simulación 1



Figura 28. . Vista al Este unidad geológica KTam simulación 2

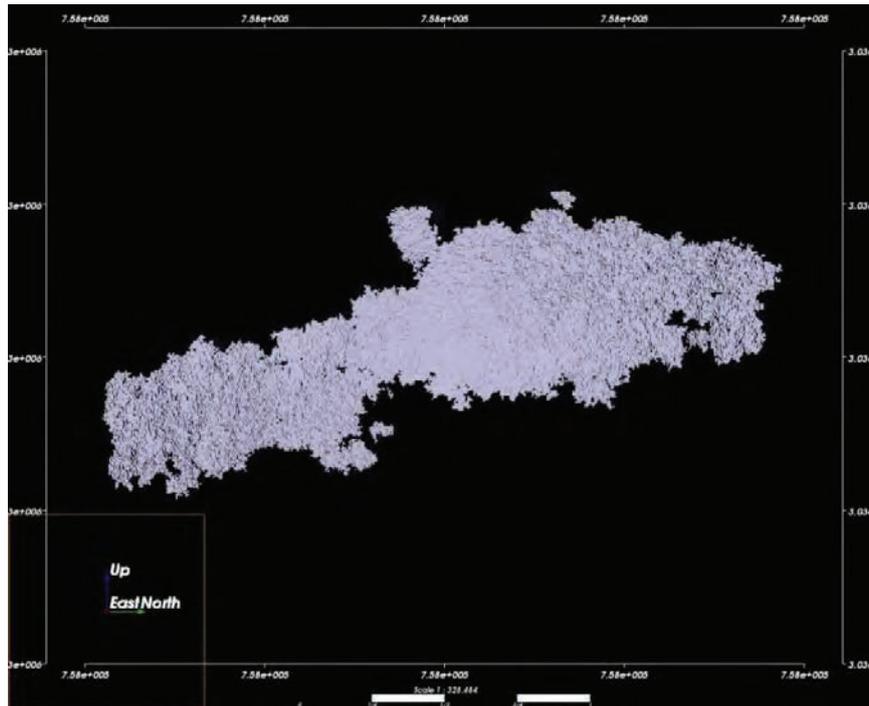


Figura 29. Vista al Este unidad geológica KTam simulación 3

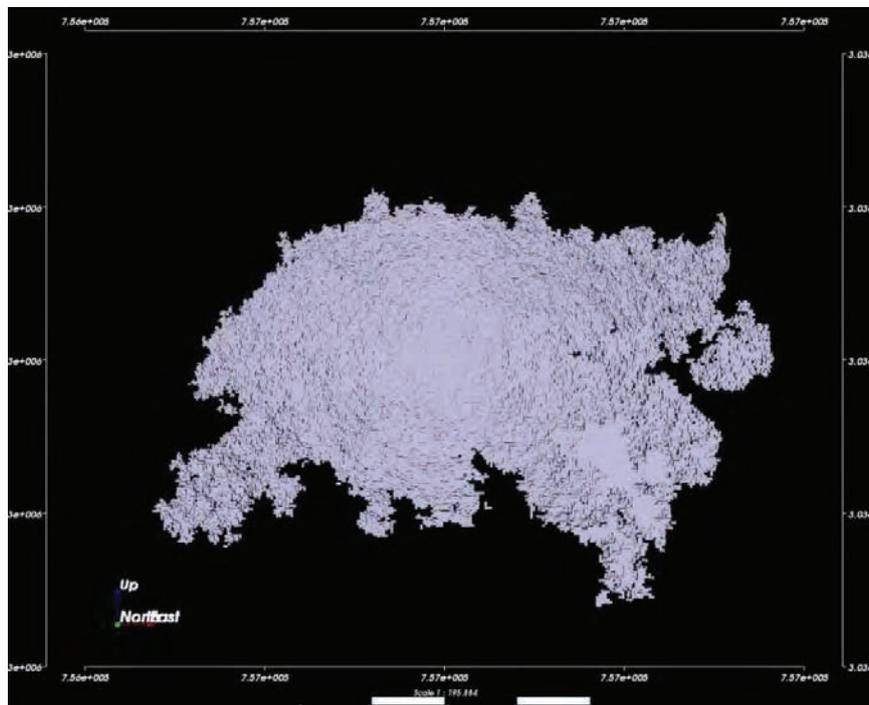


Figura 30. Vista al Norte unidad geológica KTam simulación 1

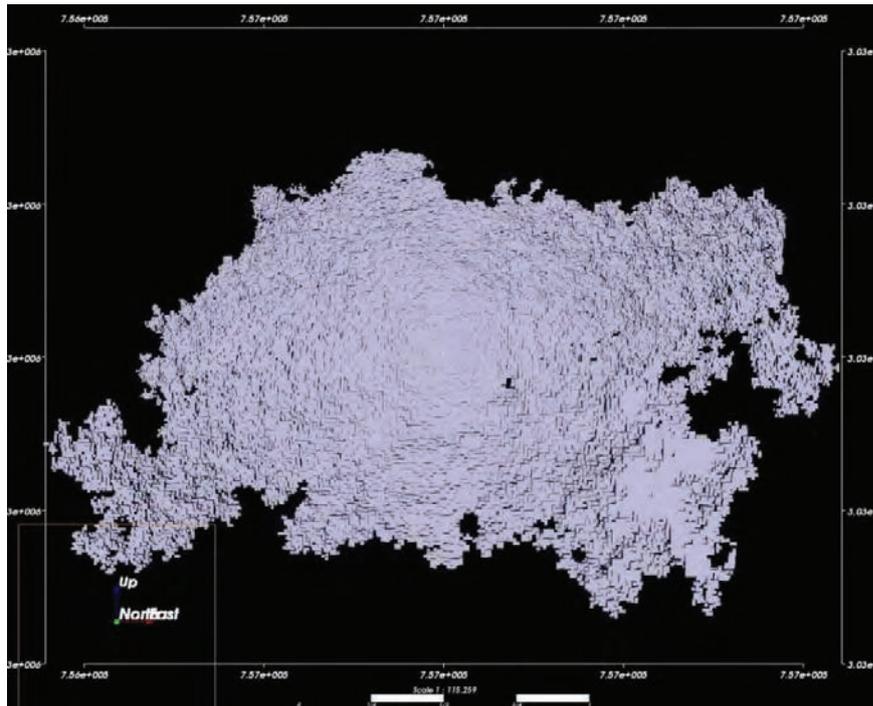


Figura 31. Vista al Norte unidad geológica KTam simulación 2



Figura 32. Vista al Norte unidad geológica KTam simulación 3

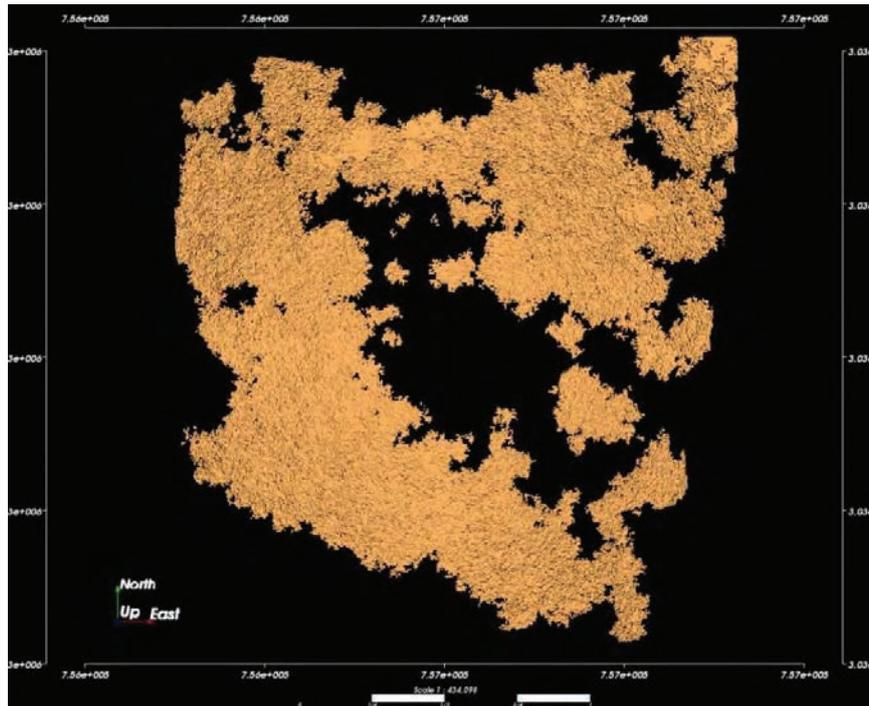


Figura 33. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 1

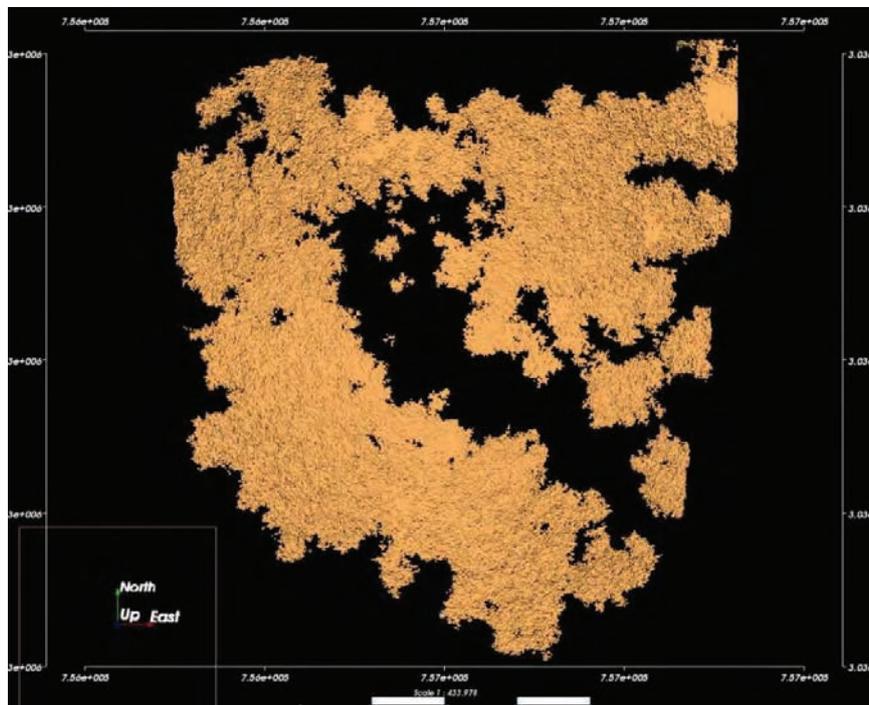


Figura 34. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 2

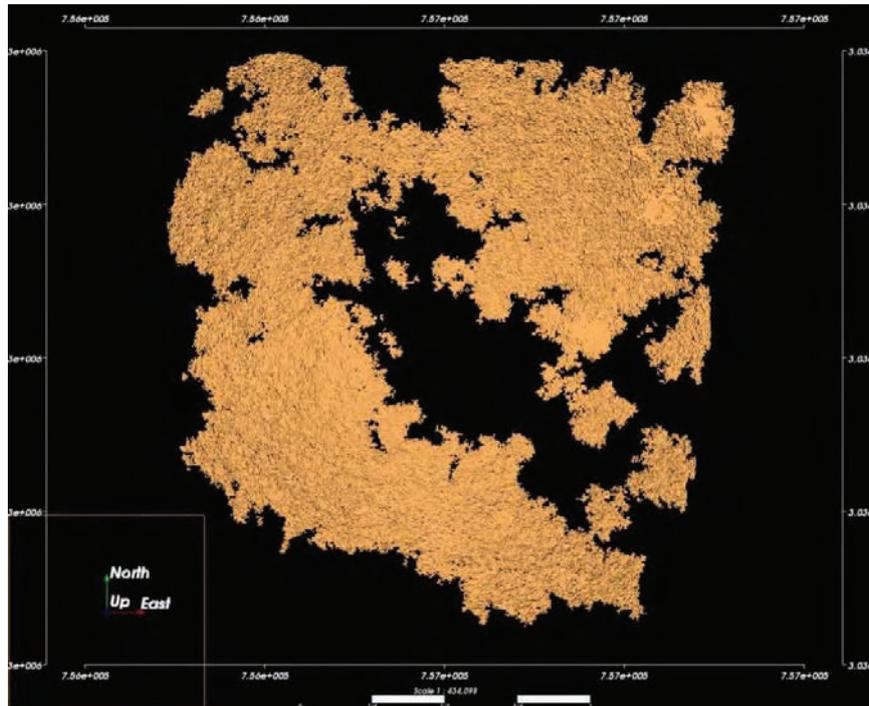


Figura 35. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 3

