



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MODELAMIENTO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA DEL CONTACTO BASAMENTO-  
GRAVA A PARTIR DE LAS SUPERFICIES EXPUESTAS ADYACENTES, CUENCA  
TOKI, CALAMA (PRECORDILLERA, NORTE DE CHILE)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

HÉREDI GABRIELA JARA RIVERA

PROFESOR GUÍA

MARCELO GARCÍA GODOY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

GONZALO DÍAZ RODRÍGUEZ

GERMAN AGUILAR MARTORELL

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Héredi Gabriela Jara Rivera  
**FECHA:** 18/06/2018  
**PROFESOR GUÍA:** Marcelo H. García Godoy

**MODELAMIENTO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA DEL CONTACTO  
BASAMENTO - GRAVA A PARTIR DE LAS SUPERFICIES  
EXPUESTAS ADYACENTES, CUENCA TOKI, CALAMA  
(PRECORDILLERA, NORTE DE CHILE)**

En el presente trabajo se pretende desarrollar una metodología que permita modelar superficies cubiertas a partir de la geomorfología expuesta. Esto se desarrolló en la cuenca Toki, al oeste de la ciudad de Calama, zona que se caracteriza por tener un clima árido y ha permanecido así por al menos 25Ma, lo que ha favorecido la preservación de ciertas geoformas denominadas pediplanos (superficies de bajo relieve). Para lograr el objetivo de generar la superficie de contacto entre basamento-grava bajo un relleno posterior, se utilizaron distintos métodos de interpolación geoestadísticos usando el software ArcGis, tomando como datos de entrada las superficies geomorfológicas (Pediplanos) y superficies con distintos rangos de pendiente. Para poder cuantificar el error del modelo se utilizó como contacto real la información proveniente de 495 sondajes.

Los resultados mostraron que los datos de entrada proveniente de las superficies de bajo relieve aportan información relevante que permiten crear un modelo cercano a lo que es la geometría de la superficie real. Una simple selección por pendiente entrega resultados similares a los obtenidos a partir de las geoformas lo que podría permitir automatizar la metodología. Además, una mínima cantidad de información extra (menos de un 10% de sondajes) entrega una buena estimación de dicho contacto minimizando drásticamente los errores. Asimismo, los resultados mostraron que existe una pendiente óptima tal que su proyección pase cercana al contacto real. Existe una elección de sondajes basada en una ubicación a cierta distancia que sería óptima para minimizar el error y no existe una clara relación entre el error y la cantidad de datos de entrada, lo que quiere decir que el tipo de información de entrada es crucial para generar un buen modelo predictivo.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, gracias a los miembros de la comisión Marcelo García, Gonzalo Díaz, Germán Aguilar y Marcelo Farías. Sobre todo, a mi Profe guía y co-guía por estar ahí casi todas las semanas respondiendo dudas y ayudándome con este tema cuando lo necesité. Gracias a los profesores, auxiliares y ayudantes del departamento por entregarme todos los conocimientos que adquirí en estos años.

Gracias a mis Papás por darme todo lo que tengo y la oportunidad de haber estudiado. Sobre todo, a mi Papá porque gracias a él estudie esta carrera que me encanta. Gracias a mis hermanas y al Feli por apoyarme en todo, en mis horas de estudio y mis tiempos de estrés. Gracias a mis gorditas Molly y Mia por acompañarme en mis largas noches de estudio y trabajo para la memoria.

Gracias a las niñas y mis amigos de la sección que estuvimos juntos desde que éramos mechones hasta ahora, los quiero mucho. Y a mis amigos de geo, sobre todo al Toto, Tania y Chinito que fueron mis amigos más cercanos y compañeros en todos los terrenos.

Aunque los conocí solo este año gracias a mis compañeros de la oficina Xterrae que se han preocupado por mí, apoyado y dado todas las facilidades para poder terminar esta etapa.

Se me deben quedar muchas personas fuera, pero los que me conocen saben que no soy buena para este tipo de cosas.

## Tabla de Contenido

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 1.1   | MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.....                                    | 1  |
| 1.2   | HIPÓTESIS DE TRABAJO .....                                     | 2  |
| 1.3   | OBJETIVOS.....   | 2  |
| 1.4   | METODOLOGÍA .....  | 3  |
| 1.5   | UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....                           | 7  |
| 2.    | ANTECEDENTES .....   | 8  |
| 2.1   | GEOMORFOLOGÍA.....   | 8  |
| 2.2   | GEOLOGÍA.....  | 13 |
| 2.2.1 | SUSTRATO MESOZOICO–PALEÓGENO .....                             | 14 |
| 2.2.2 | DEPÓSITOS DEL RELLENO MIOCENO–HOLOCENO .....                   | 17 |
| 2.3   | CONTEXTO CLIMÁTICO.....  | 19 |
| 3.    | PROCESAMIENTO DE DATOS .....                                   | 21 |
| 3.1   | SONDAJES.....  | 21 |
| 3.2   | SUPERFICIES EN LA ZONA EXPUESTA.....                           | 24 |
| 3.2.1 | SUPERFICIES GEOMORFOLÓGICAS O PEDIPLANOS.....                  | 24 |
| 3.2.2 | SUPERFICIES SELECCIONADAS POR PENDIENTE.....                   | 26 |
| 4.    | MODELADO DE SUPERFICIES.....                                   | 30 |
| 4.1   | MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN.....                                  | 30 |
| 4.1.1 | PONDERACIÓN DE DISTANCIA INVERSA (IDW).....                    | 31 |
| 4.1.2 | SPLINE.....  | 31 |
| 4.1.3 | VECINO NATURAL.....  | 32 |
| 4.1.4 | KRIGING .....  | 33 |
| 4.2   | RESULTADOS.....  | 34 |
| 4.2.1 | VARIABILIDAD DE LA SUPERFICIE CUBIERTA: SONDAJES.....          | 35 |
| 4.2.2 | MODELADO DE SUPERFICIES GEOMORFOLÓGICAS .....                  | 40 |
| 4.2.3 | MODELADO DE SUPERFICIES CON PENDIENTE MENOR A 10° .....        | 46 |
| 4.2.4 | MODELADO DE SUPERFICIE CON DISTINTOS RANGOS DE PENDIENTE ..... | 64 |
| 4.2.5 | VARIABILIDAD DE LA SUPERFICIE EXPUESTA .....                   | 68 |
| 4.2.6 | EFFECTO DE LA DISTANCIA (BUFFER).....                          | 71 |
| 5.    | DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN.....                                    | 78 |
| 6.    | BIBLIOGRAFÍA .....   | 83 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1:</b> <i>Tabla que muestra el área total que cubre cada superficie, el porcentaje que cubre del área total de la zona de estudio y la cantidad total de puntos de entrada que contiene cada una.</i> .....                      | 26 |
| <b>Tabla 2:</b> <i>Tabla que muestra el área total que cubre cada superficie con cierta pendiente, el porcentaje que cubre del área total de la zona de estudio y la cantidad total de puntos de entrada que contiene cada una.</i> ..... | 28 |
| <b>Tabla 3:</b> <i>Desviación estándar del MAE de los grupos aleatorios con un mismo porcentaje de sondajes con los cuatro métodos en dos situaciones: Solo sondajes y Superficies geomorfológicas más sondajes</i> .....                 | 44 |
| <b>Tabla 4:</b> <i>Tabla donde se muestra el orden de las superficies desde las que cubren menor a mayor porcentaje del área expuesta.</i> .....  | 70 |
| <b>Tabla 5:</b> <i>Cantidad de sondajes que contiene cada rango de distancia.</i> .....   | 73 |

## Tabla de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Imagen donde se muestra esquemáticamente un corte transversal del área de estudio, donde se señalan los principales rasgos morfológicos y unidades geológicas a considerar. En línea segmentada se observa la superficie de contacto que se busca modelar ..... | 2  |
| <b>Figura 2:</b> Esquema con las distintas etapas que se seguirán para el modelado de la superficie cubierta desconocida a partir de la superficie descubierta adyacente. ....   | 6  |
| <b>Figura 3:</b> Imagen que muestra la zona de estudio en un contexto regional y a detalle ...   | 7  |
| <b>Figura 4:</b> Imagen donde se muestran las unidades fisiográficas durante la pediplanización, degradación y acumulación de sedimentos.....  | 9  |
| <b>Figura 5:</b> Superficies de bajo relieve en un contexto regional y perfiles topográficos de distintas secciones .....  | 11 |
| <b>Figura 6:</b> Mapa geológico de la zona de estudio escala 1:25.000.....   | 14 |
| <b>Figura 7:</b> Mapa de la zona de estudio donde se muestra el sustrato Mesozoico-Paleógeno y la ubicación de los sondajes.....   | 21 |
| <b>Figura 8:</b> Representación gráfica de la información que contienen los sondajes.....  | 22 |
| <b>Figura 9:</b> Esquema que representa la geometría del sondaje en profundidad y en planta. ....  | 23 |
| <b>Figura 10:</b> Mapa de la zona de estudio donde se muestra la distribución de las distintas superficies de bajo relieve.....  | 25 |
| <b>Figura 11:</b> DEM y mapa de pendiente de la zona de estudio.....   | 27 |
| <b>Figura 12:</b> Ejemplo de polígono de Voronoi .....   | 32 |
| <b>Figura 13:</b> Interpolación de la superficie cubierta (contacto real) a partir de la información de sondajes con los cuatro métodos (a) IDW, (b) Spline, (c) Vecino Natural y (d) Kriging.....   | 36 |
| <b>Figura 14:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método de Ponderación de distancia inversa (IDW). ....  | 37 |
| <b>Figura 15:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método de Spline (SP). ....   | 38 |
| <b>Figura 16:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método de Vecino Natural (VN). ....   | 38 |
| <b>Figura 17:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método Kriging (KG) .....   | 39 |
| <b>Figura 18:</b> Imagen que representa la base de datos de las superficies geomorfológicas más los sondajes.....  | 41 |
| <b>Figura 19:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Ponderación de distancia inversa (IDW).....  | 42 |
| <b>Figura 20:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Spline (SP).....                             | 42 |
| <b>Figura 21:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Vecino Natural (VN). ....                    | 43 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 22:</b> Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Kriging(KG). .....  | 43 |
| <b>Figura 23:</b> Gráfico que representa el promedio del MAE de los cinco grupos aleatorios de las superficies generadas a partir de los sondajes y las superficies geomorfológicas con los métodos de Inverso Ponderado de distancia (IDW), Spline (SP), Vecino Natural (VN) y Kriging(KG) ..... | 45 |
| <b>Figura 24:</b> Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente.....   | 47 |
| <b>Figura 25:</b> Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Spline con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente .....   | 47 |
| <b>Figura 26:</b> Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Vecino natural (VN) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente .....  | 48 |
| <b>Figura 27:</b> Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Kriging (KG) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente.....  | 48 |
| <b>Figura 28:</b> Representación en 3D de las superficies con el método de interpolación Distancia inversa ponderada (IDW).....   | 50 |
| <b>Figura 29:</b> Perfiles con dirección N-S y E-W de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes con el método Distancia inversa ponderada (IDW). .....  | 52 |
| <b>Figura 30:</b> Representación en 3D de las superficies con el método de interpolación de Spline (SP).....  | 54 |
| <b>Figura 31:</b> Perfiles con dirección N-S y E-W de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes.con el método de Spline (SP).....   | 56 |
| <b>Figura 32:</b> Representación en 3D de las superficies con el método de interpolación Vecino Natural (VN). .....   | 58 |
| <b>Figura 33:</b> Perfiles con dirección N-S y E-W de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes con el método de Vecino Natural (VN).....   | 60 |
| <b>Figura 34:</b> Representación en 3D de las superficies con el método de interpolación Kriging (KG).....  | 61 |
| <b>Figura 35:</b> Perfiles con dirección N-S y E-W de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes con el método de Kriging (KG). .....  | 63 |
| <b>Figura 36:</b> Error absoluto medio (MAE) asociado a las superficies interpolada-extrapolada usando distintos rangos de pendientes, con el método de Spline y Kriging. ....  | 65 |
| <b>Figura 37:</b> Distribución del MAE según rangos de pendiente con el método de Spline . .....  | 66 |
| <b>Figura 38:</b> Distribucion del MAE, según ranfos de pendiente con el método de Kriging, .....   | 67 |
| <b>Figura 39:</b> Relación entre el MAE y la cantidad de puntos de entrada que representan la superficie con pendiente entre 10° y 15° (expresado en porcentaje de puntos utilizados). .....  | 69 |
| <b>Figura 40:</b> Porcentaje del área expuesta que cubre cada rango de pendiente y su MAE correspondiente.....  | 71 |
| <b>Figura 41:</b> Mapa que muestra los sondajes que se encuentran cada 100m de distancia. ....  | 72 |
| <b>Figura 42:</b> Error absoluto medio (MAE) de la superficie interpolada-extrapolada con pendientes entre 10° y 15°, con respecto a la distancia al borde de la cuenca.....  | 74 |