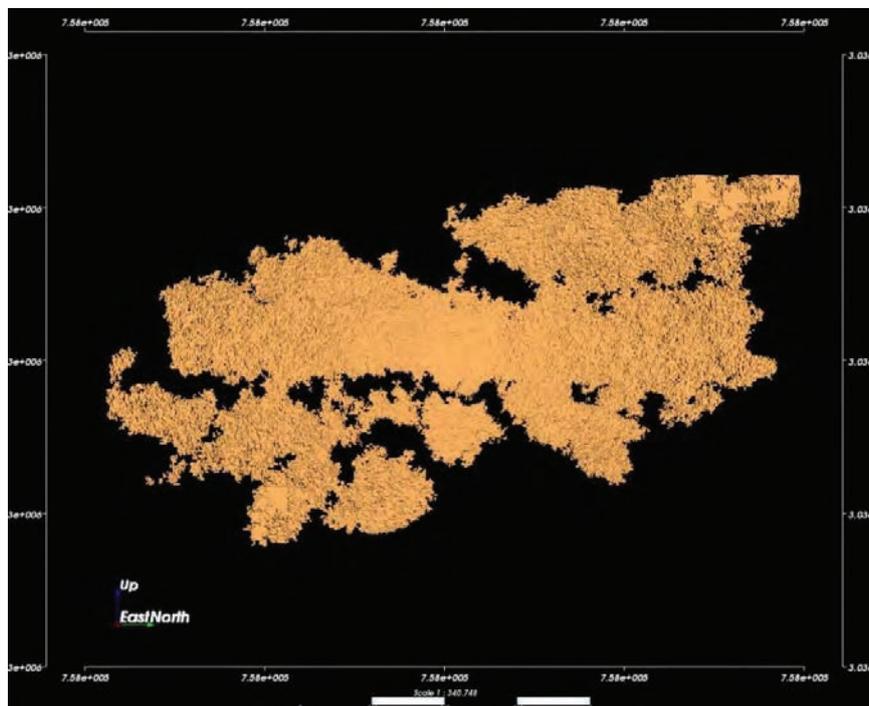


Figura 36. Vista al Este unidad geológica KTap simulación 1

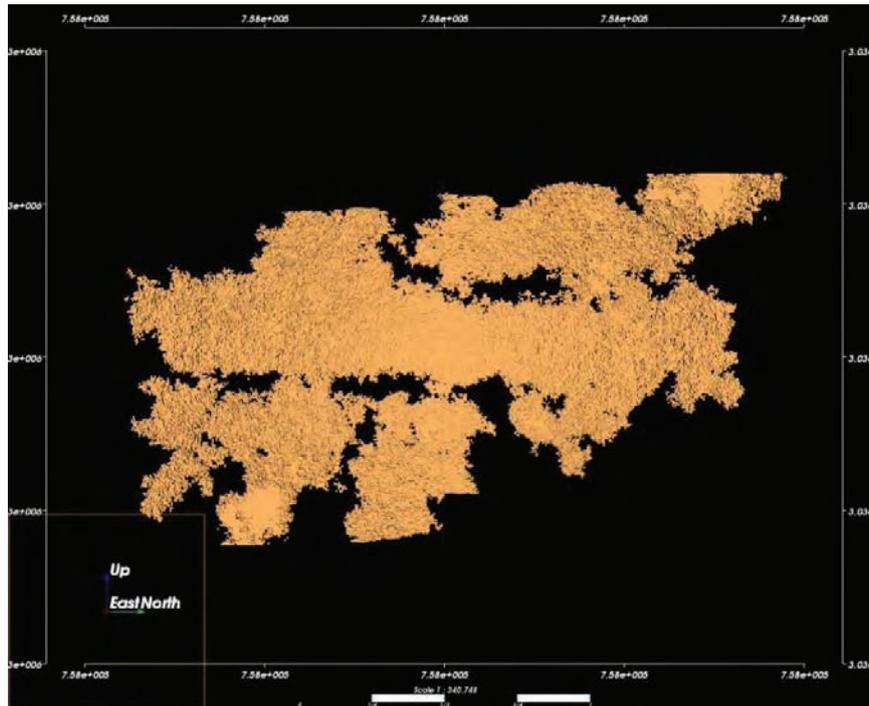


Figura 37. Vista al Este unidad geológica KTap simulación 2

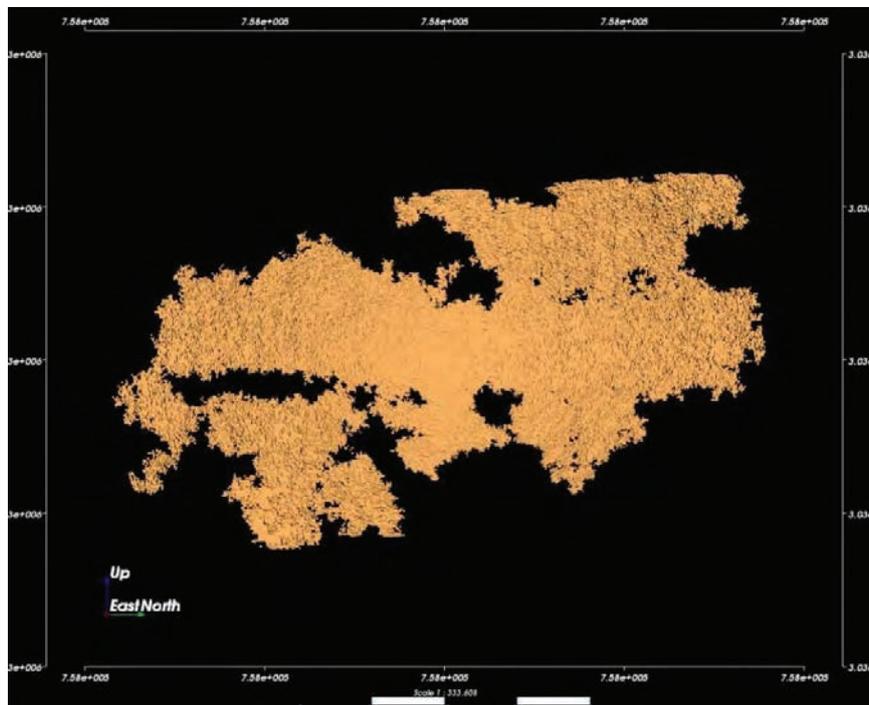


Figura 38. Vista al Este unidad geológica KTap simulación 3

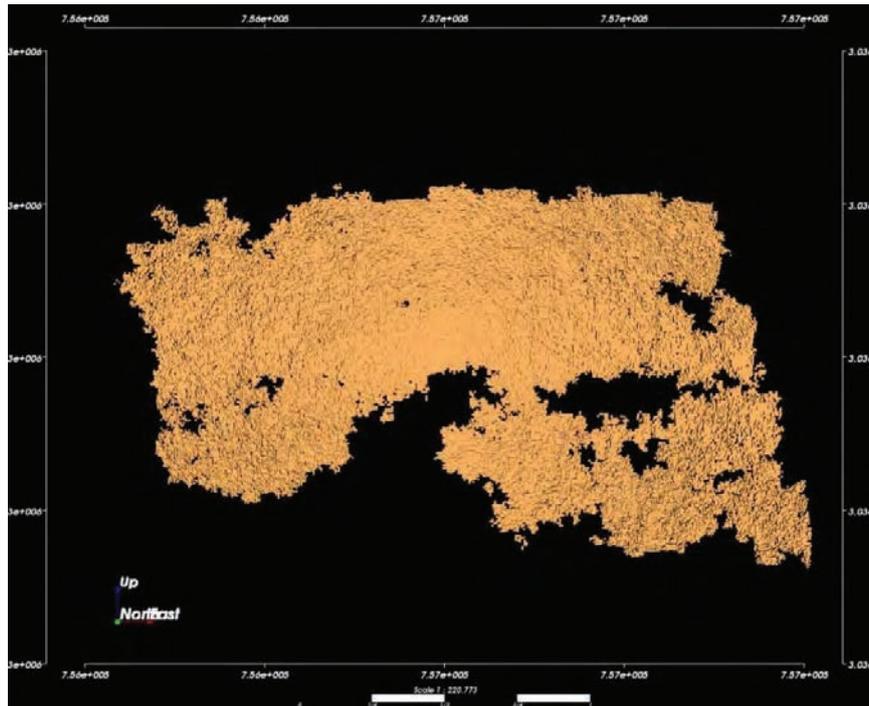


Figura 39. Vista al Norte unidad geológica KTap simulación 1

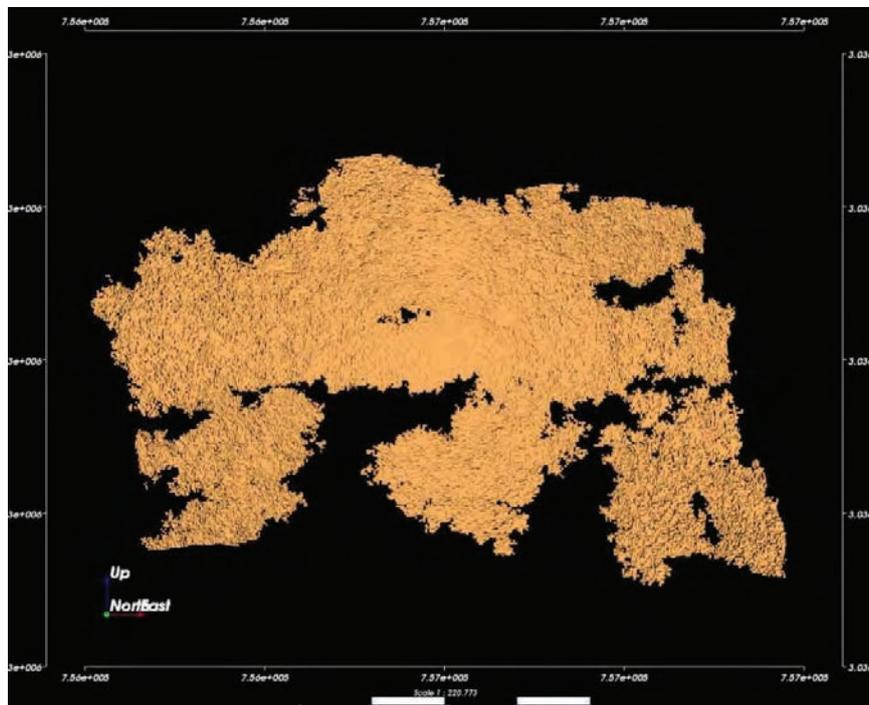


Figura 40. Vista al Norte unidad geológica KTap simulación 2

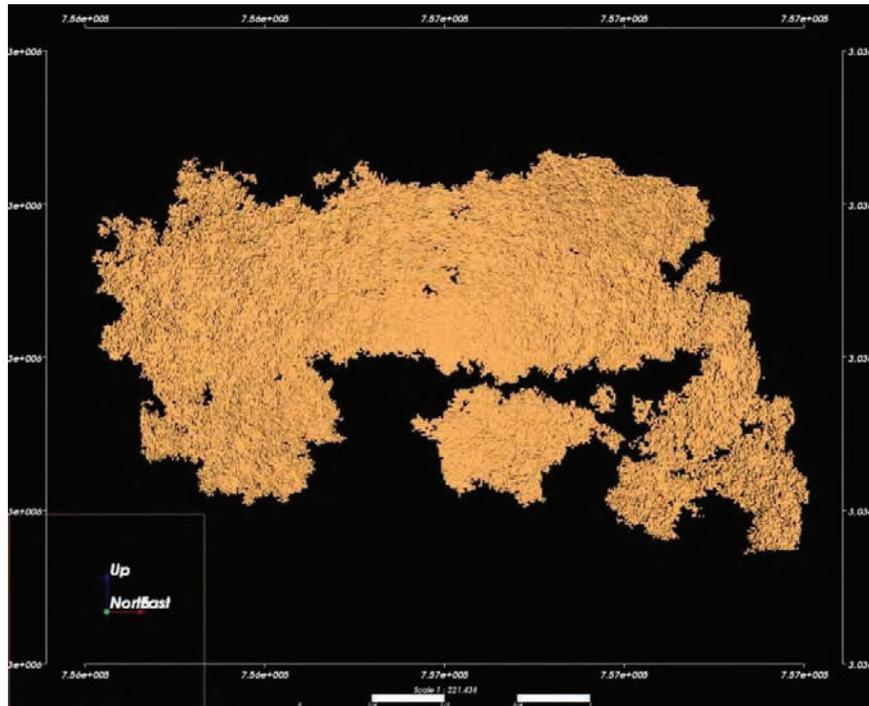


Figura 41. Vista al Norte unidad geológica KTap simulación 3

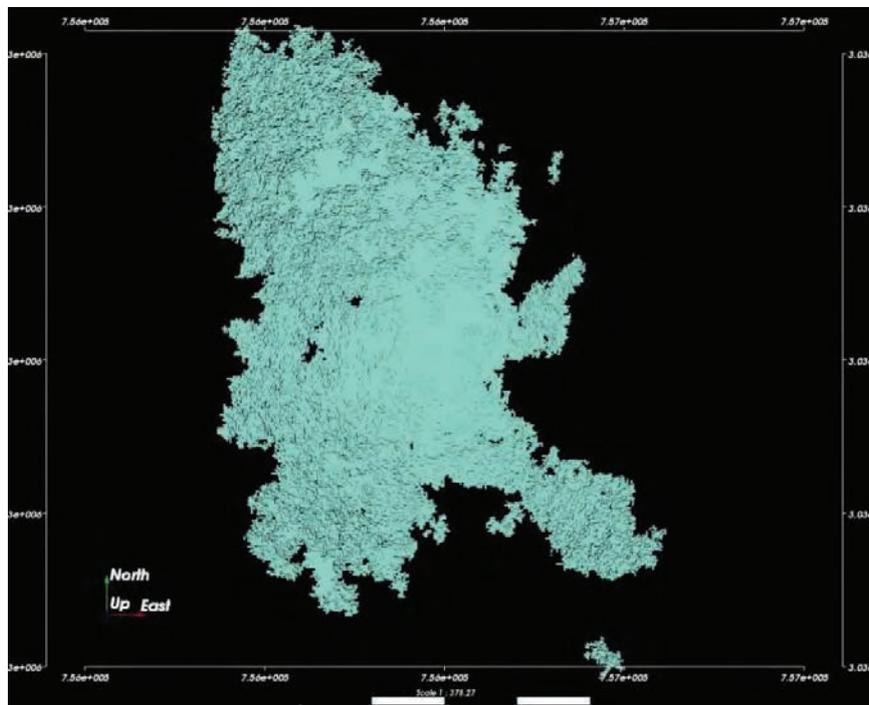


Figura 42. Vista de planta unidad geológica KTap simulación 1

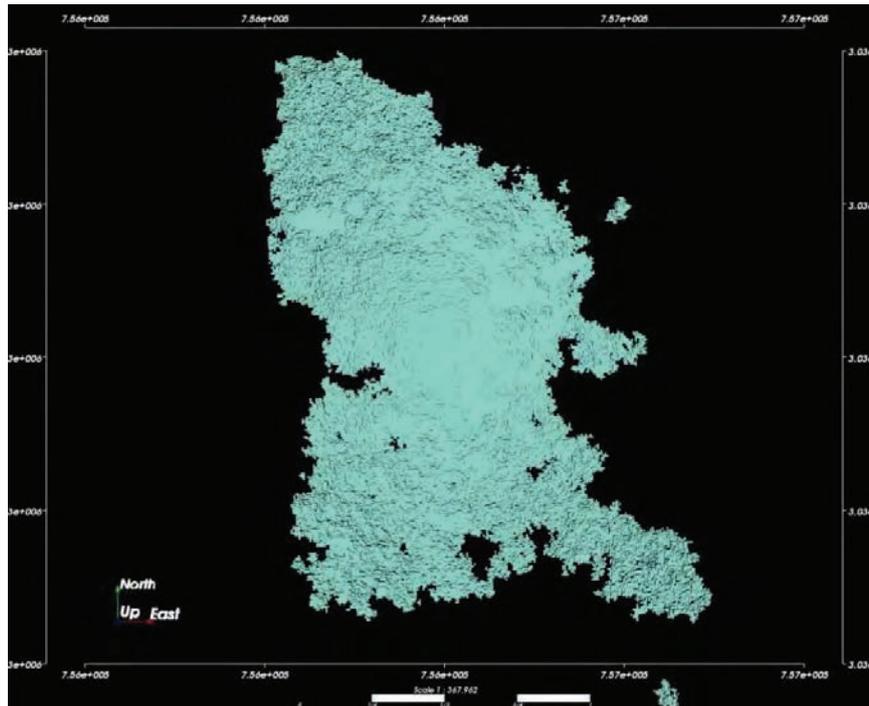


Figura 43. Vista de planta unidad geológica KTapp simulación 2