**Figura 43:** *Diferencias entre el valor de la altitud real del contacto con la modelada según el método de Spline, para superficies con pendientes entre 10° y 15°.....75*

**Figura 44:** *Diferencias entre el valor de la altitud real del contacto y la modelada, según el método de Kriging, para superficies con pendientes entre 10° y 15° .....76*

# 1. INTRODUCCIÓN

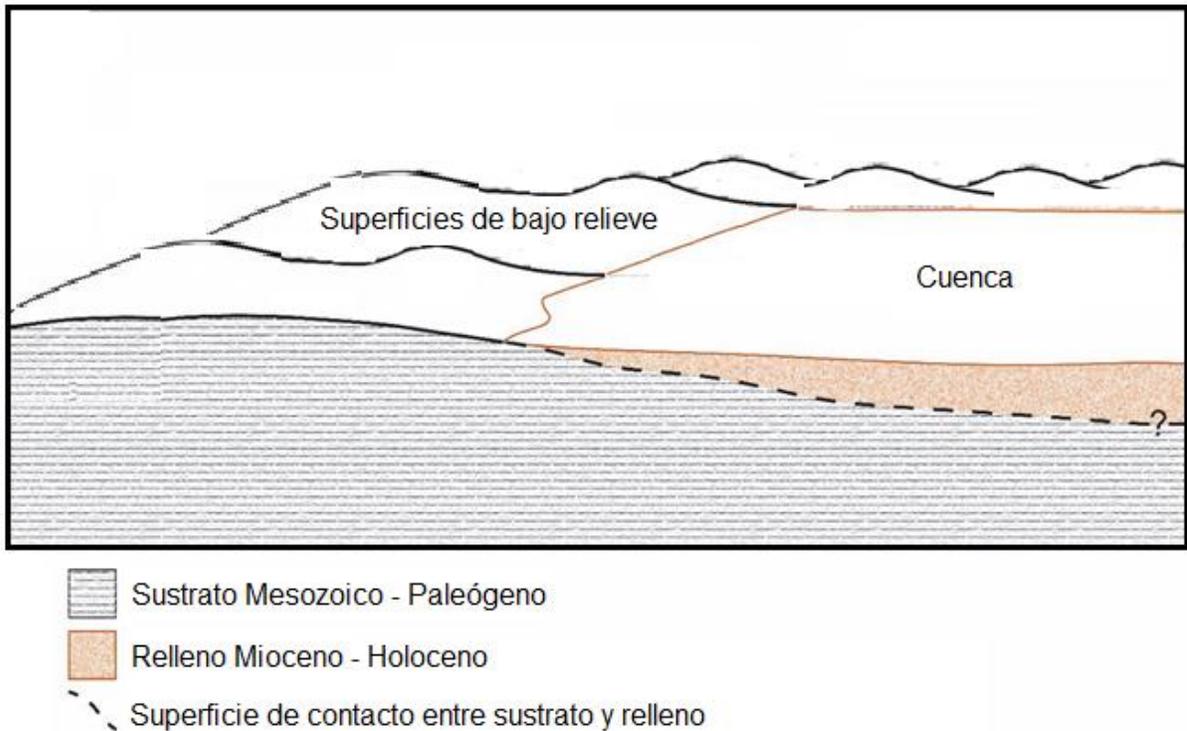
## 1.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

Estudios científicos y de exploración de recursos naturales, tales como minerales e hídricos, en zonas extensamente cubiertas por materiales de relleno en una cuenca, requieren de un buen modelo de distribución de espesor de dicho relleno o, equivalentemente, de la superficie de contacto grava-basamento. Estos modelos se pueden construir con datos de sondajes y/o geofísica, pero es muy costoso.

Dado que, en zonas de clima árido como el norte de Chile, las características geomorfológicas de zonas expuestas, como los pediplanos, se preservan en el tiempo, la motivación de este trabajo es explorar una metodología que use estas características para predecir la distribución de espesor del relleno (Figura 1), y así reducir considerablemente los costos de estos estudios.

Este tema fue estudiado previamente por González (2015) en la Cordillera de la Costa y la Depresión Central del extremo norte de Chile. Se usaron características morfométricas de las superficies de bajo relieve preservadas en la Cordillera de la Costa, junto con datos de profundidad del basamento en la Depresión Central a partir de un sondaje de cañones y de dos secciones sísmicas calibradas con el sondaje. En ese trabajo se generó una metodología basada en la información de dichas superficies que puede ser aplicada en otras áreas, pero se demostró que el contacto cubierto grava-basamento modelado quedaba siempre por arriba del contacto cubierto real. Esto se debería a que el origen de la superficie expuesta en la Cordillera de la Costa no guarda relación directa con el origen de la superficie cubierta en la Depresión Central por la erosión posterior de la superficie expuesta (González, 2015).

Para el presente estudio, se consideró aplicar una metodología similar a la de González (2015) en una zona donde la erosión del basamento y acumulación del relleno tuvieran un mismo origen y donde el contacto cubierto basamento-grava sea bien conocido por numerosos sondajes. El lugar de estudio es la cuenca Toki, ubicada al oeste de Calama cuya información de sondajes fue otorgada por CODELCO para fines científicos.



**Figura 1:** Imagen donde se muestra esquemáticamente un corte transversal del área de estudio, donde se señalan los principales rasgos morfológicos y unidades geológicas a considerar. En línea segmentada se observa la superficie de contacto que se busca modelar.

## 1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Las características morfológicas, como la inclinación y rugosidad de las superficies de bajo relieve expuestas desarrolladas sobre el sustrato rocoso en el borde de la cuenca, permiten inferir o ayudar a describir la geometría de dicha superficie por debajo del relleno mediante su proyección (Figura 1). Además, la superficie proyectada o modelada, bajo ciertos supuestos, se podría tratar matemáticamente para corregirla y asimilarla con la superficie real.

## 1.3 OBJETIVOS

### Objetivo general

Desarrollar una técnica que permita modelar la geometría 3D de la superficie de contacto entre el basamento (Mesozoico-Paleógeno) y el relleno de gravas (Mioceno-

Holoceno) que existe en la cuenca Toki, a partir de las características morfológicas de las superficies expuestas adyacentes.

### Objetivos específicos

1. Determinar la variabilidad espacial de la superficie del contacto basamento-grava, en la zona cubierta, utilizando la información de sondajes y distintos métodos de interpolación.
2. Identificar las superficies geomorfológicas (pedimentos) y superficies definidas por su rango de pendiente, en la zona expuesta (alrededor de la cuenca), que pueden ser correlacionadas con la superficie cubierta (existente antes de la depositación del relleno). Dichas superficies expuestas representan los datos de entrada para predecir la superficie cubierta.
3. Modelar la superficie cubierta usando los distintos datos de entrada y distintos métodos de interpolación-extrapolación.
4. Cuantificar la diferencia (error) entre las superficies modeladas y la superficie real (definida por sondajes), y de esta manera determinar los datos de entrada y el método de interpolación-extrapolación más adecuados para el modelamiento.

### **1.4 METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo el modelado de superficies se utilizó información de 495 sondajes otorgados por CODELCO, datos morfométricos de la topografía obtenidos a partir de modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 30 m. (SRTM, NASA), un mapa geológico digitalizado escala 1:25.000 (García et al., 2009) y un reconocimiento de las superficies de bajo relieve (pediplanos) mediante Google Earth a escala 1:5.000. Estas últimas se correlacionaron por unas ya definidas en un trabajo previo realizado por Tapia (2009), a escala 1:25.000.

La superficie cubierta real fue generada con la información de sondajes (datos de salida), muchos de los cuales son inclinados y por lo tanto fue necesario calcular la posición de la intersección del contacto basamento-cobertura para luego generar la superficie envolvente y de acuerdo con distintos métodos de interpolación, se analizó la

variabilidad de la superficie cubierta utilizando distinta cantidad de sondaje con distintos grupos aleatorios. Por su lado, la superficie cubierta modelada fue generada con distinta información morfométrica de la zona expuesta (datos de entrada). Estos son los pediplanos, que fueron determinados mediante un reconocimiento geomorfológico del área de estudio y según la inclinación que posea un punto que representa la superficie expuesta, generados a partir del mapa de pendientes proveniente del DEM y con los diferentes métodos de interpolación. Para generar esta superficie cubierta modelada se utilizó el mapa geológico de la zona que permite determinar el contacto entre distintos tipos litológicos (Figura 2(a)) y el DEM que posee una matriz de puntos, con un tamaño de celda de 30 x 30 m., y con los que se pueden realizar mapas de pendiente utilizando el software ArcGIS, permitiendo identificar y discriminar distintas áreas de acuerdo con este criterio (Figura 2(b)). Por lo tanto, interceptando estos dos mapas se pudieron definir las distintas superficies expuestas en el sustrato rocoso (Figura 2(c)). Toda esta información fue representada en una base de datos que contiene puntos con coordenadas de ubicación (en metros, UTM) y de elevación también en metros representados como  $(x, y, z)$ .

Para la reconstrucción de la superficie desconocida en la zona de la cuenca, se utilizaron distintos métodos geoestadísticos de interpolación mediante las herramientas de ArcGIS usando la información de los puntos  $(x, y, z)$  (Figura 2(d)). De esta manera, es posible generar una malla de puntos que describen la superficie cubierta, en base a la información de dichos puntos que representan a las superficies expuestas (Figura 2(d)).

Para cada superficie modelada, se compara la información en las restantes posiciones con el contacto basamento-grava conocidas mediante sondajes, para luego calcular el error asociado. De esta manera, es posible obtener una cuantificación de la similitud que existe entre las superficies modeladas y los datos con que se cuenta de la superficie cubierta real.

El error se determinó de la siguiente manera. Como los sondajes están representados como puntos con coordenadas  $(x_s, y_s, z_s)$ , se tomó su ubicación  $(x_s, y_s)$  y se interceptó con cada una de las superficies modeladas, es decir, para cada ubicación de sondaje se extrajo un valor de “z” modelado ( $z_m$ ). Llegando a obtener para cada superficie

modelada un conjunto de puntos con coordenadas  $(x_s, y_s, z_m)$  y así poder conocer el error entre los valores de “z”, modelados ( $z_m$ ) y reales ( $z_s$ ).

Se calcularon dos tipos de errores, ambos utilizando un algoritmo computacional en lenguaje Python, los cuales muestran lo mismo, la variabilidad que tienen con respecto a la superficie real, pero de formas distintas de visualizar. En el primero se hizo un procedimiento para calcular un error absoluto medio de cada una de las superficies (MAE). El segundo calcula la diferencia entre las elevaciones, modelada ( $z_m$ ) y real ( $z_s$ ), para cada una de las posiciones de los sondajes, entregando como resultado una tabla con tres columnas, en las primeras, las coordenadas de los sondajes  $(x_s, y_s)$  y en la tercera la diferencia de altitud. En este último caso, si la diferencia de “z” es mayor que cero, significa que la superficie de contacto interpolada está sobre la real, de lo contrario, está por debajo.