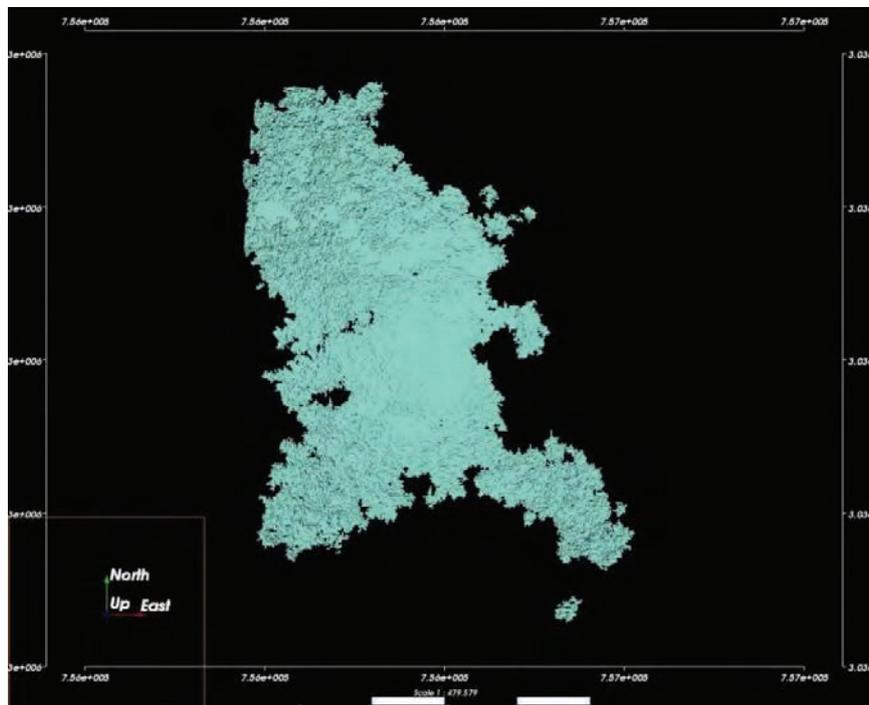


Figura 44. Vista de planta unidad geológica KTapp simulación 3

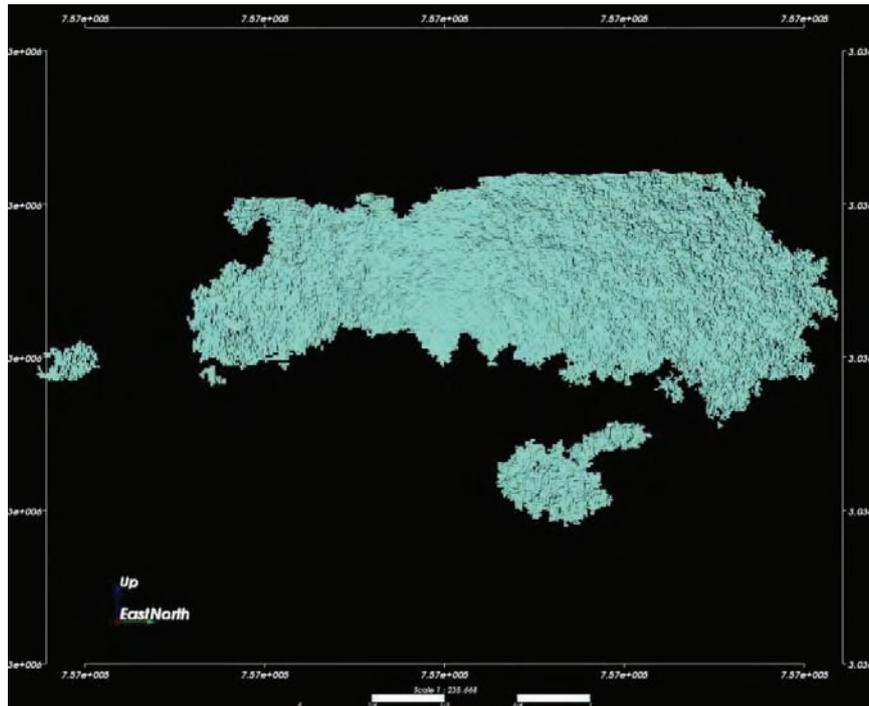


Figura 45. Vista al Este unidad geológica KTapp simulación 1



Figura 46. Vista al Este unidad geológica KTapp simulación 2

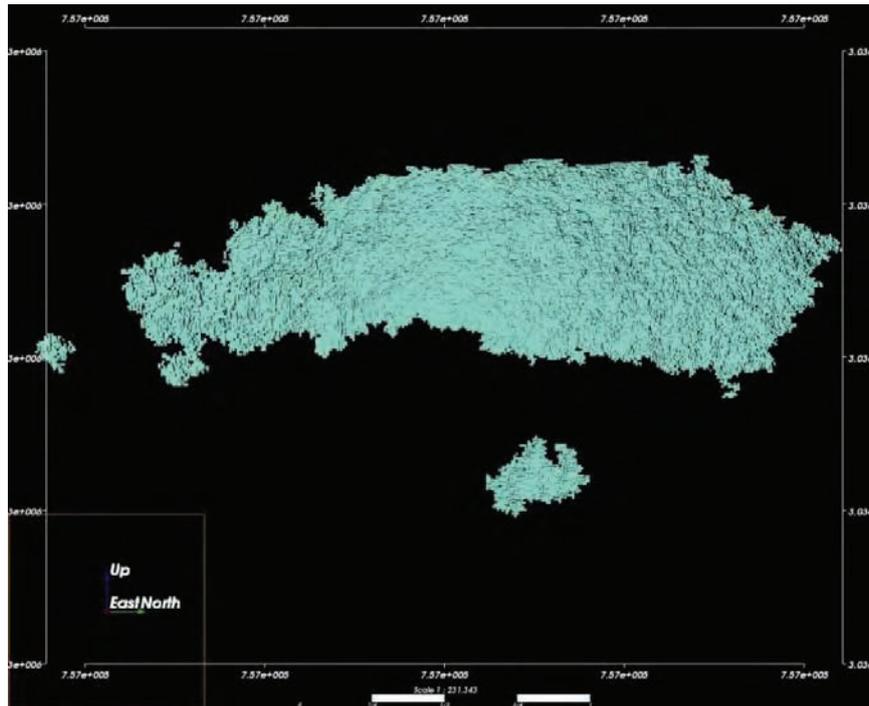


Figura 47. Vista al Este unidad geológica KTapp simulación 3

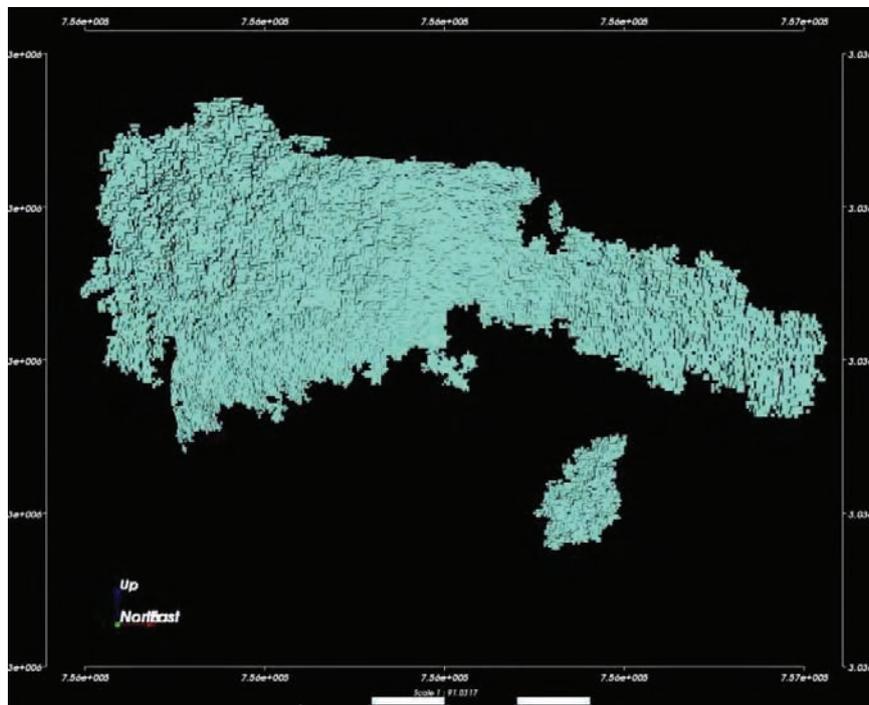


Figura 48. Vista al Norte unidad geológica KTapp simulación 1

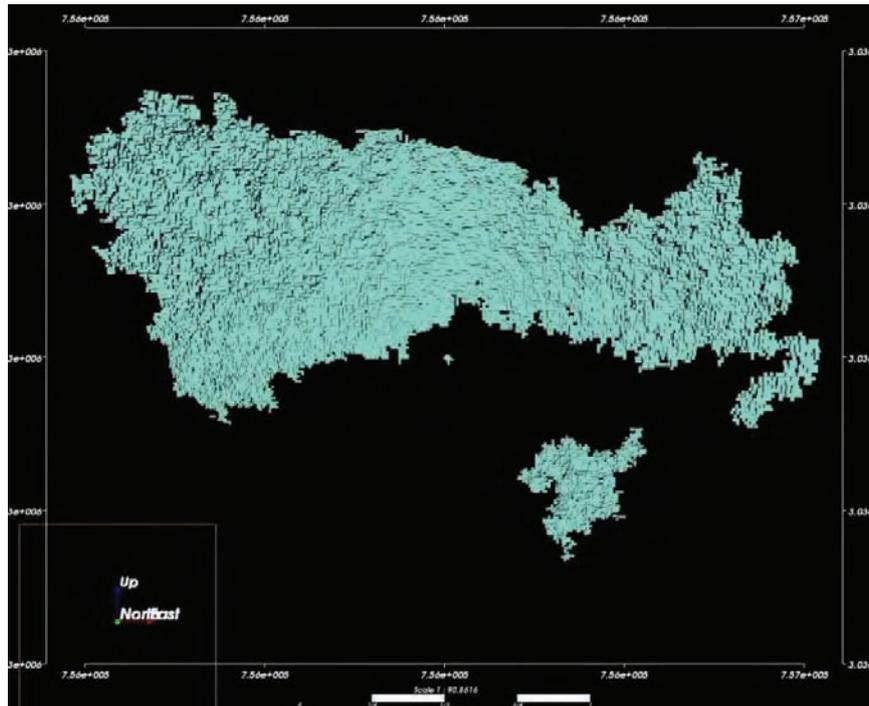


Figura 49. Vista al Norte unidad geológica KTapp simulación 2

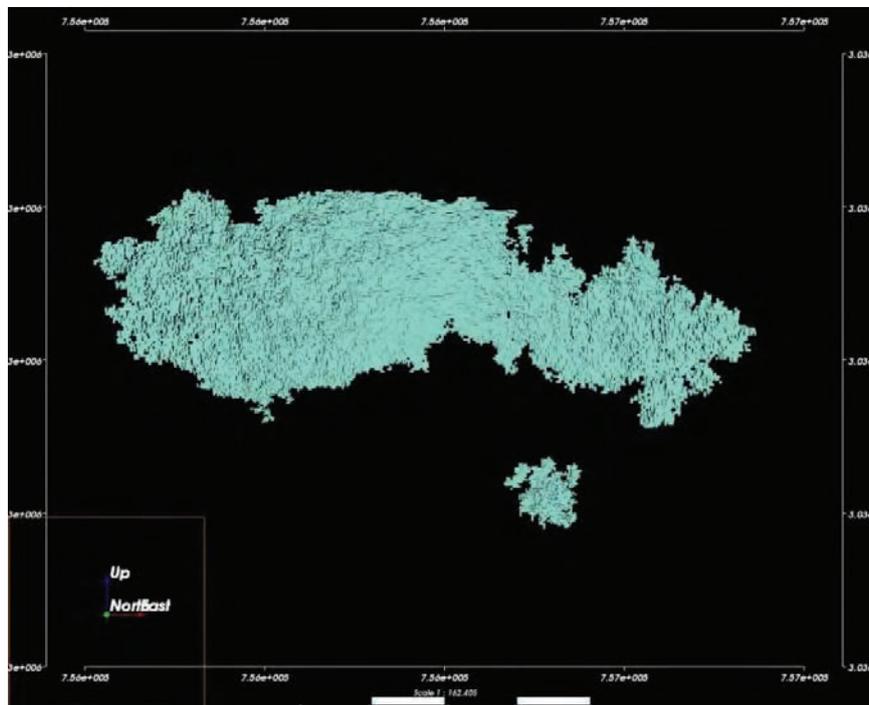


Figura 50. Vista al Norte unidad geológica KTapp simulación 3

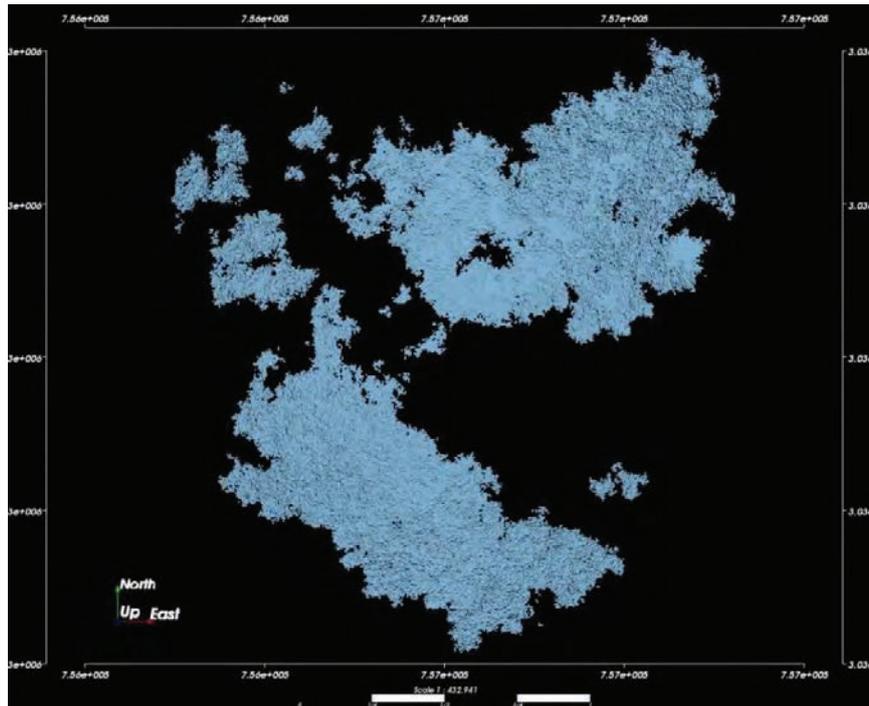


Figura 51. Vista de planta unidad geológica KTat simulación 1