El primer tipo de error entrega un solo valor numérico por superficie, que sirve para evaluar los distintos métodos predictivos. Este error es conocido como MAE (Mean absolute error) el cual se basa en la siguiente fórmula matemática:

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{n}$$

Donde:

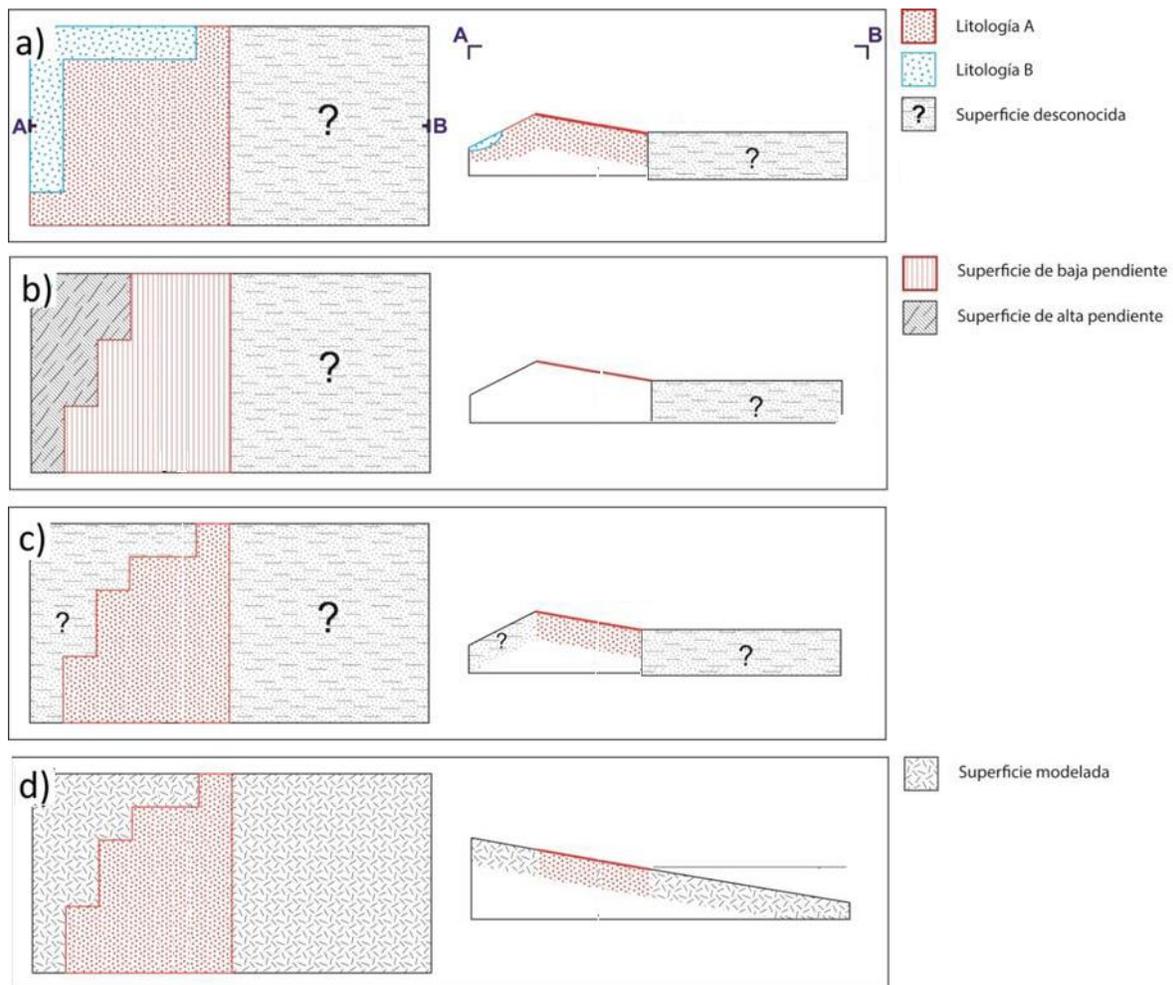
- $y_i$  corresponde a la predicción de los valores de “z” ( $z_m$ ) para cada ubicación de sondaje
- $x_i$  corresponde al valor verdadero de “z” ( $z_s$ ) entregado por cada sondaje
- $n$  es el número total de sondajes

El segundo tipo de error entrega simplemente su valor real-entero  $\Delta z_i$  por cada sondaje ( $i$ ), es decir, entrega un conjunto de elementos (un vector), mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta z_i = y_i - x_i:$$

Con este resultado se generó un gráfico de distribución del error, utilizando un diagrama de “Caja-Bigotes”, el cual muestra los tres cuartiles en el rectángulo central (Caja) y los valores máximos y mínimos alineados hacia arriba y abajo (Bigotes).

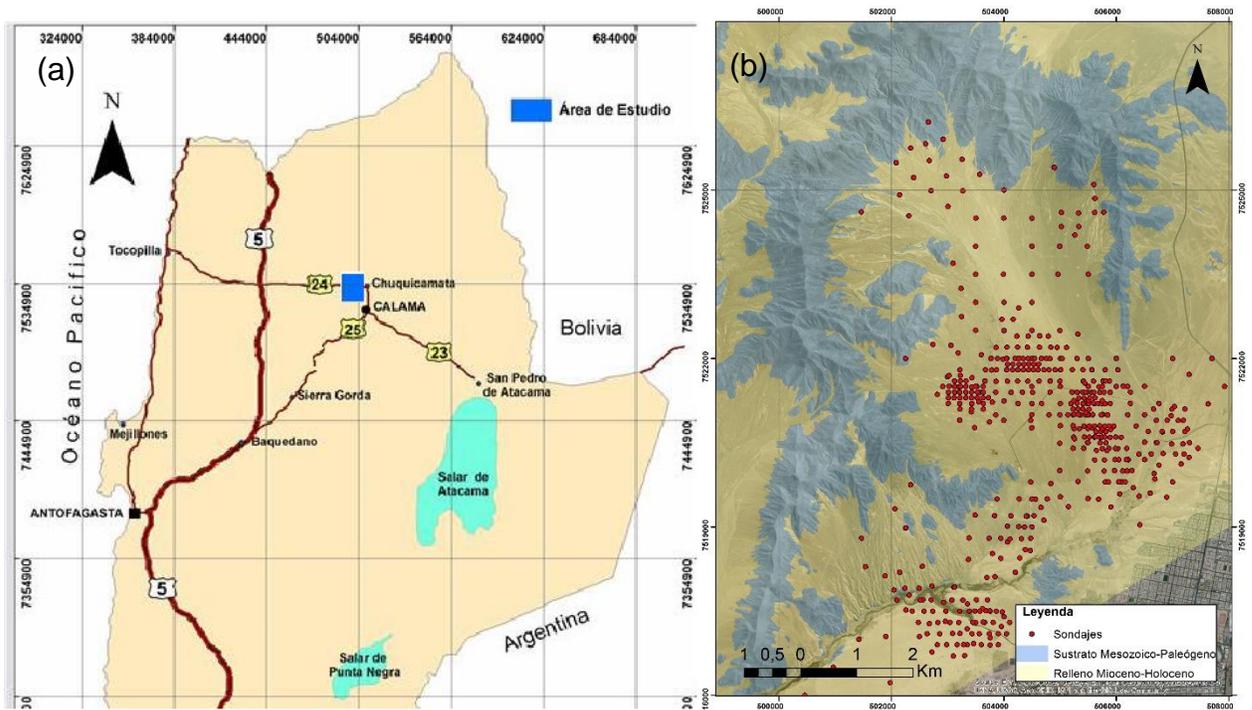
Utilizando los errores recién mencionados, se utilizó otra metodología para evaluar el efecto de la distancia a la que podrían estar los sondajes que entreguen la información precisa para minimizar los errores. Para ellos, se utilizó la herramienta de ArcGIS llamada “buffer” que lo que hace es crear áreas que se encuentren alrededor del sustrato a una distancia dada. Teniendo estas áreas determinadas, se interceptaron con los sondajes para conocer a qué distancia se encontraba cada uno. Una vez ya definidos los sondajes que se encontraban a cierta distancia, se determinaron los errores.



**Figura 2:** Esquema con las distintas etapas que se seguirán para el modelado de la superficie cubierta desconocida (lado derecho) a partir de la superficie descubierta adyacente (lado izquierdo). El recuadro (a) exhibe las restricciones litológicas que se utilizarán basadas en mapas geológicos con el objetivo de seleccionar rocas expuestas formadas pre-relleno Mioceno. El recuadro (b) muestra las restricciones morfométricas a utilizar como la pendiente con el fin de agrupar las superficies de bajo relieve preservadas. El recuadro (c) es el resultado de interceptar las etapas (a) y (b). Finalmente, el recuadro (d) muestra el resultado de las etapas previas obteniendo la superficie modelada (modificado de González 2015).

## 1.5 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en la Precordillera del norte de Chile, al Oeste de la ciudad de Calama y consta de aproximadamente  $6 \times 10 \text{ km}^2$  entre los  $22^{\circ}20'10''$ - $22^{\circ}30'$  S y  $69^{\circ}$ - $68^{\circ}55'$  W. Consiste en una zona de cuenca, rodeada de cerros con forma de herradura, con altitudes entre 2.700 y 3.200 m s.n.m. El acceso al área de estudio se logra fácilmente por el sur y este, desde la ciudad de Calama, a la que se llega, desde el oeste, por Antofagasta o por Chuquicamata-Tocopilla.



**Figura 3:** Imagen que muestra la zona de estudio (a) Ubicación dentro de un contexto regional (b) Imagen tomada de Google Earth donde se muestra el área de estudio, en azul se muestra la zona expuesta (Sustrato Mesozoico-Paleógeno), en Amarillo la zona cubierta (Relleno Mioceno-Holoceno) y en puntos rojos se encuentra la ubicación de los sondajes.

## 2. ANTECEDENTES

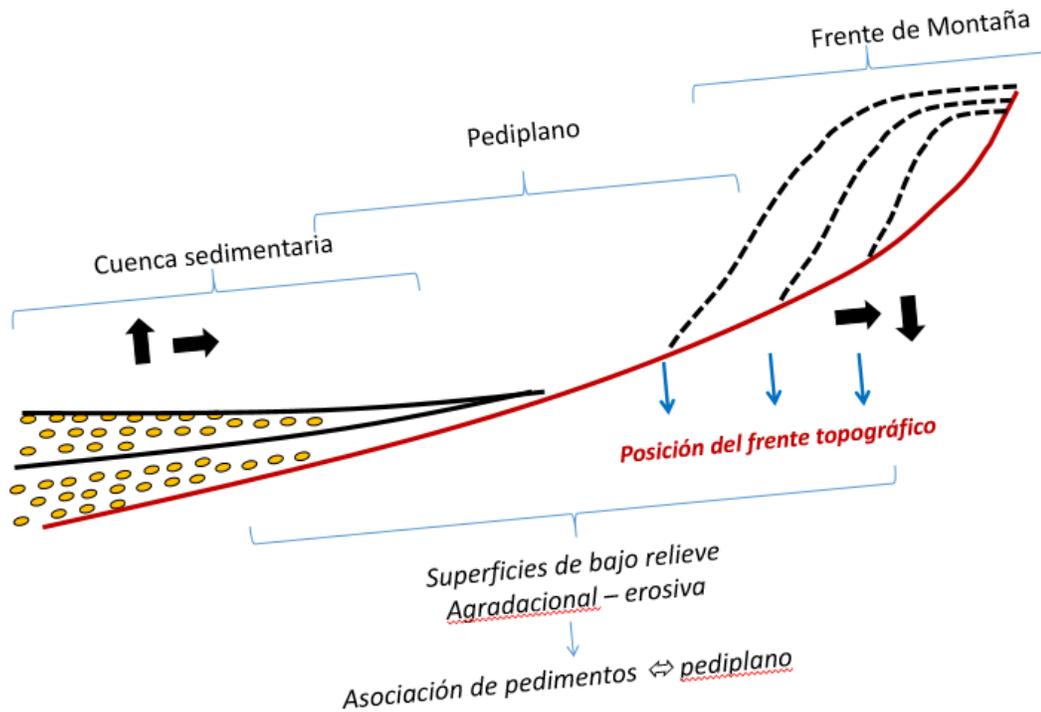
### 2.1 GEOMORFOLOGÍA

Durante largos periodos de tiempo de inactividad tectónica, la topografía se puede modelar mediante distintos procesos de erosión generando un paisaje de bajo relieve. Este relieve residual puede contener pedimentos, que son superficies de bajo relieve labrados sobre un sustrato rocoso producto de una erosión y depositación prolongada sin deformación activa. Luego de que estas superficies se formaran en el pasado, pueden ser enterradas por la posterior depositación, conservándose bajo el relleno. Por otro lado, cuando son elevadas tectónicamente pueden formar notorios marcadores en el paisaje identificándose por poseer una baja pendiente (Burbank y Anderson, 2001). La elevación e inclinación de muchas de estas superficies se pueden extrapolar lateralmente para unirse con otras similares, pudiendo definir una superficie regional extensa de cierta altura y baja pendiente. (Small y Anderson, 1998).

Los pedimentos son marcadores geomorfológicos longevos y extensos que se desarrollan bajo condiciones climáticas áridas en que la meteorización física y erosión lateral son predominantes en relación con la incisión vertical de canales. (Cooke, 1970; Clark y otros, 2006; Strudley y Murray, 2007; Dohrenwend y Parsons, 2009). Junto a estas superficies de bajo relieve se desarrollan cuencas sedimentarias con el material proveniente de la erosión que los formó representando a su vez el nivel base del sistema (Figura 4). Este proceso puede repetirse y sobreponerse quedando evidenciados en el registro geológico, por lo tanto, cada uno de los niveles de pedimentos se podría relacionar temporal y espacialmente con distintos niveles en profundidad de la cuenca sedimentaria (Figura 5 (b)).

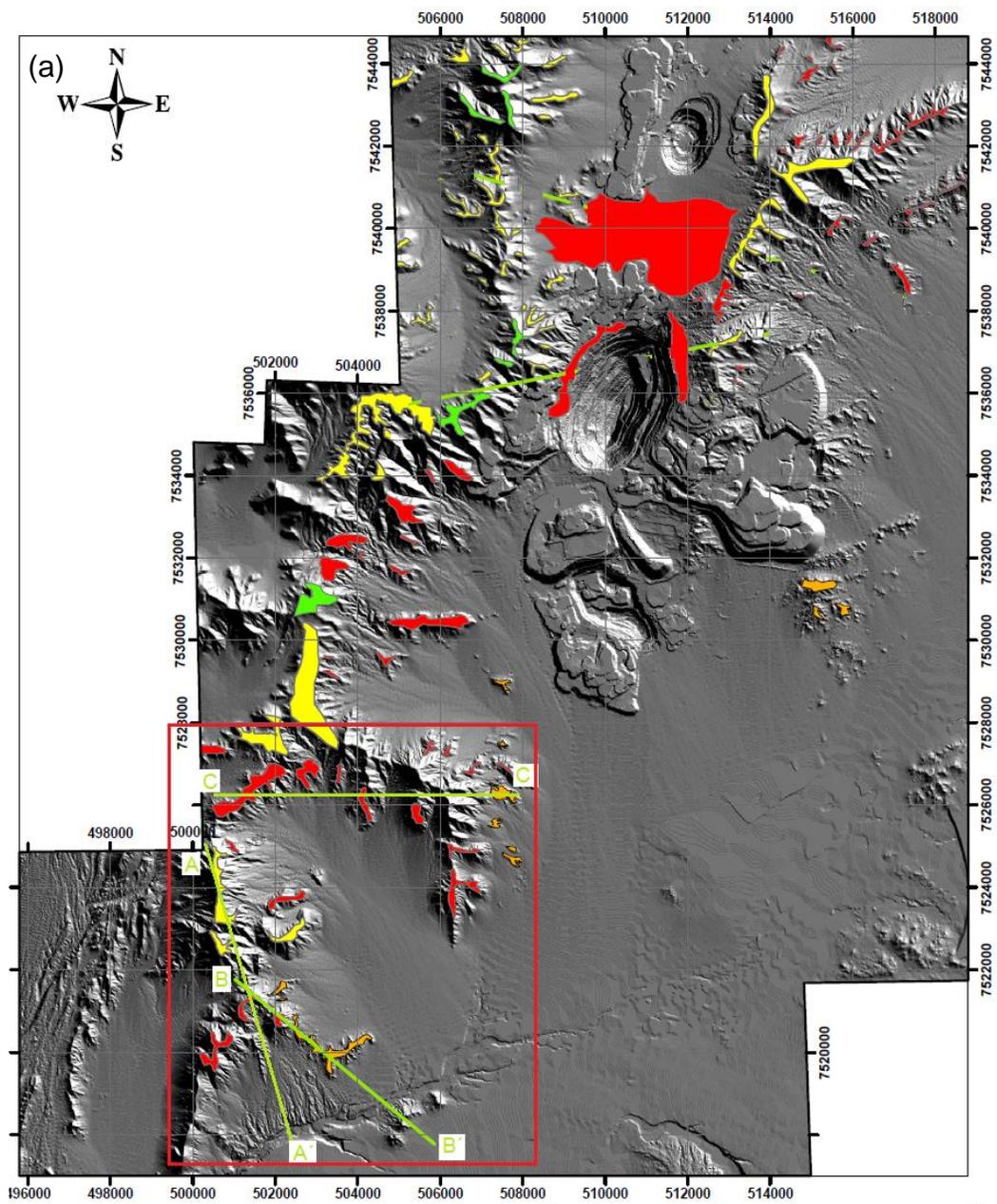
Un ejemplo de este tipo de relieve con dichas superficies es el que se encuentra en la Precordillera y sus zonas aledañas, en el Norte de Chile. Esta última es una de las principales unidades morfoestructurales del país y su configuración durante el Mioceno, luego de una serie de eventos tectónicos, llegó adoptar casi la misma fisiografía que se observa actualmente (Jordan y otros., 2006). Posteriormente, durante el Neógeno, su evolución geológica se caracterizó por una sucesión de eventos agradacionales y degradacionales controlados por factores tectónicos y climáticos. A los eventos

agradacionales se asocian la depositación de distintas series de gravas Neógenas (e.g. Gravas de Atacama, Sillitoe, 1968); a los eventos degradaciones se le asocian la formación de superficies de pedimentación (Figura 4) (Alpers y Brimhall,1988; Sillitoe y Mckee, 1996).

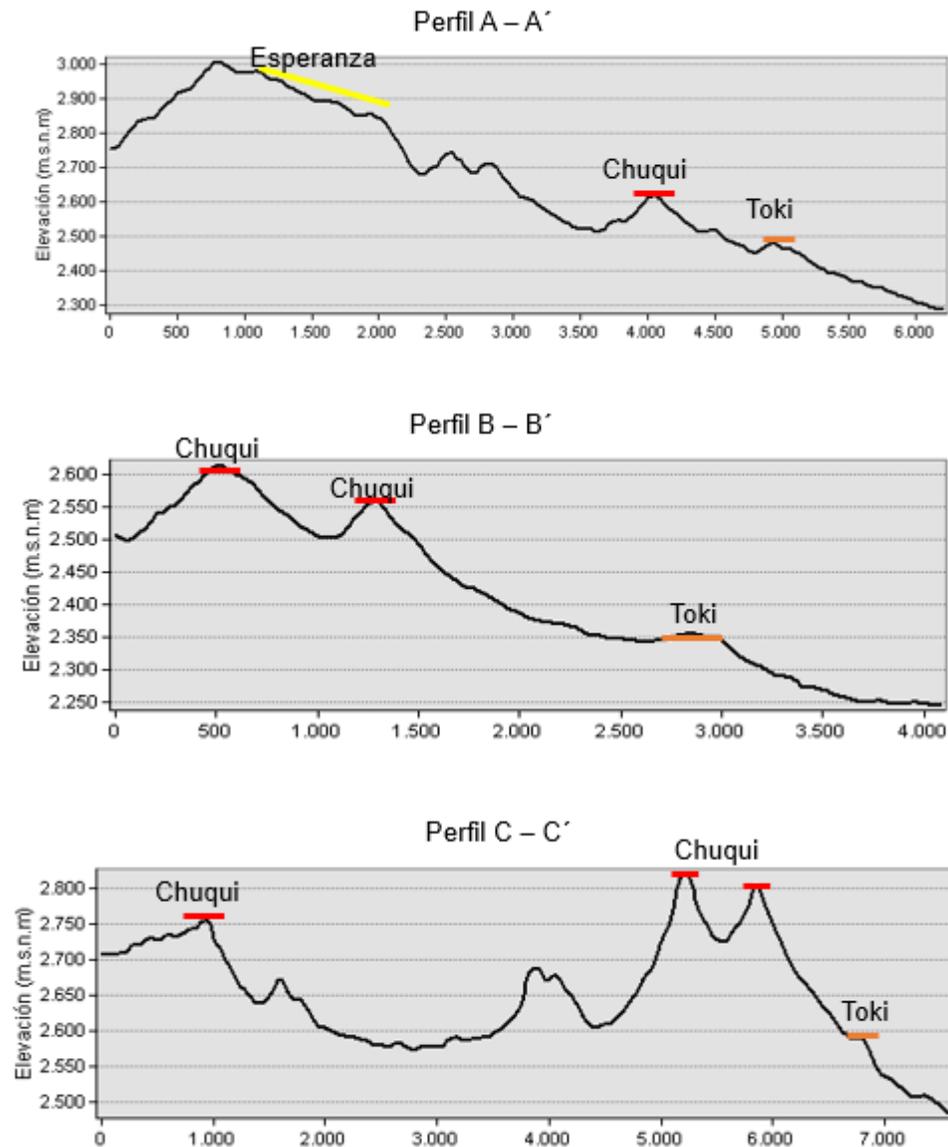


**Figura 4:** Imagen donde se muestran las unidades fisiográficas durante la pediplanización, degradación y acumulación de sedimentos. Las flechas negras del lado derecho de la imagen indican como va cambiando este frente de montaña debido a la erosión, disminuyendo la posición del frente topográfico (Flechas azules). El material producto de la erosión se va depositado en la cuenca sedimentaria, aumentando su espesor y área cubierta (flechas negras del lado izquierdo de la imagen).

Dentro de esta gran morfoestructura se encuentra el área de estudio del presente trabajo, ubicándose en el suroeste de una cuenca de mayor extensión denominada Cuenca Calama (Figura 5 (a)), que se compone por depósitos de relleno de edad Mioceno-Holoceno, rodeada por altos topográficos que superan los 3.000 m s.n.m. Este paisaje elevado ha sido y está siendo degradado e incluye relictos de superficies de erosión alzadas que se forman durante el proceso de pedimentación (polígonos de colores en Figura 5), sin presencia de fallas geológicas neógenas.



(b)



**Figura 5:** (a) Imagen realizada con base en un DEM donde se muestra la Cuenca de Calama y distintos pedimentos identificados. En el cuadro rojo se muestra la zona de estudio (b). Perfiles topográficos de las secciones mostradas en (a). Modificado de Tapia (2009).

Dentro del contexto regional donde se encuentra la zona de estudio, estos pedimentos corresponden a extensas superficies subplanares de bajo relieve, localizados en los piedemontes labrados sobre rocas mesozoicas-paleógenas (sustrato rocoso). Se ubican en un contexto geomorfológico de degradación de relieve elevado, en los cuales es posible distinguir distintas superficies que se han desarrollado sobre diferentes tipos litológicos y que debido a la ocurrencia de distintos eventos de pedimentación, se presentan de manera escalonada (Tapia, 2009; Figura 5 (b)). Es posible distinguir dentro del contexto regional cuatro niveles de pedimentos desarrollados sobre el

sustrato rocoso. Asumiendo un sistema degradacional, las porciones más altas de estas superficies engranan lateralmente con las superficies más antiguas y las más nuevas constituyen pedimentos parcialmente preservados, cubiertos por gravas y algunos con un desarrollo de suelo considerable.

A continuación se describirán estos cuatro niveles definidos por Tapia (2009) (Figura 5):

#### Superficie Antenas

Se ubica al oeste de la mina Chuquicamata. Se encuentra principalmente al norte, fuera del área de estudio a 3300 m s.n.m. aprox. Presenta un ancho promedio de 200 m y una inclinación de 2° al norte. Esta es la superficie más antigua y está disectada por drenajes este-oeste.

#### Superficie Esperanza

Ubicado en toda la zona de la Cuenca de Calama y principalmente al oeste del área de estudio a aprox. 3.000 m s.n.m. aprox., posee una inclinación 5° al norte. Los sectores más elevados están labrados sobre el sustrato rocoso, mientras que en los sectores topográficos más bajos están cubiertos por gravas que aumentan su espesor hacia el norte. Esta superficie presenta incisiones que drenan tanto norte como al sur con una pendiente máxima de 5° y 40° respectivamente, Por lo cual el nivel más alto de la superficie constituye una divisoria de aguas que diferencia dos cuencas hidrográficas con dos niveles de base diferentes. Posee alteración argílica con presencia de hematita y jarosita.