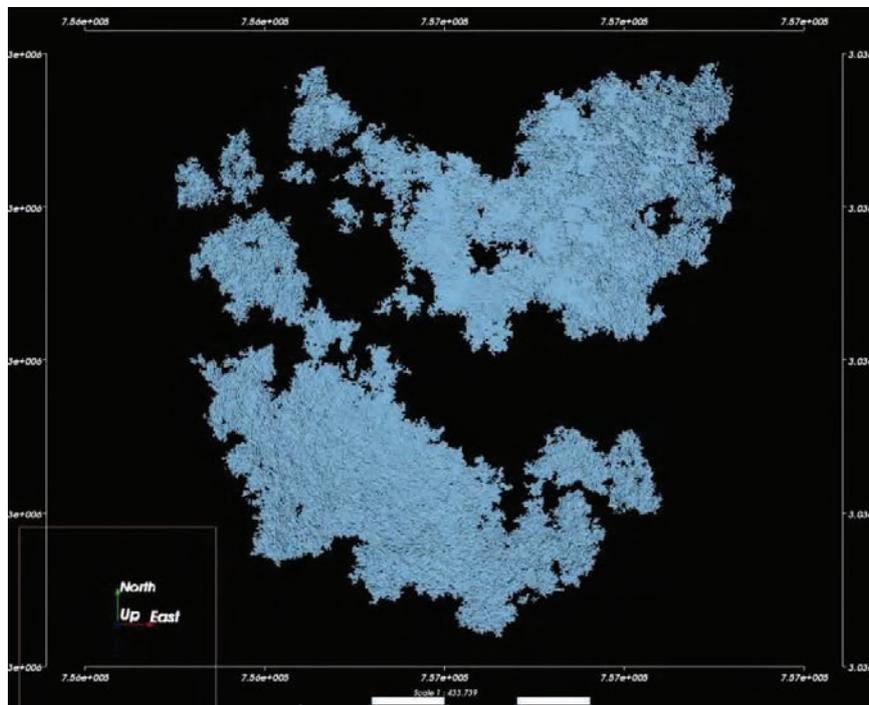


Figura 52. Vista de planta unidad geológica KTat simulación 2

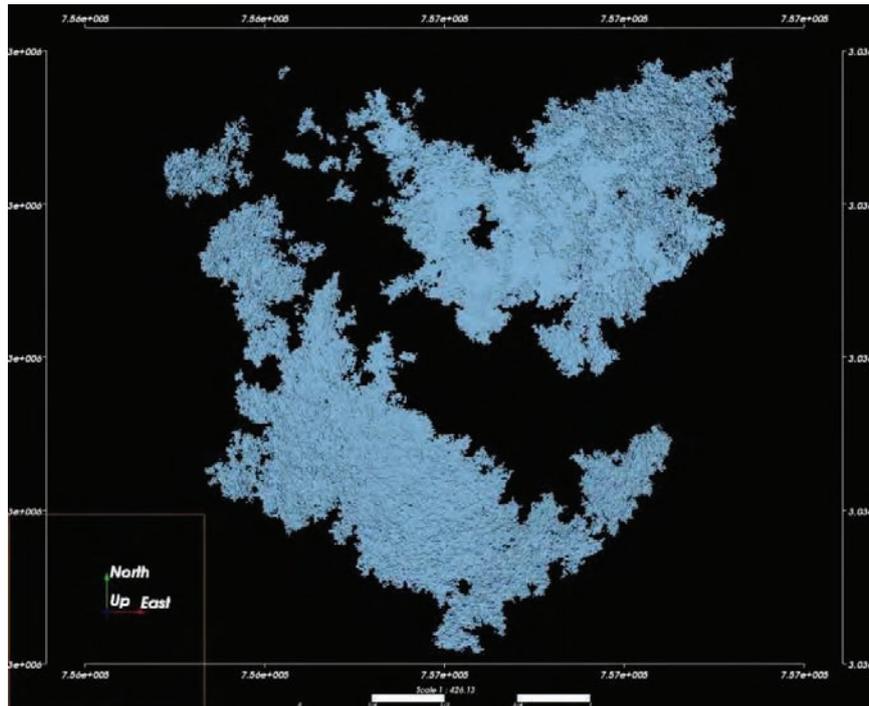


Figura 53. Vista de planta unidad geológica KTat simulación 3

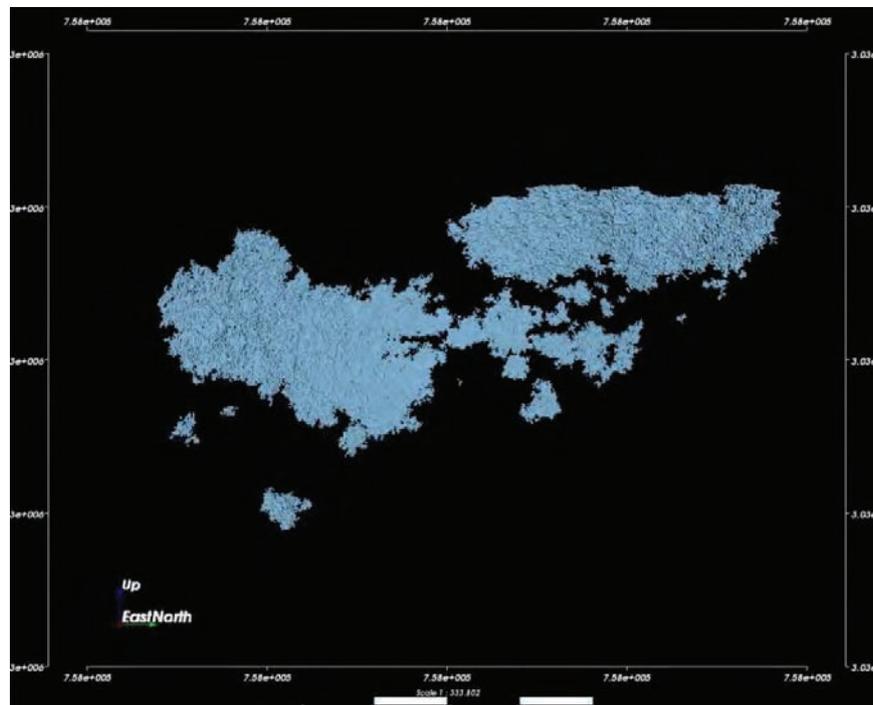


Figura 54. Vista al Este unidad geológica KTat simulación 1

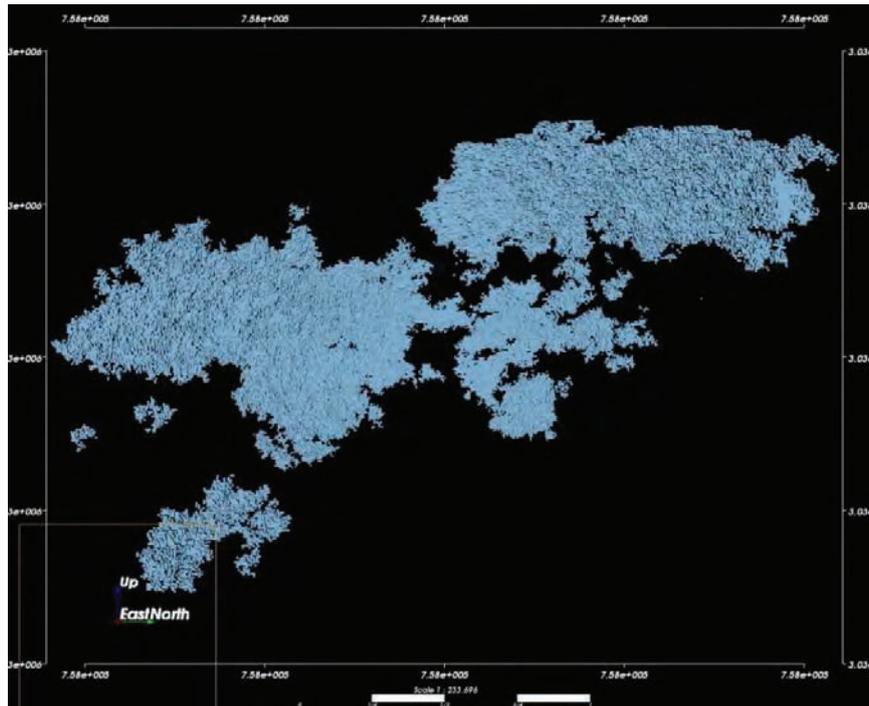


Figura 55. Vista al Este unidad geológica KTat simulación 2

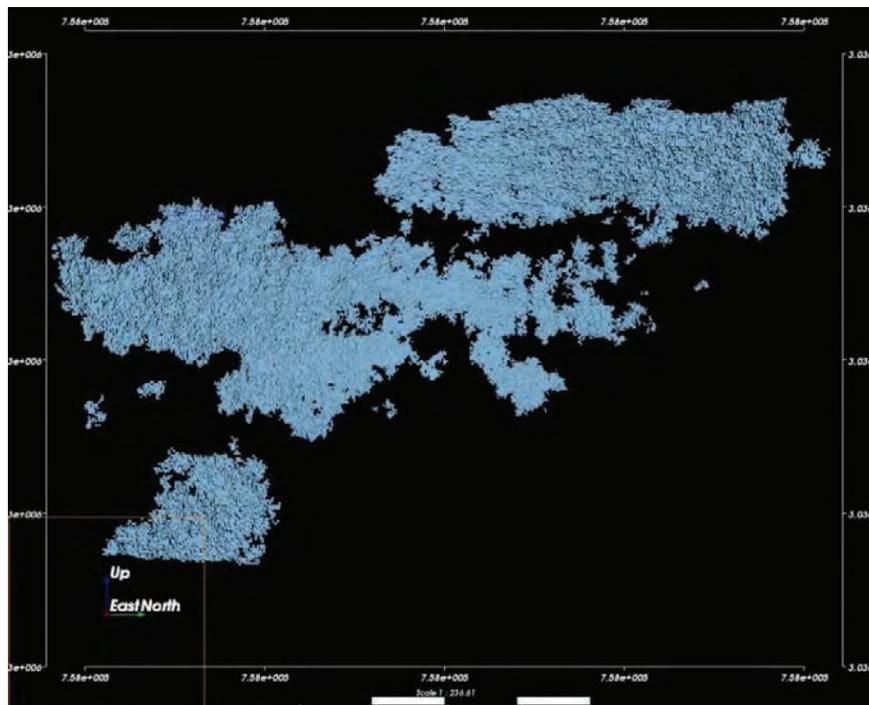


Figura 56. Vista al Este unidad geológica KTat simulación 3

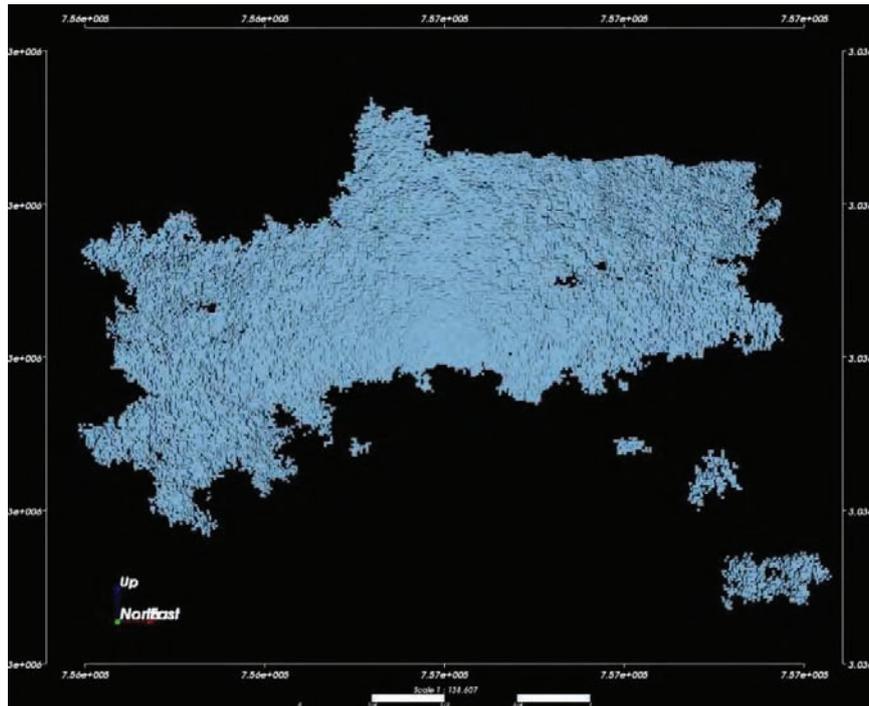


Figura 57. Vista al Norte unidad geológica KTat simulación 1

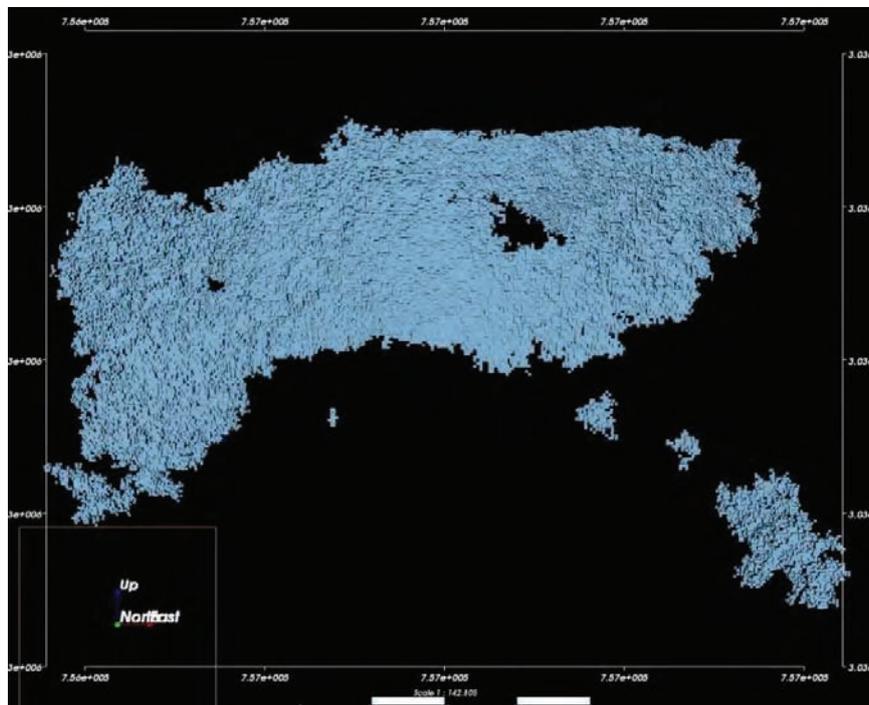


Figura 58. Vista al Norte unidad geológica KTat simulación 2

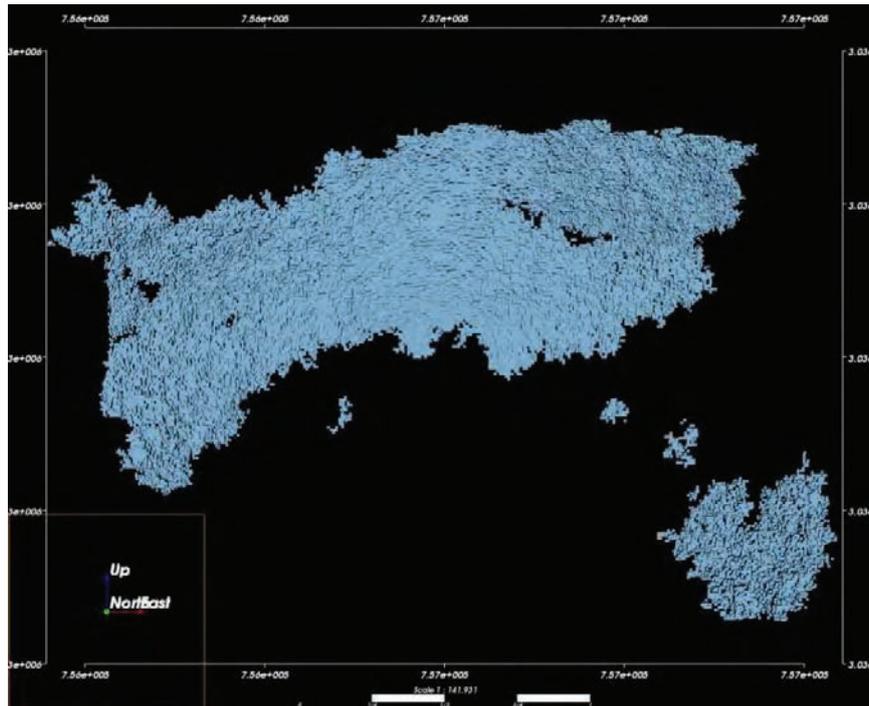


Figura 59. Vista al Norte unidad geológica KTat simulación 3

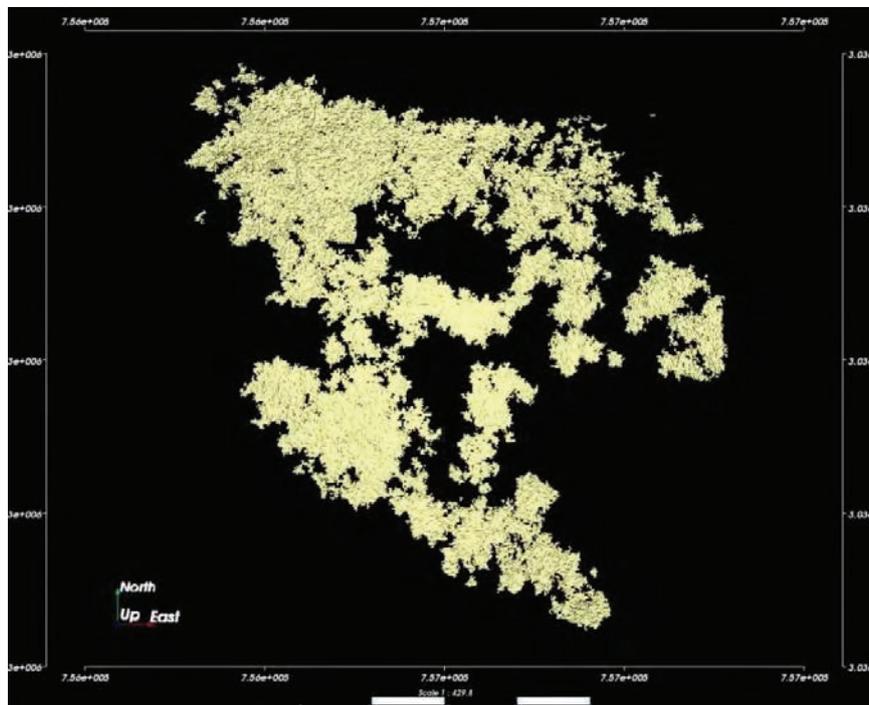


Figura 60. Vista de planta unidad geológica VBX simulación 1

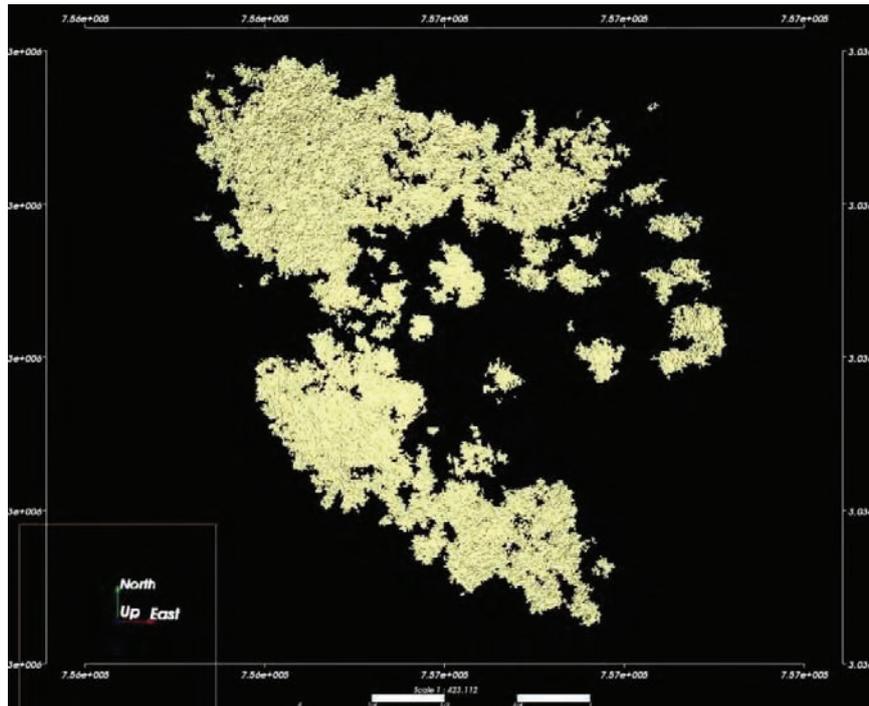


Figura 61. Vista de planta unidad geológica VBX simulación 2

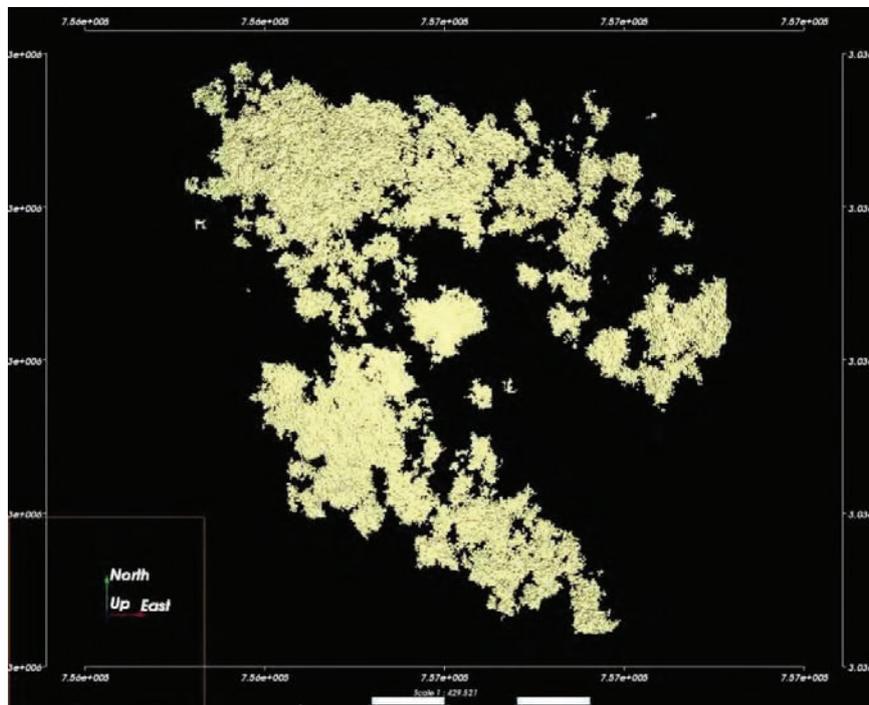


Figura 62. Vista de planta unidad geológica VBX simulación 3

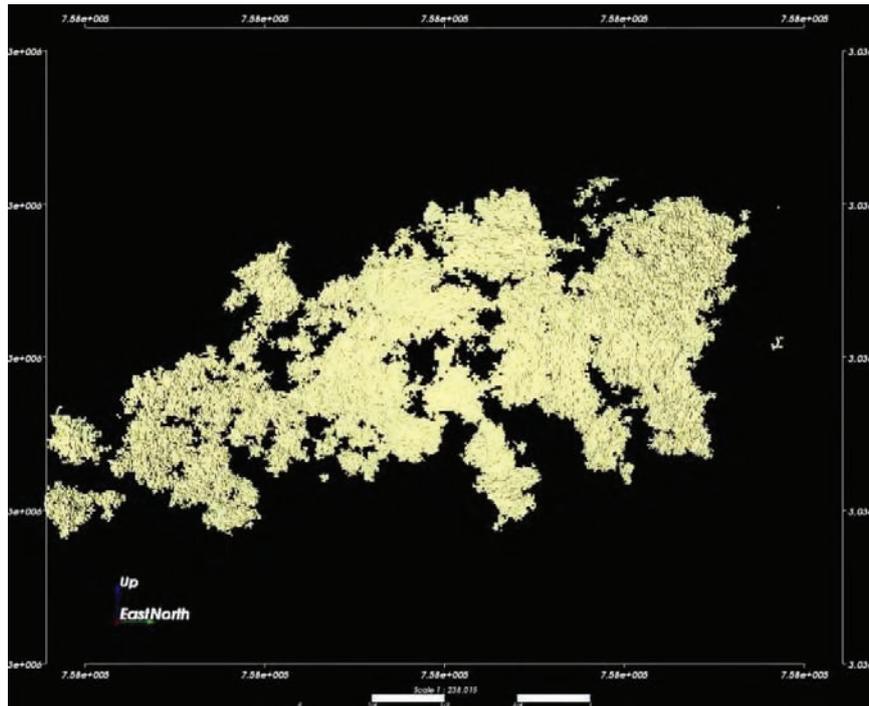


Figura 63. Vista al Este unidad geológica VBX simulación 1

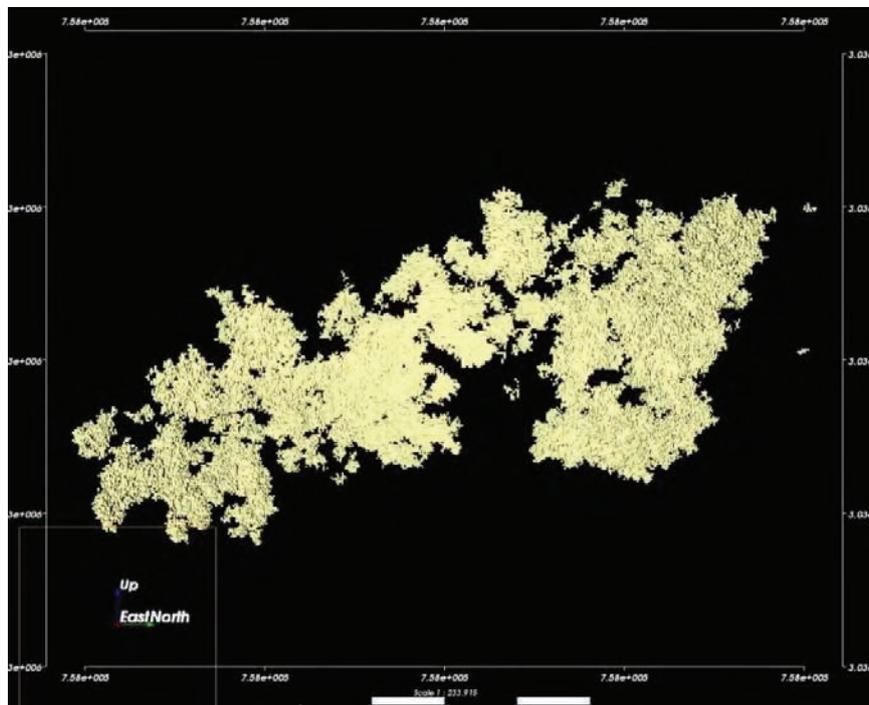


Figura 64. Vista al Este unidad geológica VBX simulación 2

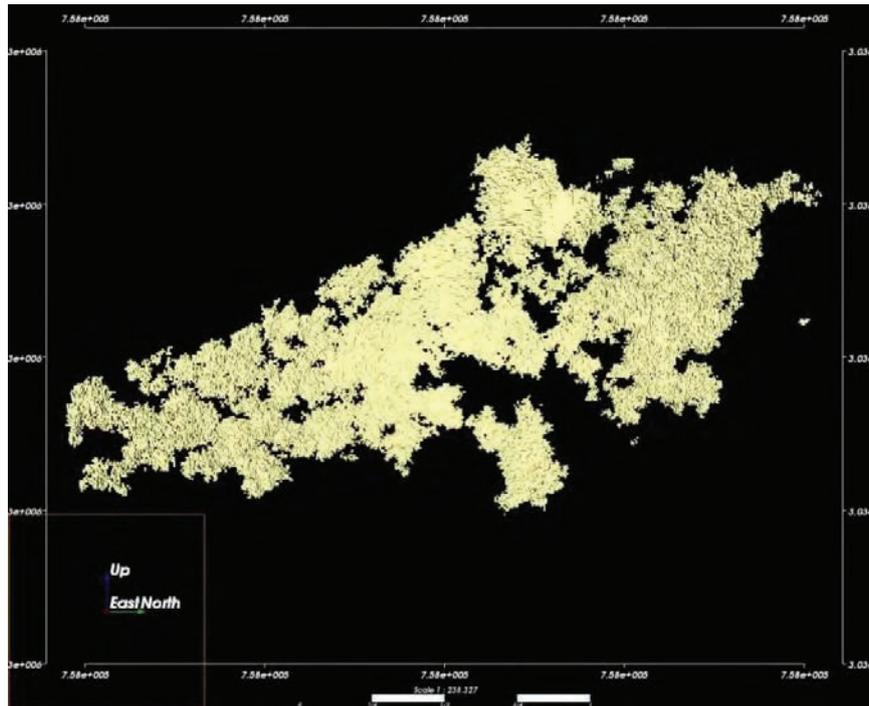


Figura 65. Vista al Este unidad geológica VBX simulación 3

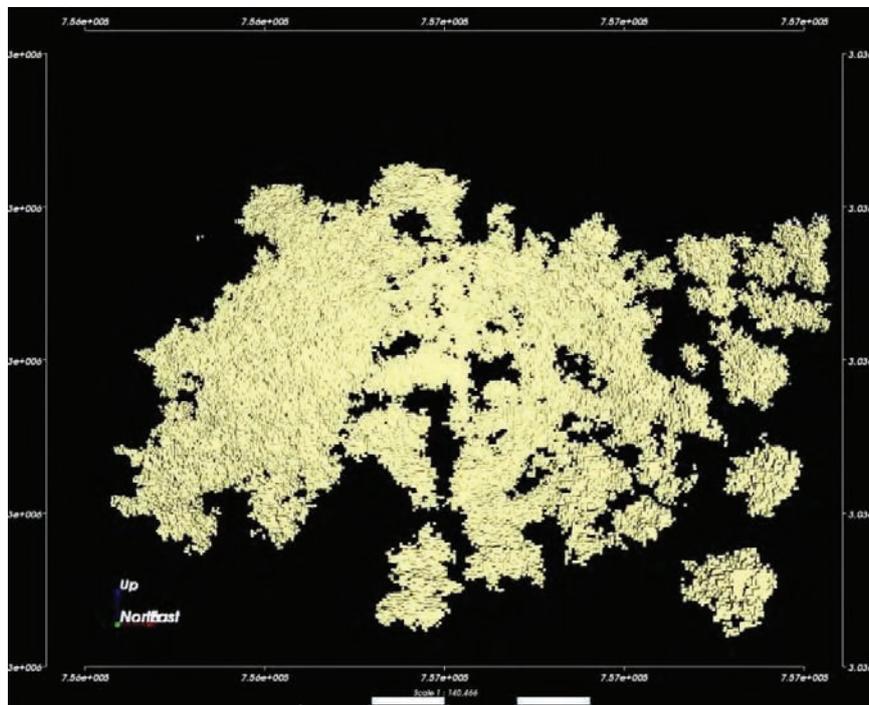


Figura 66. Vista al Norte unidad geológica VBX simulación 1