#### Superficie Chuqui

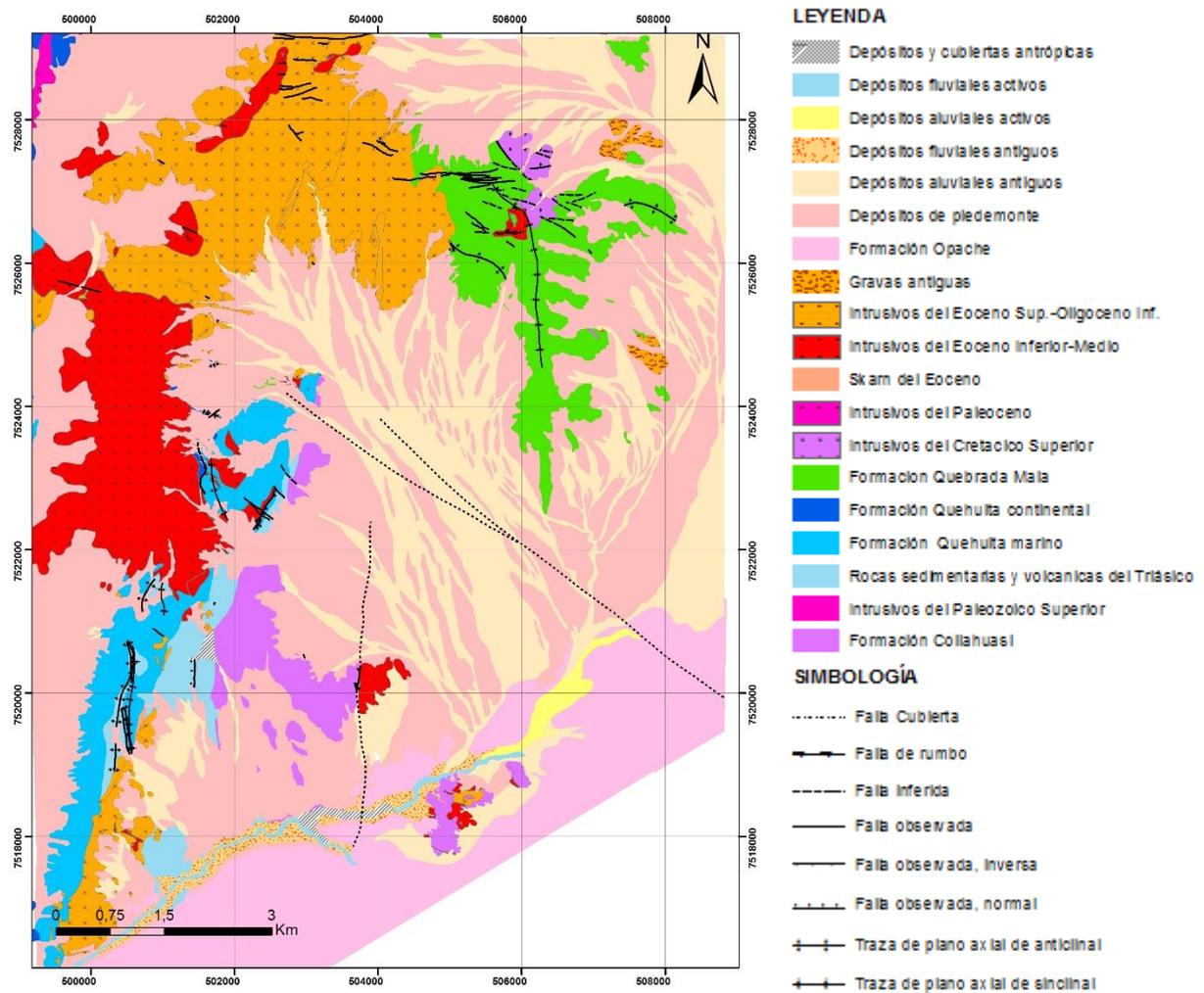
Se encuentra distribuida por toda el área de estudio entre unos 2.550 – 2.750 m s.n.m. aprox. Al sur, esta superficie tiene un ancho de 200 m, corona una serranía elongada en dirección norte-sur y se encuentra disectada por pequeñas quebradas este-oeste. Al norte de la zona de estudio forma una peniplanicie cubierta por depósitos de piedemonte que estuvo aislada de los procesos erosivos hasta que fue capturada por un sistema de drenaje noroeste-sureste, que corta los depósitos aluviales más nuevos. Asociada a esta superficie existe una zona de alteración argílica con hematita-jarosita y un suelo de sulfato antiguo.

## Superficie Toki

Se presenta en la parte sur y este del área de estudio, entre 2.600 y 2.400 m s.n.m. Al este, dicha superficie posee un ancho de 100 m con una inclinación de 5° al este y posee una forma elongada en dirección este-oeste que está disectada por pequeñas quebradas de dirección norte-sur. Esta labrada principalmente sobre andesitas afaníticas con alteración propilítica. Al sur de la zona la superficie corresponde a un pedimento con sus depósitos sedimentarios asociados aflorando más al sur.

## **2.2 GEOLOGÍA**

Las unidades geológicas expuestas en el área de estudio se pueden dividir en dos grupos de acuerdo con la presentación de este trabajo (Figura 6), el primero se compone de las unidades de roca que forman el sustrato o basamento del Mesozoico-Paleógeno (Intrusivos y las distintas formaciones), ubicado principalmente en los altos topográficos, y el segundo compuesto por el relleno del Mioceno-Holoceno (distintos depósitos y gravas), ubicado principalmente en la zona de cuenca. Dichas unidades se describirán a continuación de acuerdo con la revisión de la siguiente bibliografía principal (Tomlinson et al., 2001; 2010; Tomlinson y Blanco, 2010; García et al., 2009).



**Figura 6:** Mapa geológico de la zona de estudio escala 1:25.000 (García et al., 2009 y Tomlinson y Blanco 2010).

## 2.2.1 SUSTRATO MESOZOICO-PALEÓGENO

### Formación Collahuasi (Paleozoico Superior)

Esta formación fue definida y descrita por Vergara (1978), Vergara y Thomas (1984) y Tomlinson et al. (2001) y aflora al Norte de la ciudad de Calama lo que corresponde a la parte sur del área de estudio. Está constituida por una secuencia principalmente volcánica que consiste en lavas y brechas andesíticas de piroxeno y hornblenda porfídicas y afaníticas, lavas riolíticas de biotita con ojos de cuarzo y bandeamientos de flujo y tobas riolíticas. Además, existen intercalaciones de rocas sedimentarias continentales. También esta formación presenta de moderado a intensos grados de

alteración hidrotermal. Su edad fue asignada por abundantes dataciones que indican una edad del Carbonífero Superior-Pérmico Inferior (Tomlinson y Blanco, 2008; García et al., 2009).

#### Intrusivos del Paleozoico Superior

Incluye un conjunto amplio de rocas plutónicas e hipabisales que afloran en el NE de la zona. Fueron descritas en dos zonas con un mapeo 1:25.000. Esta unidad se compone de dioritas, monzodioritas, monzonitas, granodioritas, granitos y monzogranitos. Por otro lado, las rocas hipabisales están formadas por diques y cuerpos macizos irregulares de pórfidos monzodioríticos y dioríticos, pórfidos granodioríticos, graníticos, monzograníticos y sienograníticos y pórfidos andesíticos, dacíticos y riolíticos. En las rocas plutónicas existen varias dataciones K-Ar, Ar-Ar. y U-Pb, en el rango 270-330 Ma., i.e. del Carbonífero-Pérmico Inferior (Mpodozis et al., 1993; Tomlinson y Blanco, 2008).

#### Rocas sedimentarias y volcánicas del Triásico

Conjunto de rocas estratificadas ubicadas al SW del área de estudio. Esta unidad está compuesta por Estratos de Cerros De Chuquicamata y Estratos de Quetena (Tomlinson et al., 2001, 2010; Tomlinson y Blanco, 2008; García et al., 2009). El primero consiste en una secuencia volcánica y sedimentaria continental conformada por lavas y brechas andesíticas y niveles de conglomerados y areniscas volcanoclásticas. Se han datado rocas en los Cerros de Chuquicamata con edades U-Pb de ca. 232 Ma y K-Ar de ca. 218 Ma (Tomlinson y Blanco, 2008). Por otro lado, Los Estratos de Quetena están formados por una secuencia sedimentaria continental, mal estratificada de conglomerados y areniscas (Lira, 1989), que en el sector de la Mina Quetena han arrojado edades U-Pb de ca. 235 Ma (Tomlinson y Blanco, 2008).

#### Formación Quehuita (Jurásico Inferior – Cretácico inferior)

Secuencia sedimentaria definida por Vergara (1987a) y redefinida por Tomlinson et al. (2001) distribuida al lado oeste de la zona de estudio. Se divide en dos miembros, uno inferior marino formado principalmente por calizas, areniscas y lutitas calcáreas, bien estratificadas y uno superior transicional-continental compuesta por areniscas y limonitas, bien laminadas de composición cuarzo-feldespática y cuarcífera. Ambos

miembros se encuentran concordantes entre sí y en contacto progresivo-transicional. El miembro inferior se ha asignado al Hettangiano-Oxfordiano por la presencia de fósiles marinos, mientras que el superior se asigna al Kimmeridgiano-Cretácico Inferior debido a su posición estratigráfica (Mpodozis et al., 1993; Tomlinson et al., 2001, 2010; Garcia et al., 2009).

#### Formación Quebrada Mala (Cretácico Superior)

Unidad definida por Montaña (1976) ubicada al noreste del área compuesta por dos miembros. El miembro inferior está constituido por areniscas, brechas sedimentarias finas y conglomerados finos. El miembro superior está conformado por lavas andesíticas, dacíticas y riolítica, tobas andesíticas, dacíticas y riolíticas y tufitas andesíticas. Dataciones U-Pb en las rocas volcánicas indican edades de 72 a 66 Ma. (Tomlinson y Blanco, 2008, Tomlinson et al., 2001, 2010).

#### Intrusivos del Cretácico Superior

Conjunto de rocas plutónicas e hipabisales que afloran en la parte noreste de la zona de estudio. Las rocas plutónicas son de composición básica a intermedia y comprenden dioritas, monzodiorita, monzonitas y monzonitas cuarcíferas. Las rocas hipabisales están formadas por diques y cuerpos irregulares de pórfidos monzodioríticos, monzoníticos, granodioríticos, graníticos, andesíticos, dacíticos y riolíticos. Existen algunas dataciones de esta unidad con métodos de K-Ar y Ar con edades de 73 a 82 Ma. (Mpodozis et al., 1993), 65 a 68 Ma., y de 68 a 69 Ma. (Tomlinson y Blanco, 2008).

#### Intrusivos del Paleoceno

Corresponde a un complejo de rocas plutónicas e hipabisales, incluyendo brechas intrusivas e hidrotermales. Afloran en la parte noroeste del área. Las primeras corresponden principalmente a una monzonita-monzodiorita cuarcífera, mientras que las rocas hipabisales son pórfidos granodioríticos, monzoníticos cuarcíferos y pórfidos dacíticos, riolíticos y dacíticos. Uno de los plutones pertenecientes a esta unidad fue datado con Ar-Ar. indicando una edad de cristalización de 63-65 Ma (Tomlinson y Blanco, 2008).

### Intrusivos del Eoceno Inferior – Medio

Conjunto de rocas plutónicas e hipabisales distribuidas en toda el área de estudio. Las rocas plutónicas consisten en dioritas, monzodioritas, monzodioritas cuarcíferas y escasos granitos. Las rocas hipabisales corresponden a cuerpos irregulares de pórfidos dioríticos, monzodioríticos, monzoníticos cuarcíferos, andesíticos, dacíticos y escasamente riolíticos. Existen complejos intrusivos que han sido datados por varios métodos con edades comprendidas entre los 45 y 42 Ma, mientras que en otros cuerpos se han obtenido valores de 50 a 42 Ma. (Tomlinson et al., 2001; Tomlinson y Blanco, 2008).

### Intrusivos del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior

Rocas plutónicas e hipabisales dispersas en el área de estudio, pero principalmente ubicadas en su parte norte. Las primeras consisten en dioritas, monzodioritas cuarcíferas, granodioritas y granitos, y las segundas incluyen diques y cuerpos irregulares de pórfidos andesíticos y dacíticos. Se han realizado numerosas y variadas dataciones para esta unidad con edades de ca. 39-40 Ma, 37-39 Ma, 37-38 Ma, y 35-36 Ma (Dilles, 1999 y 2008; Tomlinson et al., 2001; Proffett y Dilles, 2007).

## **2.2.2 DEPÓSITOS DEL RELLENO MIOCENO–HOLOCENO**

### Gravas Antiguas (Mioceno Inferior – Mioceno Superior bajo)

Esta unidad consiste en gravas polimícticas con grado de consolidación moderado, clastos angulosos a subangulosos con un tamaño máximo de 40 cm y con matriz de arena fina a media. El espesor promedio en superficie es de 10m, pero ha sido reconocida en sondajes alcanzando hasta 150 m (c.a. Cluster Toki; Pardo y otros, 2004). Presentan un desarrollo de suelo de sulfato de hasta 5 m de espesor (Tapia, 2009). La edad asignada se debe a que engranan lateralmente con la Formación Jalquinche (Tomlinson y Blanco, 2008). Estas gravas subyacen a depósitos posteriores y sobreyacen a rocas del Mesozoico-Paleógeno descritas anteriormente.