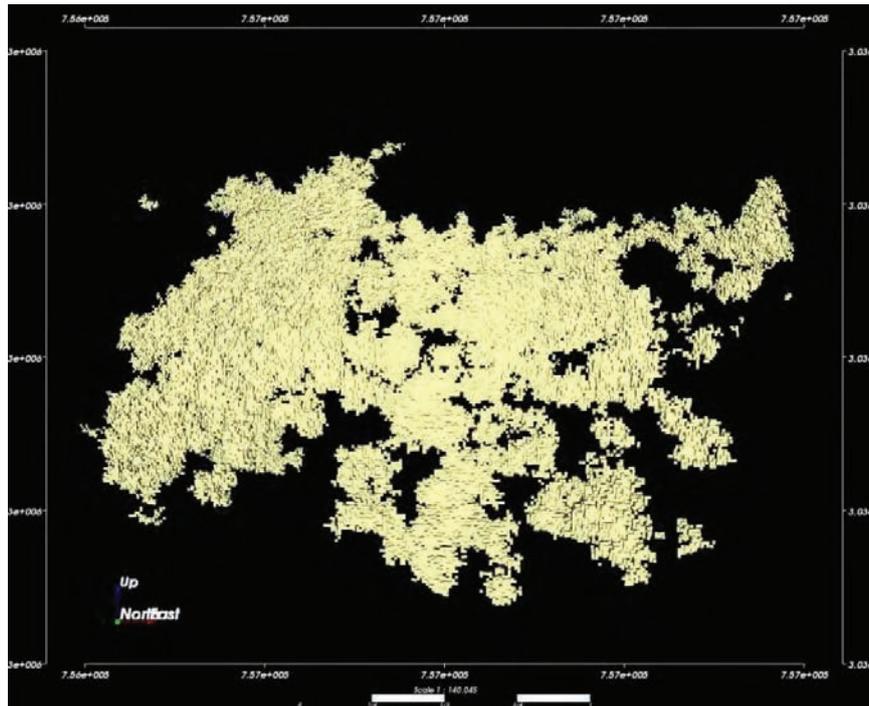


Figura 67. Vista al Norte unidad geológica VBX simulación 2

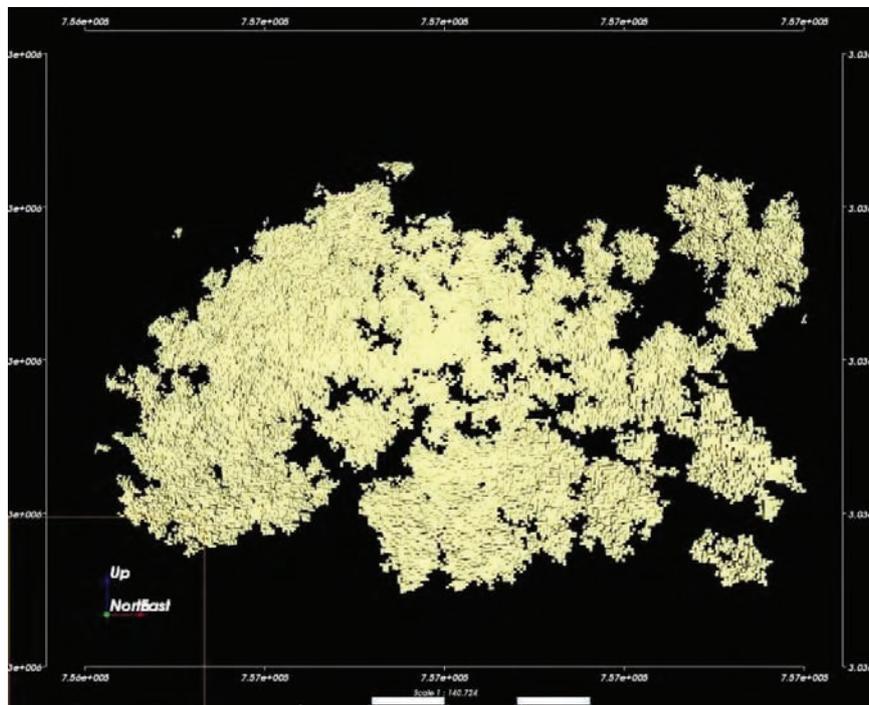


Figura 68. Vista al Norte unidad geológica VBX simulación 3

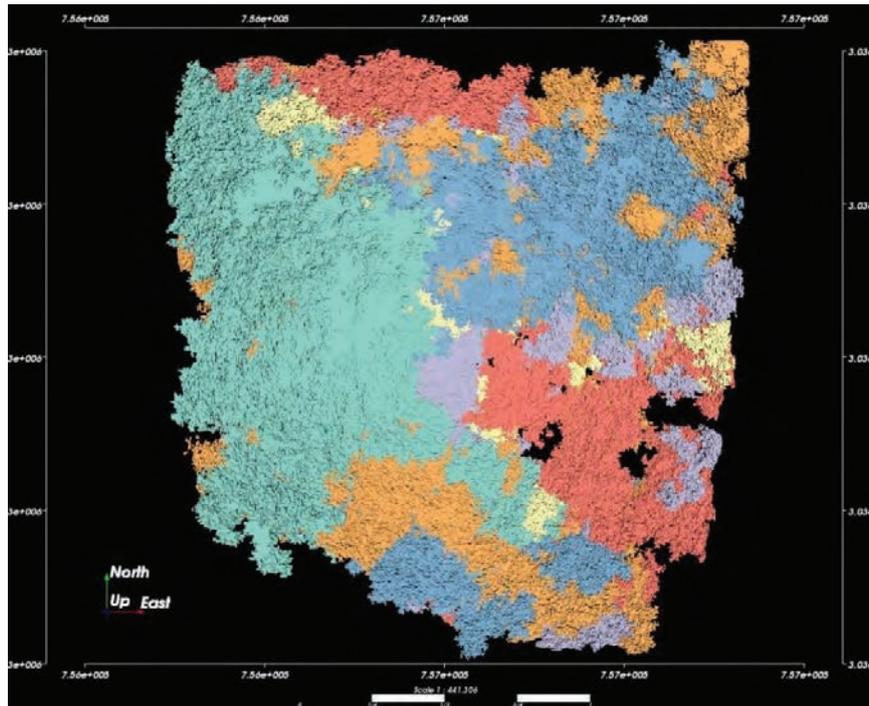


Figura 69. Vista de planta simulación 1 de unidades geológicas

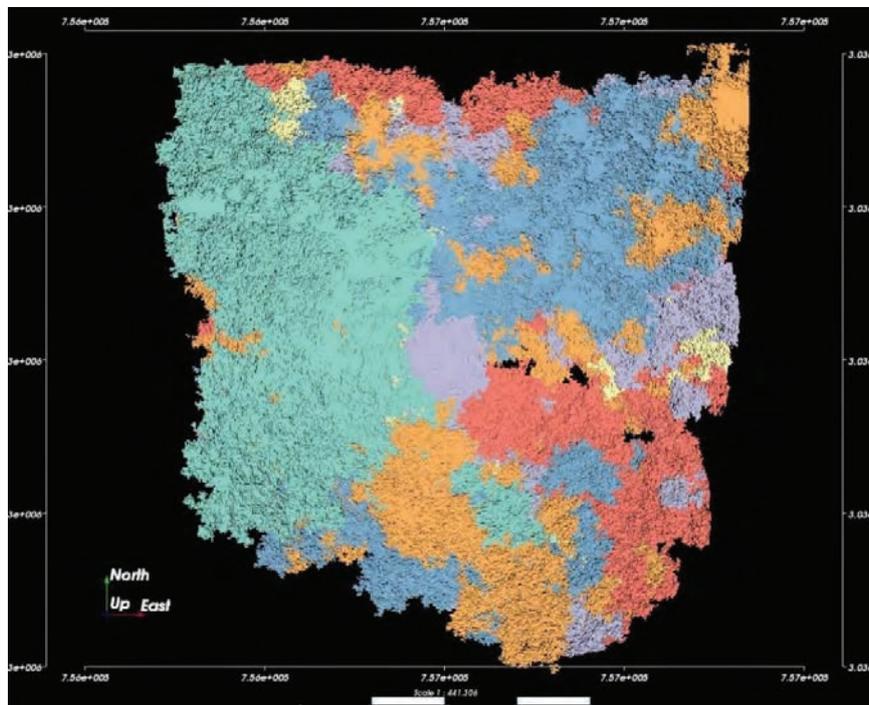


Figura 70. Vista de planta simulación 2 de unidades geológicas

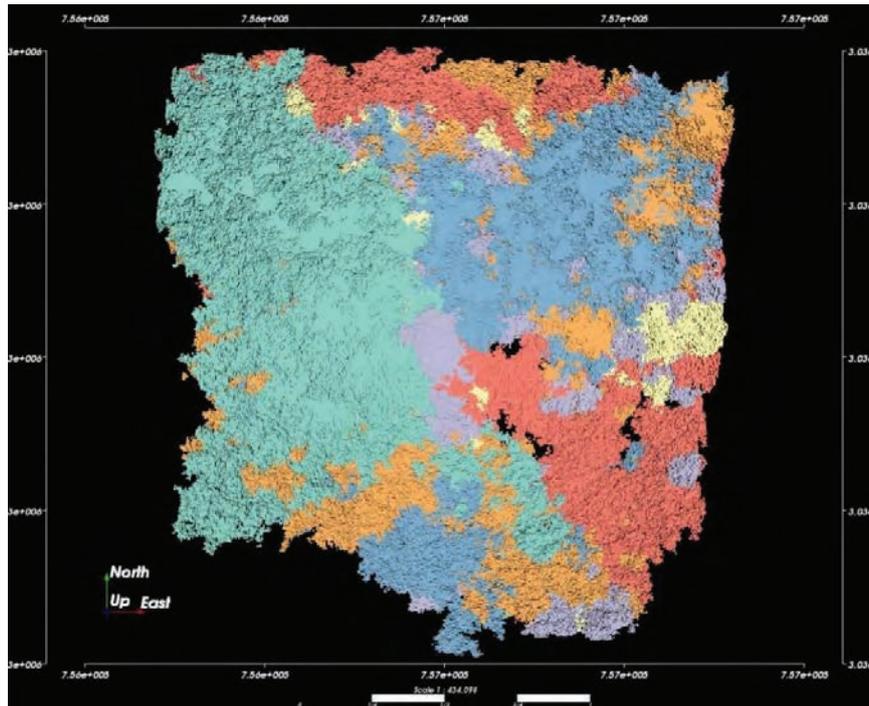


Figura 71. Vista de planta simulación 3 de unidades geológicas

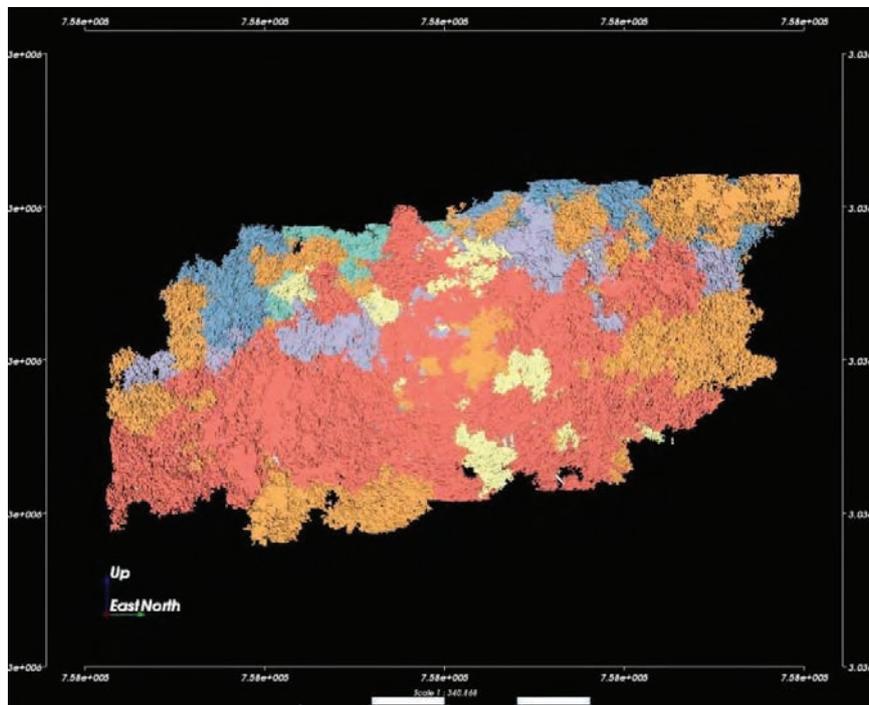


Figura 72. Vista al Este simulación 1 de unidades geológicas

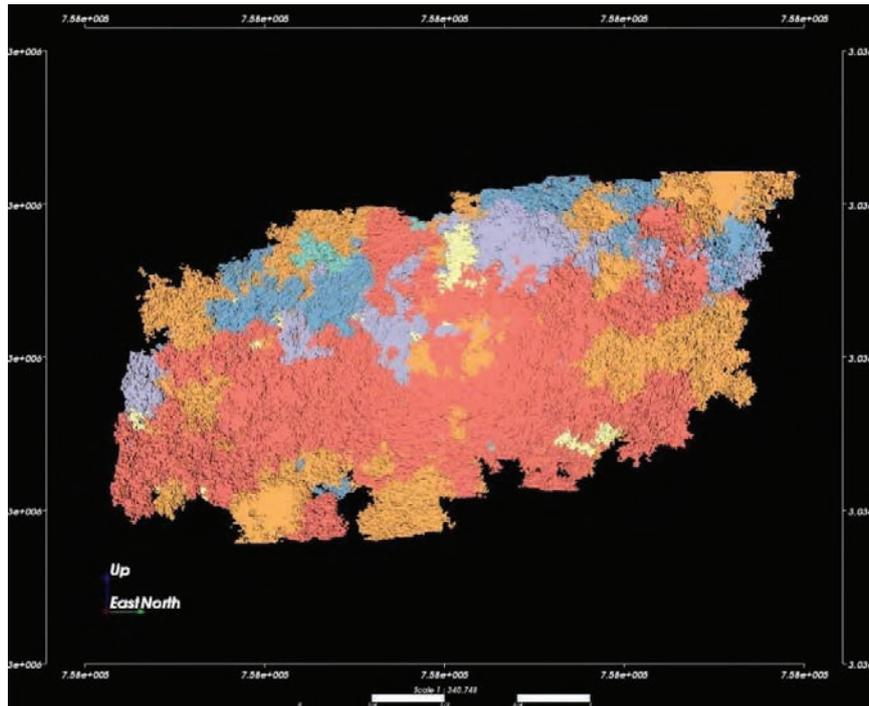


Figura 73. Vista al Este simulación 2 de unidades geológicas

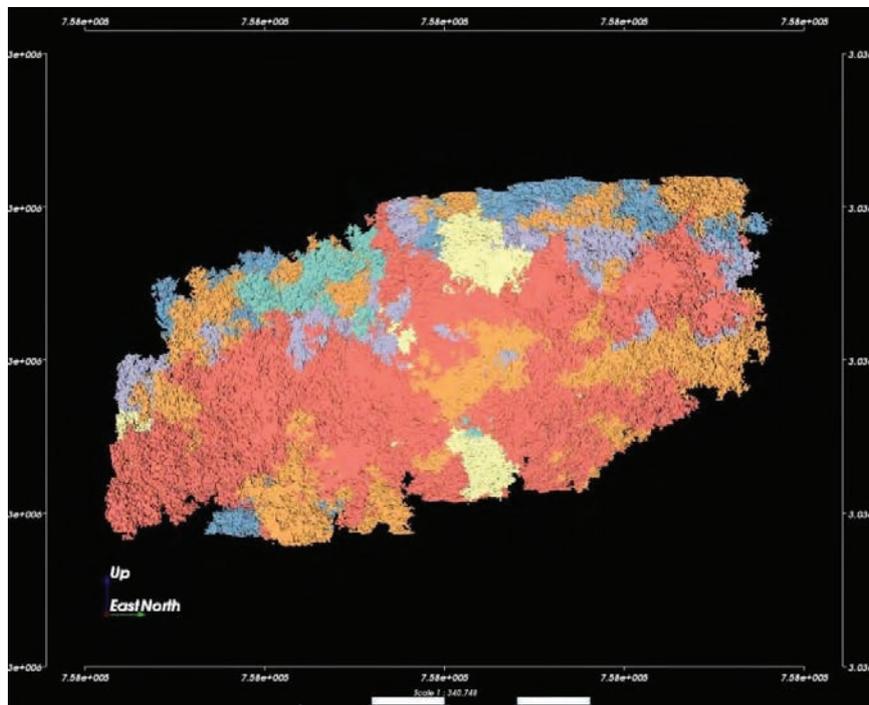