### Depósitos de piedemonte (Mioceno Superior – Plioceno Superior)

Sedimentos polimícticos tamaño grava con matriz de arena de grano fino y limos de mala selección y pobre consolidación con intercalaciones de tobas de ceniza. Sobreyace en discordancia de erosión a las gravas antiguas, formando lentes de gran extensión y posee un suelo de sulfato de 2 m. de espesor. Su edad máxima es del Mioceno Superior, pues estos depósitos estarían dispuestos sobre la Ignimbrita Artola que posee una edad de  $10 \pm 0,4$  Ma (Tomlinson y Blanco, 2008; Rutland y otros, 1965; Tapia, 2009).

### Formación Opache (Mioceno Superior – Plioceno Superior)

Esta formación está expuesta en la mayor parte de la depresión de Calama. Corresponde a un conjunto de rocas principalmente carbonatadas como calizas palustres, calizas arenosas, areniscas y conglomerados calcáreos, travertinos y diatomeas. Engrana lateralmente con los Depósitos de piedemonte. Se le asignó una edad de c.a. 3 – 7 Ma. (May, 1997; May et al., 2005).

### Depósitos aluviales antiguos (Pleistoceno – Holoceno Medio)

Gravas polimícticas, arenas y limo mal seleccionados y no consolidados. Se encuentran en abanicos y paleocanales aluviales que disectan depósitos de piedemontes disponiéndose sobre ellos en discordancia de erosión (Tomlinson et al., 2010). Son cortados por drenajes aluviales activos y tiene un desarrollo de un suelo de sulfato nuevo de unos 50 cm de espesor (Tapia, 2009).

### Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno Superior – Holoceno Superior)

Gravas, arenas y limos y arcillas, alfombras orgánicas diatomeas y sínteres calcáreos, semiconsolidados y bien estratificados. Expuestos en terrazas cortados el curso de río actual en el sur de la zona de estudio (Tomlinson et al., 2010).

### Depósitos aluviales activos (Holoceno Superior)

Gravas y ripios polimícticos, arenas y limos no consolidados. Expuestos en el sur de la zona de estudio (Tomlinson et al., 2010).

### Depósitos fluviales activos (Holoceno Superior)

Gravas, arenas, limos, arcillas, alfombras orgánicas diatomeas y sínteres calcáreos. Expuestos en el sur de la zona de estudio (Tomlinson et al., 2010).

### Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno Superior)

Suelos de uso agrícola y depósitos de material estéril de las minas Chuquicamata y Quetena (Tomlinson et al., 2010).

## **2.3 CONTEXTO CLIMÁTICO**

EL desierto de Atacama, ubicado en el norte de Chile, es el más árido del mundo, y varios estudios concuerdan que las condiciones climáticas de hiper-aridez han predominado durante el Cenozoico tardío (Sillitoe y Mckee, 1996; Bouzari y Clark 2002; Hartley y Chong, 2002; Houston y Hartley 2003; Dunai et al., 2005; Quang et al, 2005; Arancibia et al., 2006; Kober et al., 2006, 2007; Rech et al., 2006; Evenstar et al., 2009). La condición de aridez es causada principalmente por varios factores, entre ellos está el efecto de sombra orográfica de las precipitaciones provenientes del Amazonas debido a la altitud de los Andes, la inversión térmica en la costa, ubicación geográfica, el agua fría de la corriente de Humbolt, la que previene las precipitaciones, intensificándose con la presencia de la Cordillera de los Andes y su alzamiento (Houston y Hartley, 2003; Lamb y Davis, 2003). Además, en el norte de Chile, estudios basados en isótopos cosmogénicos han revelado que algunas superficies expuestas apenas han sido afectadas por erosión desde hace 25 Ma (eg., Dunai et al., 2005).

El comienzo de este tipo de clima aún está en discusión y se asocia por un lado al tiempo del término de la actividad supérgena de la Precordillera que comenzó hace unos 35 Ma y se completó hace 14 Ma (Alpers y Brimhall, 1988; Sillitoe y McKee, 1996). Por otro lado, se dice que la hiperaridez comenzó hace 4 – 3 Ma, basado en el estudio del tipo y edad de los cambios en el aporte de sedimentos en la Depresión Central (Hartley y Chong, 2002). Además, estos autores exponen que la aridez de esta zona se le atribuye a la combinación de un enfriamiento climático global y a una mayor actividad de la Corriente de Humboldt producto del cierre del estrecho de América Central hace unos 3.5 Ma (Hartley, 2003). Existe otra propuesta al inicio de este tipo de clima que

propone que la hiperaridez comenzó durante el Oligoceno tardío y pudo haber sido el mayor contribuyente del alzamiento de los Andes por la baja tasa de erosión (Dunai et al., 2005). Finalmente existe una cuarta postura para el origen de este tipo de clima que se basa en el estudio de una transición de distintos tipos de suelo en estratos Miocenos de la cuenca de Calama que representan un cambio en las precipitaciones desde más de 200 mm/año a menos de 20 mm/año que ocurre antes de los 9.4 Ma. La interpretación que se le otorga a esto es que tomó lugar un gran cambio climático entre los 19 y 13 Ma como resultado de un alzamiento de los Andes. Asimismo, se plantea que la hiperaridez en la actualidad es mantenida por el efecto de sombra de las precipitaciones (Rech. et al., 2006).

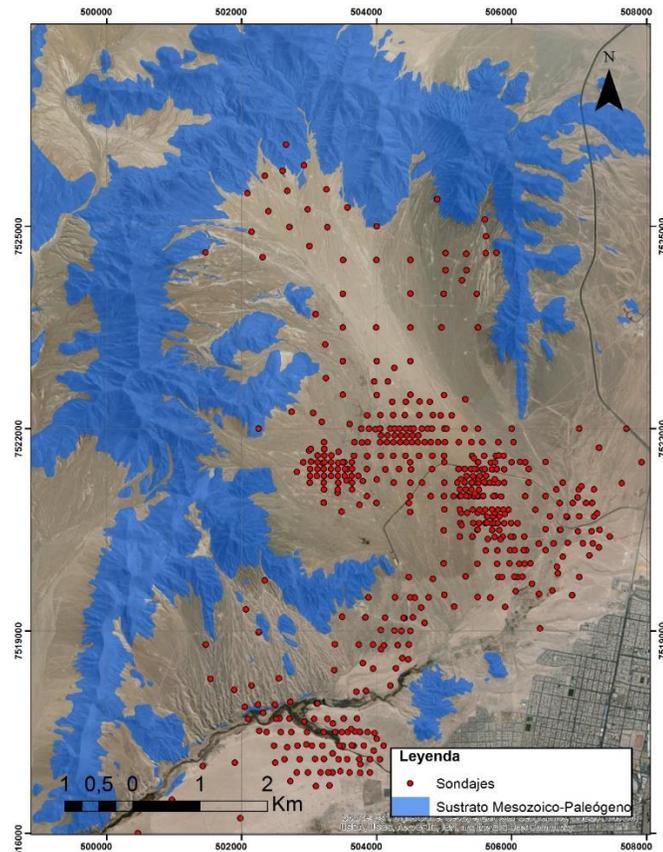
### 3. PROCESAMIENTO DE DATOS

Para obtener la información que dará origen a los resultados de este trabajo, se realizó una serie de etapas previas usando los softwares de ArcGIS y Google Earth, cuyos resultados son un conjunto de bases de datos, cada una compuesta por puntos georreferenciados ( $x, y, z$ ).

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para generar las bases de datos que se usaron. Primero se describen los datos de sondajes y luego, los datos de las superficies, tanto geomorfológicas como definidas por su rango de pendiente.

#### 3.1 SONDAJES

Se cuenta con la información de 495 sondajes, otorgada por CODELCO. Muchos de estos sondajes son inclinados y poseen profundidades máximas de 307 m para techo de roca (contacto entre el sustrato Mesozoico-Paleógeno y relleno Mioceno-Holoceno) y se encuentran distribuidos en la zona de cuenca (Figura 7).

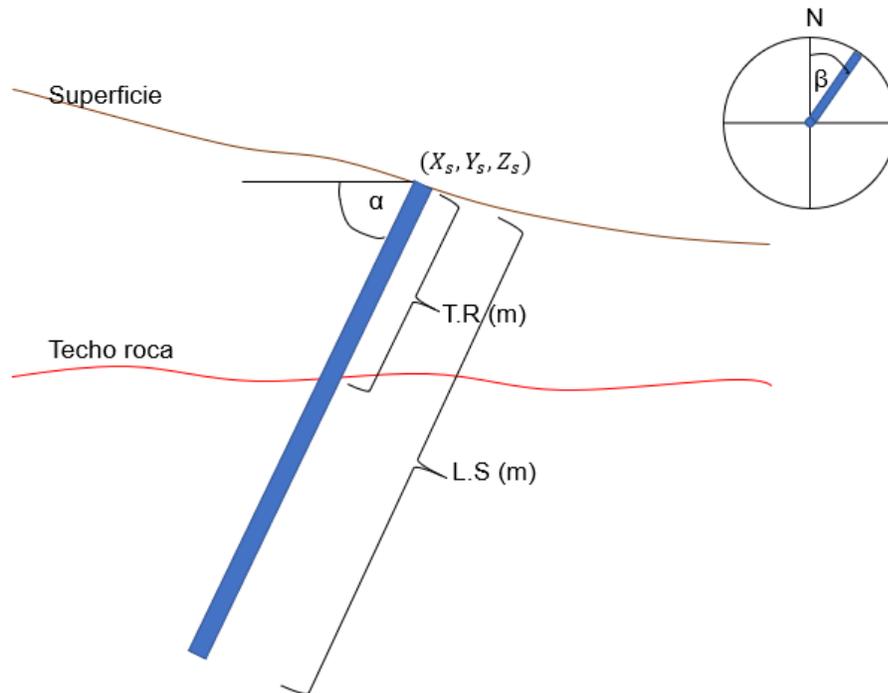


**Figura 7:** Mapa de la zona de estudio donde se muestra en azul el sustrato Mesozoico-Paleógeno y en puntos rojos ubicación de los sondajes.

La información de los sondajes cuenta con los siguientes datos (Figura 8):

- Coordenada Este y Norte en UTM del collar o punto donde se hizo la perforación ( $X_s, Y_s$ )
- Cota donde se realizó el sondaje (m.s.n.m.) ( $Z_s$ )
- Azimut (de 0 a 360°) ( $\beta$ )
- Inclinación del sondaje ( $\alpha$ )
- Largo del sondaje (L.S)
- Profundidad a la que se llegó al techo roca (T.R)

La tabla que contiene la información se traspasó a Excel, para luego realizar cálculos matemáticos trigonométricos con el fin de determinar la posición y profundidad del techo de roca a partir de la posición del collar, el azimut, la inclinación y la profundidad del techo de roca en el sondaje.



**Figura 8:** Representación gráfica de la información que contienen los sondajes, donde L.S: largo del sondaje (m), T.R: profundidad a la cual es sondaje llega al techo de la roca (m), ( $X_s, Y_s, Z_s$ ): coordenadas en UTM,  $Z_s$ : cota a la que se encuentra en sondaje (m.s.n.m.),  $\alpha$ : ángulo de inclinación del sondaje con respecto a la horizontal (grados °) y  $\beta$ : desviación con respecto al norte del sondaje (grados °).

Para comenzar se obtuvo la profundidad a la que se encuentra el techo roca (P), para esto se utilizó el valor de T.R y el ángulo  $\alpha$  (inclinación del sondaje) (Figura 9 (a)).