Figura 74. Vista al Este simulación 3 de unidades geológicas

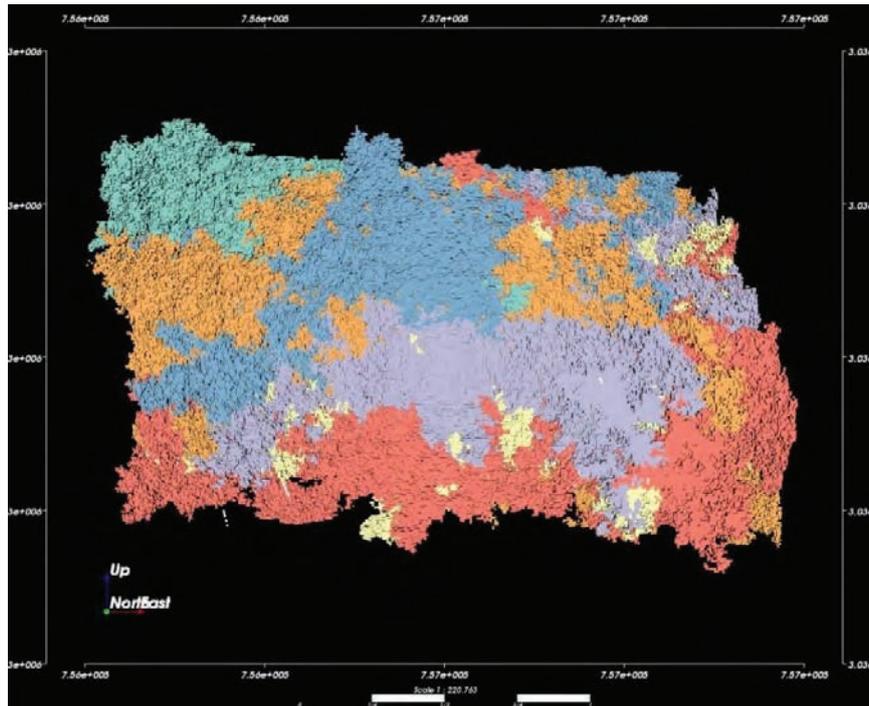


Figura 75. Vista al Norte simulación 1 de unidades geológicas

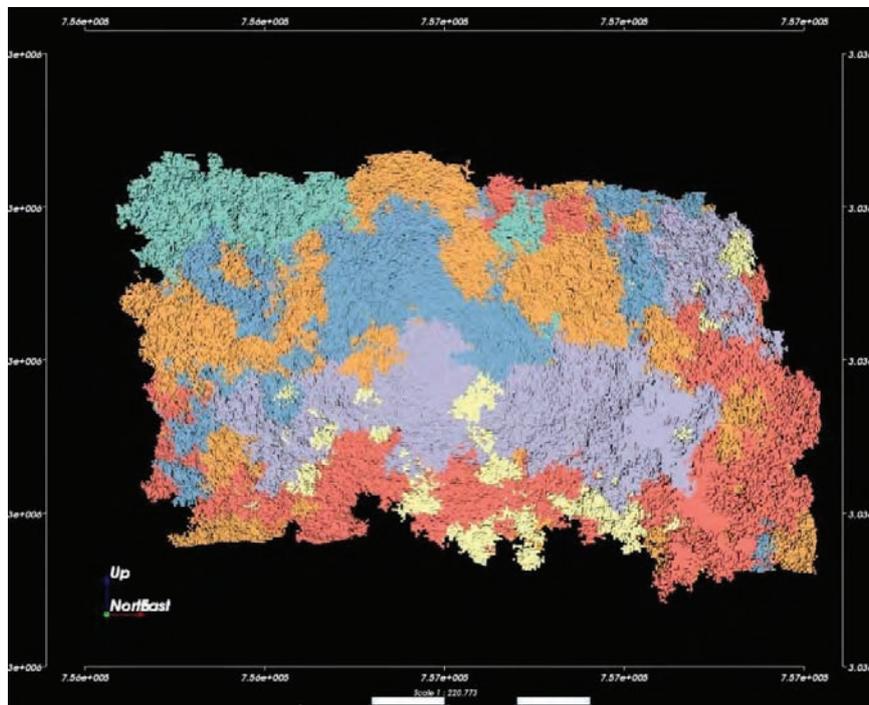


Figura 76. Vista al Norte simulación 2 de unidades geológicas

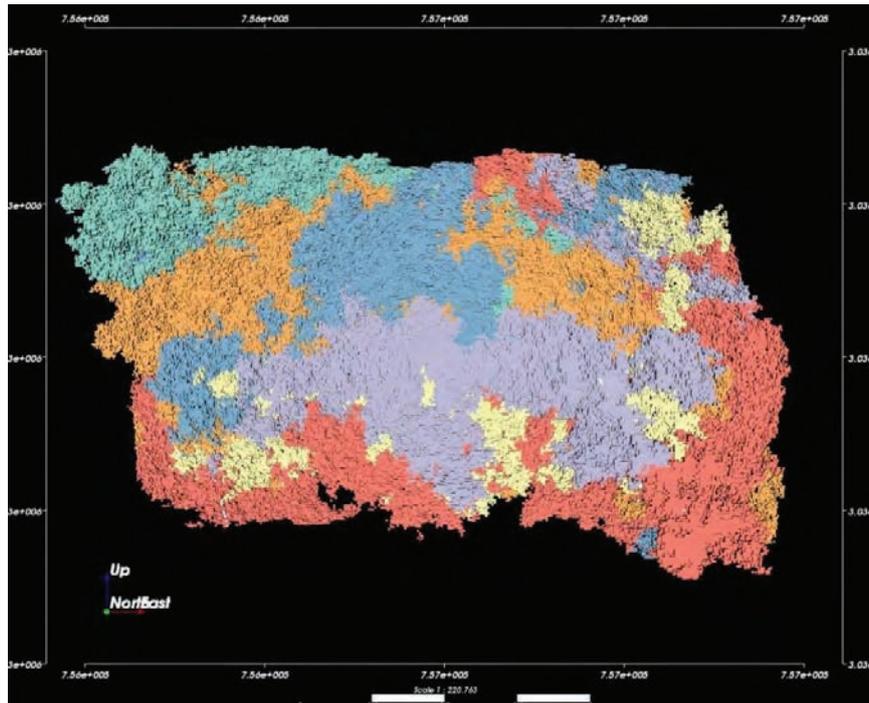


Figura 77. Vista al Norte simulación 3 de unidades geológicas

4.6.- VALIDACIÓN

La técnica de validación utilizada en este trabajo es cualitativa y visual; consiste en dividir los datos en dos grupos y se simulan los datos de un grupo a partir de los datos de otro grupo. (Emery 2007)

La validación es presentada bajo la forma de pruebas gráficas, como los mapas de ubicación espacial de los datos, donde se localiza los datos “mal” estimados, es decir aquellos cuyos errores salen de los intervalos simulados.