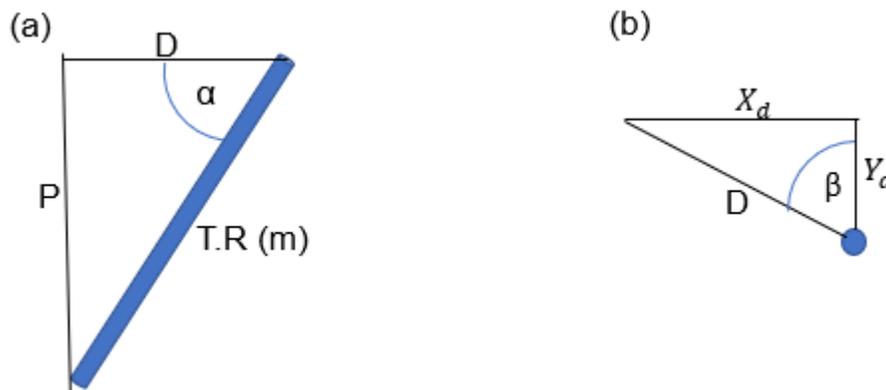
$$\text{Sen}(\alpha) = \frac{P}{L.R}$$

$$P = \text{Sen}(\alpha) \times L.R$$

Luego se calculó la distancia horizontal (D), de manera similar:

$$\text{Cos}(\alpha) = \frac{D}{L.R}$$

$$D = \text{Cos}(\alpha) \times L.R$$



**Figura 9:** Esquema que representa la geometría del sondaje en profundidad y en planta, (a) Sección vertical; (b) Proyección en planta.

Para conocer la posición del punto que se desea conocer, se utilizó el ángulo  $\beta$  y la distancia (D) (Figura 8 (b)) de la siguiente forma:

$$\text{Sen}(\beta) = \frac{X_d}{D} \qquad \text{Cos}(\beta) = \frac{Y_d}{D}$$

Siendo  $X_d$  y  $Y_d$  la distancia en planta al collar, en las coordenadas Este y Norte, respectivamente. Por lo tanto, para conocer la posición y altura real del punto de contacto ( $X_r, Y_r, Z_r$ ), se realizaron los siguientes cálculos:

$$Y_s \pm Y_d = Y_r$$

$$X_s \pm X_d = X_r$$

$$Z_s \pm P = Z_r$$

### **3.2 SUPERFICIES EN LA ZONA EXPUESTA**

Las superficies en la zona expuesta se desarrollan sobre el sustrato rocoso del Mesozoico-Paleógeno. Están definidas por puntos separados a una distancia de 30 m entre ellos, debido a la resolución del DEM utilizado. Dichos puntos se transformaron a una base con coordenadas  $(x, y, z)$ , siendo “ $x$ ” la coordenada este, “ $y$ ” la coordenada norte, ambas en UTM y “ $z$ ” corresponde al valor de la elevación con respecto al nivel del mar. En este trabajo se analizaron separadamente las superficies geomorfológicas o pediplanos, de las superficies definidas por distintos rangos de pendiente.

#### **3.2.1 SUPERFICIES GEOMORFOLÓGICAS O PEDIPLANOS**

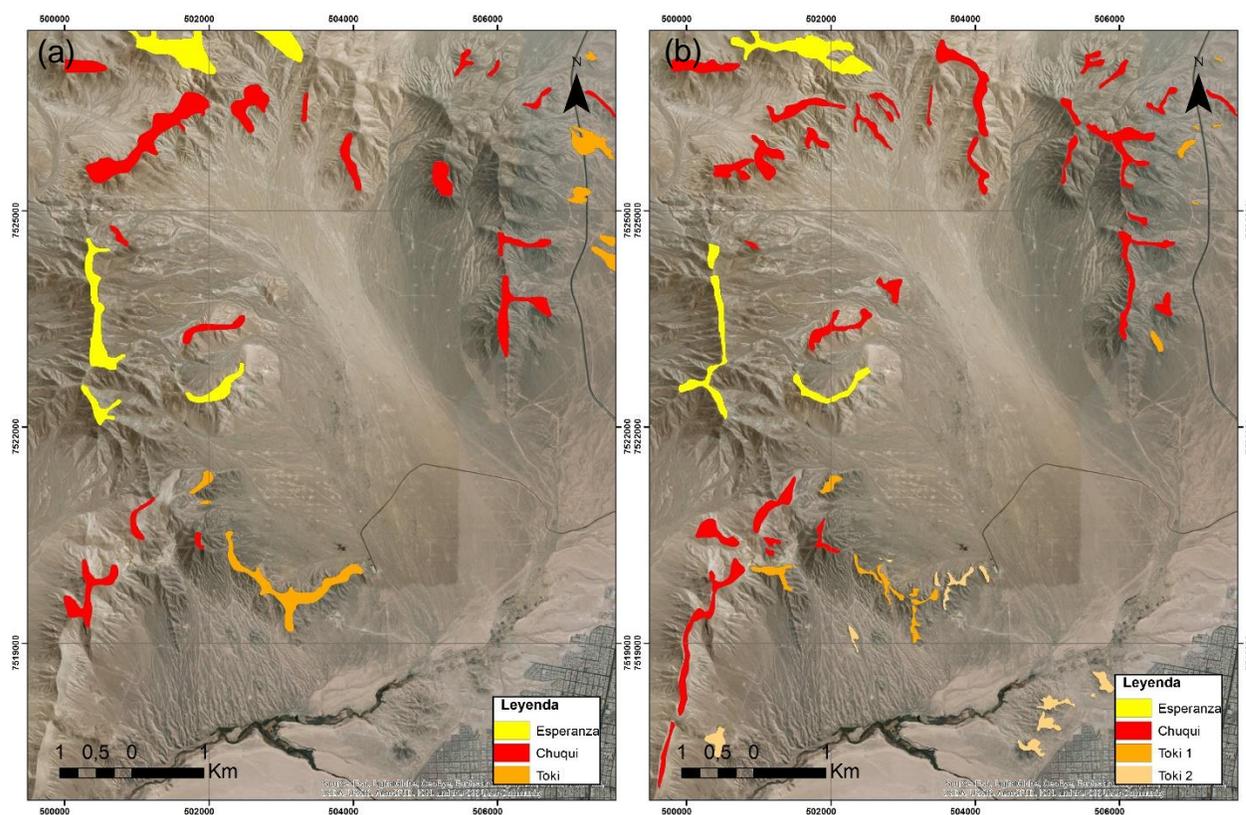
Basándose en la información entregada en el capítulo 2.1, estas superficies geomorfológicas de bajo relieve se identificaron mediante fotointerpretación utilizando el software Google Earth.

Como los pediplanos son superficies que se encuentran sobre el sustrato rocoso y apenas han sido afectadas por la erosión, su reconocimiento se basó en una serie de características que se debían cumplir. Por lo tanto, se fueron seleccionando las áreas, en forma de polígonos, que estén apenas afectados por incisión de canales y que posean baja pendiente ( $m \leq 20^\circ$ ). Estos polígonos que representan distintos niveles de pedimentos (Figura 10) se relacionaron con los de Tapia (2009) de acuerdo con su altura y ubicación, llegando a identificar superficies similares a Chuqui y Esperanza y llegando a determinar una más a partir de la división Toki, por lo tanto, se nombraron Toki 1 y Toki 2.

A pesar de que las geoformas reconocidas en el presente trabajo coincidan en su ubicación con las de Tapia (2009), existe una evidente diferencia en el área que cubren. Esto puede ser debido a la metodología utilizada y a la escala a la cual se realizó. Pues en el trabajo de Tapia (2009) se trabajó a una escala 1:25.000 para el mapeo geomorfológico además de visitas a terreno, mientras que en el presente trabajo no hubo un reconocimiento en terreno de estas geoformas, pero a pesar de eso, la escala que se utilizó para su identificación fue a 1:5.000, lo que permitió diferenciar la superficie Toki en dos. Por lo tanto, para precisar mejor su extensión, se realizó una

unión de las superficies mapeadas en este trabajo con la ya definidas por Tapia (2009) pues juntar un reconocimiento de estos pedimentos a una escala más detallada junto con un trabajo de terreno puede significar tener una mejor definición de estas superficies.

Los polígonos nuevos, posteriormente se interceptaron con el DEM y se obtuvieron nubes de puntos  $(x, y, z)$  con el mismo tamaño de celda que el DEM, es decir de 30 m x 30 m. Como se puede observar, las superficies geomorfológicas no cubren en su totalidad la zona expuesta, por lo que su base de datos de entrada podría no ser suficiente. La información tanto del área que cubren y el número de puntos que representa cada una de ellas se resume en la Tabla 1.



**Figura 10:** Mapa de la zona de estudio donde se muestra la distribución de las distintas superficies de bajo relieve. En la figura se muestran las superficies: (a) Definidas por Tapia (2009) mapeadas a escala 1:25.000; (b) Actualización de lo realizado por Tapia (2009) con un mapeo a escala 1:5.000.

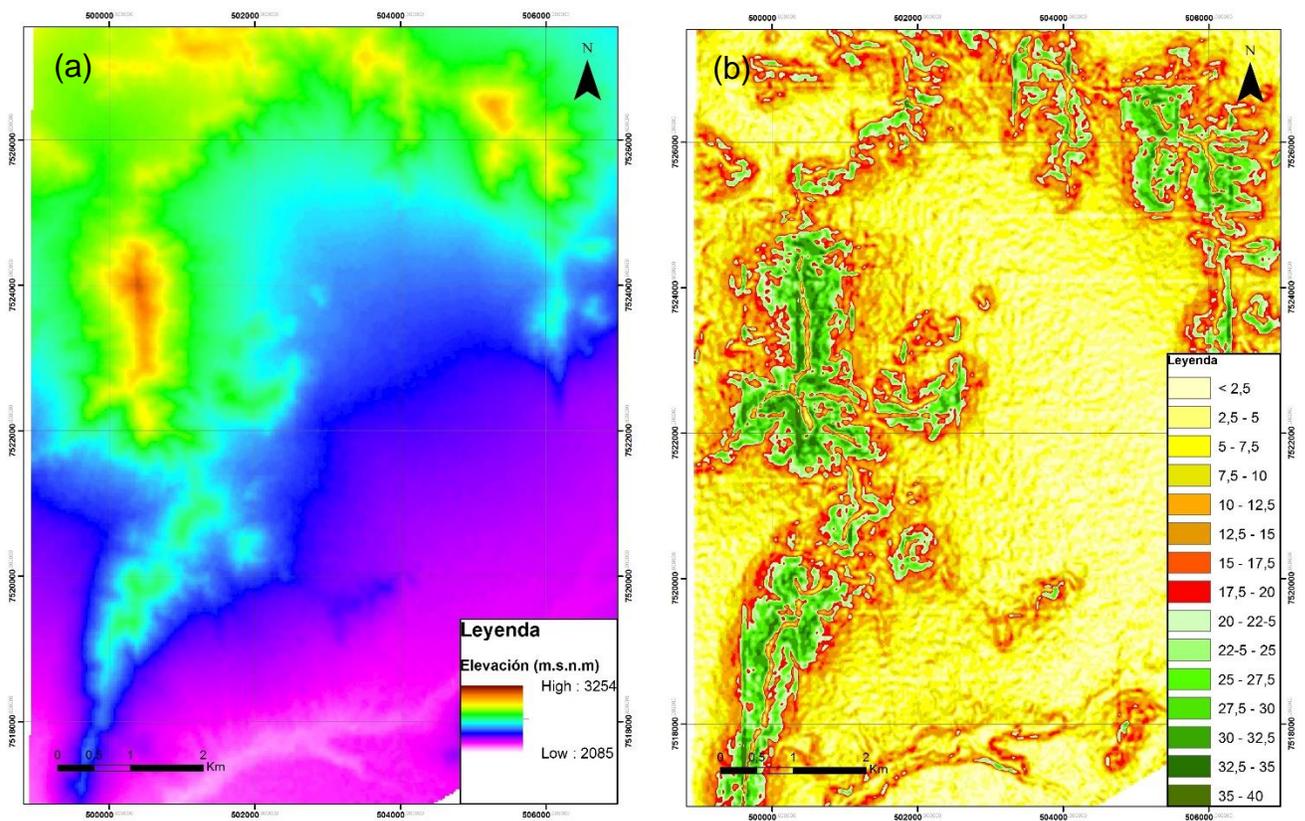
**Tabla 1:** Tabla que muestra el área total que cubre cada superficie, el porcentaje que cubre del área total de la zona de estudio y la cantidad total de puntos de entrada que contiene cada una.

| <b>Superficie</b> | <b>Área total (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Porcentaje que cubre del área total de la zona (%)</b> | <b>Porcentaje que cubre del área expuesta (%)</b> | <b>Cantidad de puntos</b> |
|-------------------|-----------------------------------|---|---|---------------------------|
| <b>Esperanza</b>  | 4,06 x 10 <sup>6</sup>            | 3,47  | 8,44  | 4516                      |
| <b>Chuqui</b>     | 4,30 x 10 <sup>6</sup>            | 3,67  | 8,94  | 4770                      |
| <b>Toki 1</b>     | 9,01 x 10 <sup>5</sup>            | 0,77  | 1,87  | 998                       |
| <b>Toki 2</b>     | 4,86 x 10 <sup>5</sup>            | 0,41  | 1,01  | 537                       |
| <b>Total</b>      | 9,75 x 10 <sup>5</sup>            | 8,33  | 20,26   | 10.821                    |

El área total de la zona de estudio cubre  $1,17 \times 10^8$  m<sup>2</sup> y la zona expuesta  $4,81 \times 10^7$  m<sup>2</sup>. Las cuatro superficies en conjunto cubren un 8,33% de toda el área y un 20,26% de la zona expuesta. Por lo tanto, a partir de la Tabla 1 y la Figura 10 se puede observar que las superficies que cubren una mayor área dentro de la zona son Chuqui y Esperanza, siendo estas dos un 85,75% del total que cubren las cuatro en conjunto, y la cantidad de puntos como base de entrada de todas las superficies es de 10.821 puntos.