Se verificaron los datos obtenidos, para esto se graficaron los datos 3D obtenidos en una cuarta simulación, donde **no se incluyeron** las primeras 30 perforaciones de la base de datos.

Se desplegaron las unidades geológicas KTal, KTam, KTap, KTap, KTat y VBX de la simulación 4, para posteriormente junto a ellas se grafican los datos de



las perforaciones excluidas de esta simulación, se puede apreciar gráficamente la incidencia de las perforaciones excluidas en el sólido que se generó sin esta información de perforación (Figura de 78 a la 83).

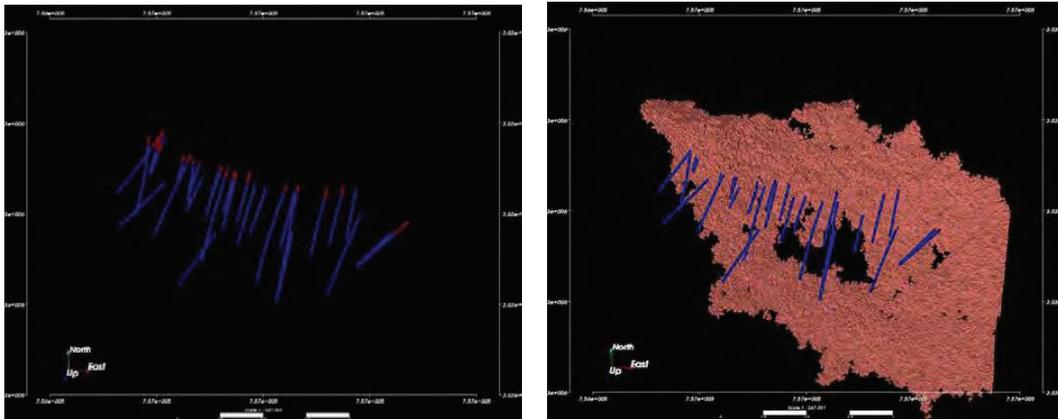


Figura 78. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTal

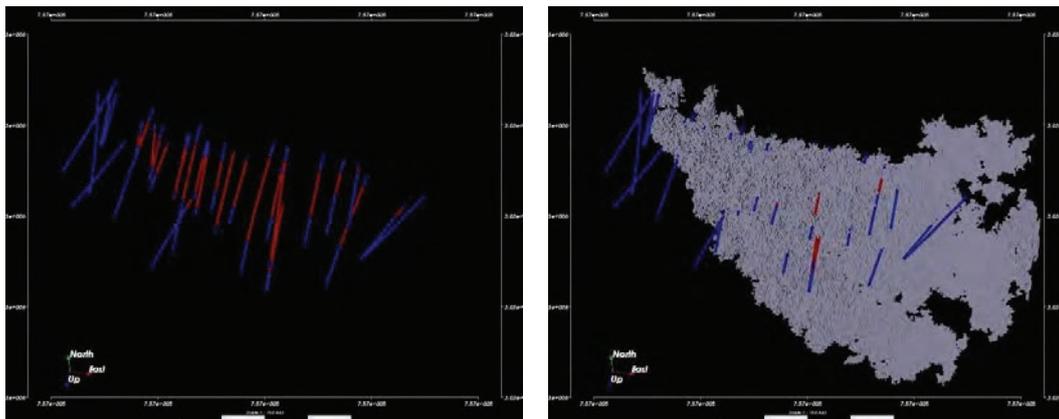


Figura 79. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTam

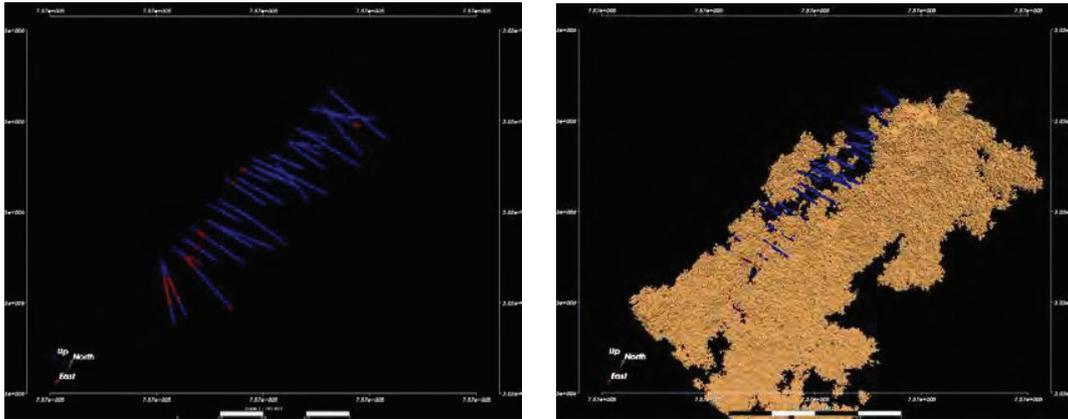


Figura 80. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTap

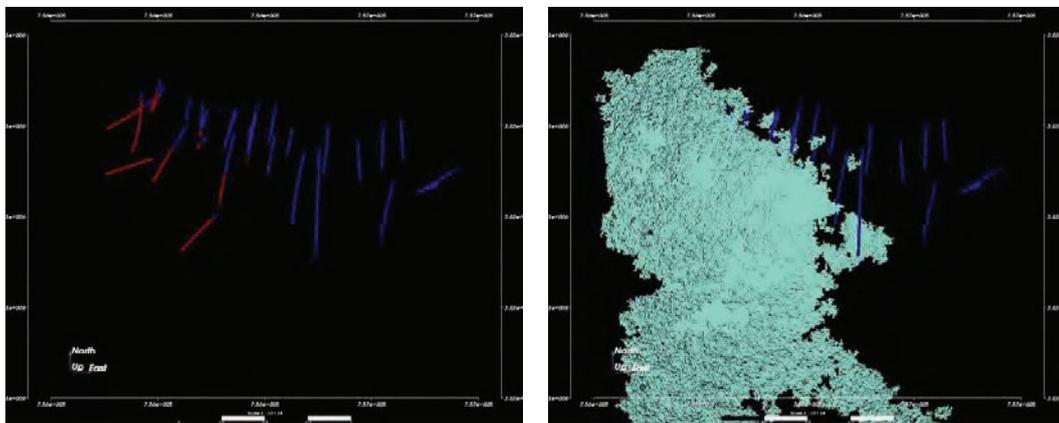


Figura 81. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTapp

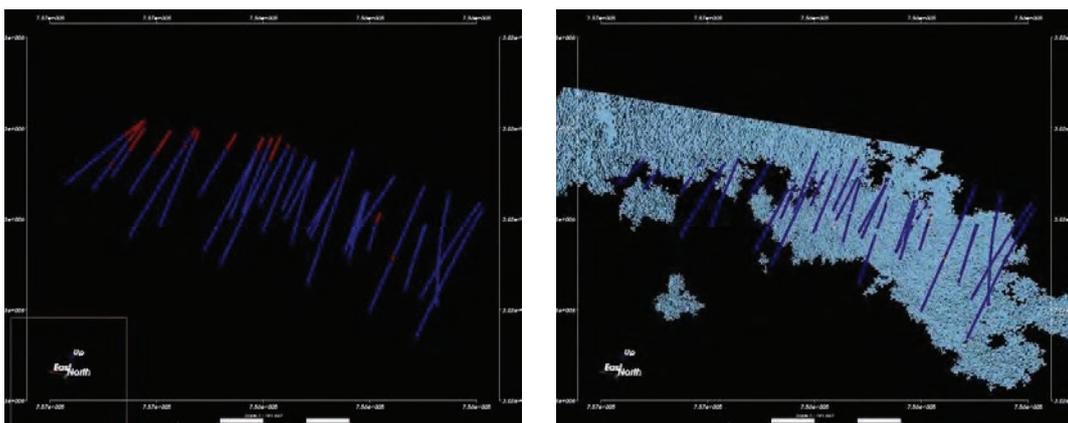


Figura 82. Perforaciones excluidas de la simulación 4 (vista rotada) KTat

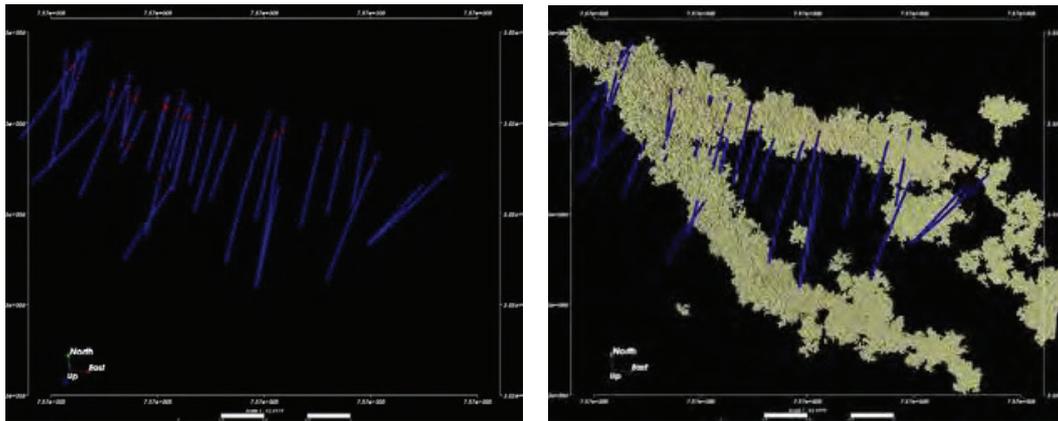


Figura 83. Perforaciones excluidas de la simulacion 4 (vista rotada) VBX



5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los objetivos de este trabajo se cumplieron satisfactoriamente, al realizar un proceso exhaustivo en la investigación de los software libres disponibles idóneos para la simulación de unidades geológicas del caso de estudio, así como, el de no estar sujetos a los restrictivos archivos de extensión de los software comerciales.

La metodología que se evaluó y aplicó para la simulación secuencial de indicadores fue exitosa, al modelar matemáticamente las litologías de la mina Palmarejo, en base a la información de perforación recabada en los años 2003 al 2004.

Es importante mencionar que esta técnica puede ser de mucha utilidad académica y profesionalmente (en el ámbito de la geología económica), como método de apoyo en programas de exploración superficial (2D) y campañas de perforación (3D) para la obtención de un modelo geológico con sustento matemático.

Se hace mención que durante el desarrollo de este trabajo logramos visualizar que al utilizar esta metodología no solo se pueden simular las unidades geológicas sino también, alteraciones, trazas de contaminación, etc. lo que nos muestra su gran campo de aplicación.

En este caso, la simulación secuencial de indicadores fue una herramienta útil para simular variables codificadas en indicadores binarios de tipo litológico, pudiendo Inferir información en 3D y 2D, sobre todo en los espacios donde no contamos con información.

Se pretende hacer énfasis en el uso de las matemáticas aplicadas en el ámbito geológico, en especial, en la geología económica utilizando geoestadística, donde se pueden realizarse simulaciones de un cuerpo mineral económicamente



explotable, y realzar que estos trabajos pueden ejecutarse con éxito con software libres como lo son: SGeMS, RECMIN, R, entre otros.

Como recomendación para futuros trabajos es el implementar una metodología para mejorar la caracterización de la incertidumbre de la ubicación espacial de los datos obtenidos de unidades geológicas con el mínimo de error posible, que cuantifiquen la incertidumbre asociada.



BIBLIOGRAFÍA

Andre G Journel, 1989, “Fundamentals geostatistics in five lessons” the American Geophysical Union, Washington, DC, U.S.A.

Beckton, J., 2004, “RESOURCE REPORT – PALMAREJO BOLNISI GOLD” NL Chih. Mex.

Caceres Saavedra, A. M., 2010 Simulación conjunta de unidades geológicas y leyes de cobre en el sector sur-sur del depósito Rio Blanco-Los Bronces. MC. Geología. Tesis. Universidad de Chile.

Camprubí, A. Albinson, T., 2006 Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica, BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA VOLUMEN CONMEMORATIVO DEL CENTENARIO REVISIÓN DE ALGUNAS TIPOLOGÍAS DE DEPÓSITOS MINERALES DE MÉXICO, TOMO LVIII, NÚM. 1, 58 P

Chauvet, P., 1994, “Aide-Memoire de Géostatistique Minière”, École des Mines de Paris, 210 p

Corbett, G. 2004, PALMAREJO, EL REALITO and YECORA EXPLORATION PROJECTS, NORTHERN MEXICO.

Deutsch Clayton V. A Sequential Indicator Simulation Program for Categorical Variables with Point and Block Data: BlockSIS. 402-2p

Emery X., 2007. Apuntes de Geoestadística. Clase Geoestadística. Ingeniería en Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.



Journel, A. G. y Huijbregts, C. J., 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, New York, 600 p.

Matheron, G., 1970, “La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications” Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, Ecole de Mines de Paris, 212 p.

Nicolas Remy, Alexandre Boucher, Jinbing Wu, 2009, Applied geostatistics with SGeMS. Cambridge University.

Zhang, R., Myers, D. E. y Warrick, A. W., 1992, Estimation of the Spatial Distribution of Soil Chemical Using Pseudo Cross-Variograms, Soil Science Society of America Journal, Vol. 56, No. 5, pp.1444-1452.