### 3.2.2 SUPERFICIES SELECCIONADAS POR PENDIENTE

Otro criterio para definir la base de datos de entrada se generó a partir de una selección por pendientes del sustrato Mesozoico-Paleógeno. Es decir, en la zona expuesta se reconocieron superficies basándose en ese criterio de cada punto del mapa de pendiente generado a partir del DEM (Figura 11).



**Figura 11:** (a) DEM de la zona de estudio (b) Mapa de pendiente de la zona de estudio, en tonos amarillo-rojo se muestran las pendientes menores a  $20^\circ$  y en tonos verdes las mayores a  $20^\circ$ .

Se seleccionaron las distintas superficies de acuerdo con su rango de pendiente (m), en las siguientes familias:

- $m \leq 5^\circ$
- $5^\circ \leq m \leq 10^\circ$
- $m \leq 10^\circ$
- $10^\circ \leq m \leq 15^\circ$
- $m \leq 15^\circ$
- $15^\circ \leq m \leq 20^\circ$
- $m \leq 20^\circ$
- $20^\circ \leq m \leq 25^\circ$
- $m \leq 25^\circ$

- $25^\circ \leq m \leq 30^\circ$
- $m \leq 30^\circ$
- $30^\circ \leq m \leq 35^\circ$
- $m \leq 35^\circ$
- $35^\circ \leq m \leq 40^\circ$
- $m \leq 40^\circ$

El área que cubre cada una de estas familias de superficies clasificadas según pendiente con respecto al área total de la zona y la cantidad de puntos que cada una representa, se resume en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Tabla que muestra el área total que cubre cada superficie con cierta pendiente, el porcentaje que cubre del área total de la zona de estudio y la cantidad total de puntos de entrada que contiene cada una.

| <b>Pendiente</b>                      | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Porcentaje que cubre del área total de la zona (%)</b> | <b>Número de puntos</b> |
|---------------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------|
| <b><math>m \leq 5</math></b>          | $1,40 \times 10^6$          | 1,20  | 1.900                   |
| <b><math>5 \leq m \leq 10</math></b>  | $5,88 \times 10^6$          | 5,03  | 7.061                   |
| <b><math>m \leq 10</math></b>         | $7,53 \times 10^6$          | 6,44  | 8.961                   |
| <b><math>10 \leq m \leq 15</math></b> | $7,90 \times 10^6$          | 6,76  | 9.516                   |
| <b><math>m \leq 15</math></b>         | $1,61 \times 10^7$          | 13,76   | 18.477                  |
| <b><math>15 \leq m \leq 20</math></b> | $7,52 \times 10^6$          | 6,43  | 9.124                   |
| <b><math>m \leq 20</math></b>         | $2,43 \times 10^7$          | 20,80   | 27.601                  |
| <b><math>20 \leq m \leq 25</math></b> | $5,81 \times 10^6$          | 4,97  | 7.056                   |
| <b><math>m \leq 25</math></b>         | $2,78 \times 10^7$          | 23,76   | 34.657                  |
| <b><math>25 \leq m \leq 30</math></b> | $3,24 \times 10^6$          | 2,77  | 4.033                   |
| <b><math>m \leq 30</math></b>         | $3,07 \times 10^7$          | 26,24   | 40.737                  |
| <b><math>30 \leq m \leq 35</math></b> | $1,27 \times 10^6$          | 1,09  | 1.619                   |
| <b><math>m \leq 35</math></b>         | $3,56 \times 10^7$          | 30,44   | 42.356                  |
| <b><math>35 \leq m \leq 40</math></b> | $3,33 \times 10^5$          | 0,29  | 424                     |
| <b><math>m \leq 40</math></b>         | $3,59 \times 10^7$          | 30,73   | 42.780                  |

A pesar de que los ocho últimos rangos de pendiente no cumplen con las características morfométricas indicativas de superficies de bajo relieve, se consideraron en el estudio para observar su comportamiento al momento de realizar la interpolación -

extrapolación. Además, es posible observar en el mapa de pendientes que la zona no presenta laderas con valores que superen los 40° de inclinación y estas altas pendientes se ubican en las zonas con mayor elevación (Figura 11).

Para asegurar que las distintas familias de puntos según su rango de pendiente sean tomadas de la zona expuesta (sustrato mesozoico-paleógeno), se interceptaron los puntos con el polígono de dicha zona.

## **4. MODELADO DE SUPERFICIES**

Luego de tener los puntos georreferenciados con coordenadas  $(x, y, z)$ , para los sondeos y para las superficies geomorfológicas y aquellas definidas por diferentes rangos de pendiente, se procedió a generar diferentes superficies modeladas que estimaran la superficie cubierta. Para esto, se utilizaron distintos métodos de interpolación espacial.

### **4.1 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN**

La interpolación espacial es “un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio” (Bosque, 2000). Dentro de la caja de herramientas del software ArcGIS existen distintos métodos de interpolación que tienen como función crear una superficie continua de predicción a partir de puntos muestreados en el espacio, que en este caso corresponderían a los puntos georreferenciados de las superficies y los sondeos. Para lograrlo, cada uno de los métodos hace predicciones haciendo uso de distintas aplicaciones matemáticas, basándose en que los objetos están correlacionados espacialmente. En otras palabras, las cosas que están cerca tienden a tener características similares.

Estos métodos de interpolación se basan en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante (Maune et al, 2001). Algunos métodos asignan valores de posiciones basándose en los valores circundantes, como son los casos de IDW (ponderación con inverso de la distancia), Vecino Natural (VN) y Spline (SP). Por otro lado, existen métodos que están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación o la covarianza entre datos separados espacialmente. Estas técnicas no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza de las predicciones, como es el caso de Kriging (KG). A continuación, se describirán con mayor detalle cada uno de los métodos de interpolación recién mencionados.

#### 4.1.1 PONDERACIÓN DE DISTANCIA INVERSA (IDW)

Este método determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos. La ponderación es una función de la distancia inversa por lo que la superficie que se interpola debe ser la de una variable que sea dependiente de la ubicación, que en este caso es la altura (m.s.n.m.). Por lo tanto, mientras más cerca está un punto del lugar que se está estimando, mayor será su influencia o peso (Watson y Philip, 1985). Su definición formal según O'Sullivan y Unwin (2003) es:

$$z_c = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n p_m \cdot z_m$$

Donde:

- $z_c$  es la elevación calculada para cierto punto que se esta buscando
- $n$  es la cantidad de muestras utilizadas
- $z_m$  es la elevación de cada muestra
- $p_m$  es el peso o influencia de cada muestra con valores que van entre 0 y 1 y corresponde al inverso de la distancia entre la posición de del punto que se está buscando y la muestra asociada.

#### 4.1.2 SPLINE

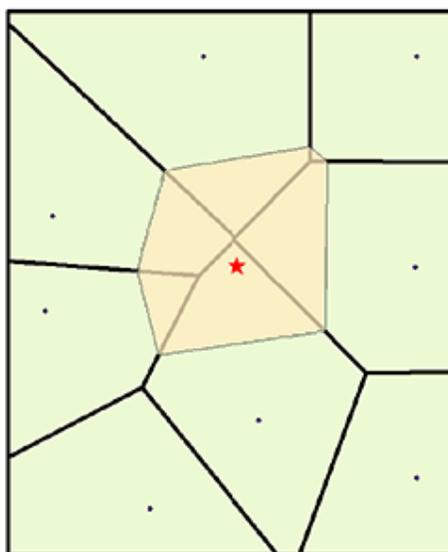
Este método estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie interpolada, resultando ser suave y que pasa exactamente por los puntos de entrada. En otras palabras, Spline curva un plano que pasa a través de los puntos de entrada, minimizando su curvatura total. Para esto ajusta una función matemática a una cantidad específica de puntos de entrada cercanos mientras pasa por ellos (Franke, R. 1982; Mitas y Mitasova. 1988).

Este método se utiliza idealmente para superficies que varían levemente como concentraciones de contaminación o como en este caso, la elevación o altura con respecto al nivel del mar.

### 4.1.3 VECINO NATURAL

Este método busca un subconjunto de muestras de entrada más cercanos al punto de consulta y aplica ponderaciones, en este caso de su elevación, basándose en áreas proporcionales para determinar el valor (Sibson, 1981). Utiliza solo un subconjunto de muestras que rodean al punto de consulta, por lo tanto, es más local que los métodos anteriores y las alturas obtenidas se encuentran dentro del rango de los valores de los puntos de entrada. De esta manera, no produce una superficie suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de los puntos de entrada porque pasa exactamente por ellos (Watson., 1992).

Como se mencionó recientemente, se utilizan áreas para las ponderaciones que están asociados con los polígonos de Voronoi que se encuentran adyacentes al punto que se desea conocer.



**Figura 12:** Ejemplo de polígono de Voronoi creado alrededor del punto que se desea interpolar.

El método consiste en la construcción de diagramas de Voronoi para todos los puntos que se les desea calcular su elevación (esto se mostrará con un ejemplo para un solo punto en la Figura 12). Para esto se crean distintos polígonos (en color verde) en un sector cercano al punto que se desea interpolar (estrella roja), luego se crea un nuevo polígono (color rojizo) alrededor de él, donde la proporción de superposición entre este nuevo polígono y los iniciales se utiliza como ponderaciones basadas en el porcentaje de superposición. En contraste con los otros métodos en que la influencia sobre el

punto interpolado se basa en la distancia, es decir, 2 puntos que se encuentran a una misma distancia tendrán el mismo peso sobre él, este método podría tener una ponderación totalmente distinta pues se basa en las áreas creadas a partir de los polígonos.

#### 4.1.4 KRIGING

Este método está basado en modelos estadísticos que contiene una relación estadística entre los puntos medidos. Por lo tanto, no solo se entrega una superficie de predicción, sino que también otorga una medida de certeza.

Por consiguiente, este modo de interpolación supone que la distancia o dirección entre los puntos de entrada poseen una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie, por lo tanto, esta herramienta ajusta una función matemática a estos puntos para poder determinar el valor que se quiere obtener en cada ubicación. Por ende, para llevar a cabo este método hay que seguir varios pasos comenzando con análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas y finalmente la creación de la superficie. En consecuencia, el método de Kriging es más adecuado cuando se conoce si existe alguna influencia direccional o alguna correlación espacial de los datos (Oliver., 1990).

La fórmula de este método de interpolación es similar al IDW pues pondera los valores medidos para calcular una predicción y consiste en la siguiente:

$$z_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_m$$

Donde:

- $z_c$  es la elevación calculada para cierto punto que se esta buscando
- $n$  es la cantidad de valores medidos
- $z_m$  es la elevación de cada muestra en la ubicación  $i$
- $\lambda_i$  es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$

A diferencia del método IDW en que la influencia de cierto punto de entrada sobre el que se quiere determinar mediante la interpolación depende solo de la distancia entre ellos, el método de Kriging además se basa en la disposición espacial general de los puntos medidos, estos dos parámetros (distancia a la ubicación de predicción y relaciones espaciales) son representados por el factor  $\lambda_i$  en la ecuación, por lo tanto, esta ponderación depende de un modelo ajustado a los puntos medidos. Existen diferentes tipos de métodos basados en Kriging. Un primer método, es cuando se conoce de antemano la media de los valores que se desea estimar (Kriging Simple), y otro es cuando esta media es desconocida inicialmente (Kriging Ordinario), lo cual origina diferentes expresiones para el cálculo de los pesos  $\lambda_i$ . Una variante más compleja, se tiene cuando se incorpora una tendencia (ej. lineal, cuadrática, etc.) en los datos a estimar, dando origen al método de Kriging Universal.

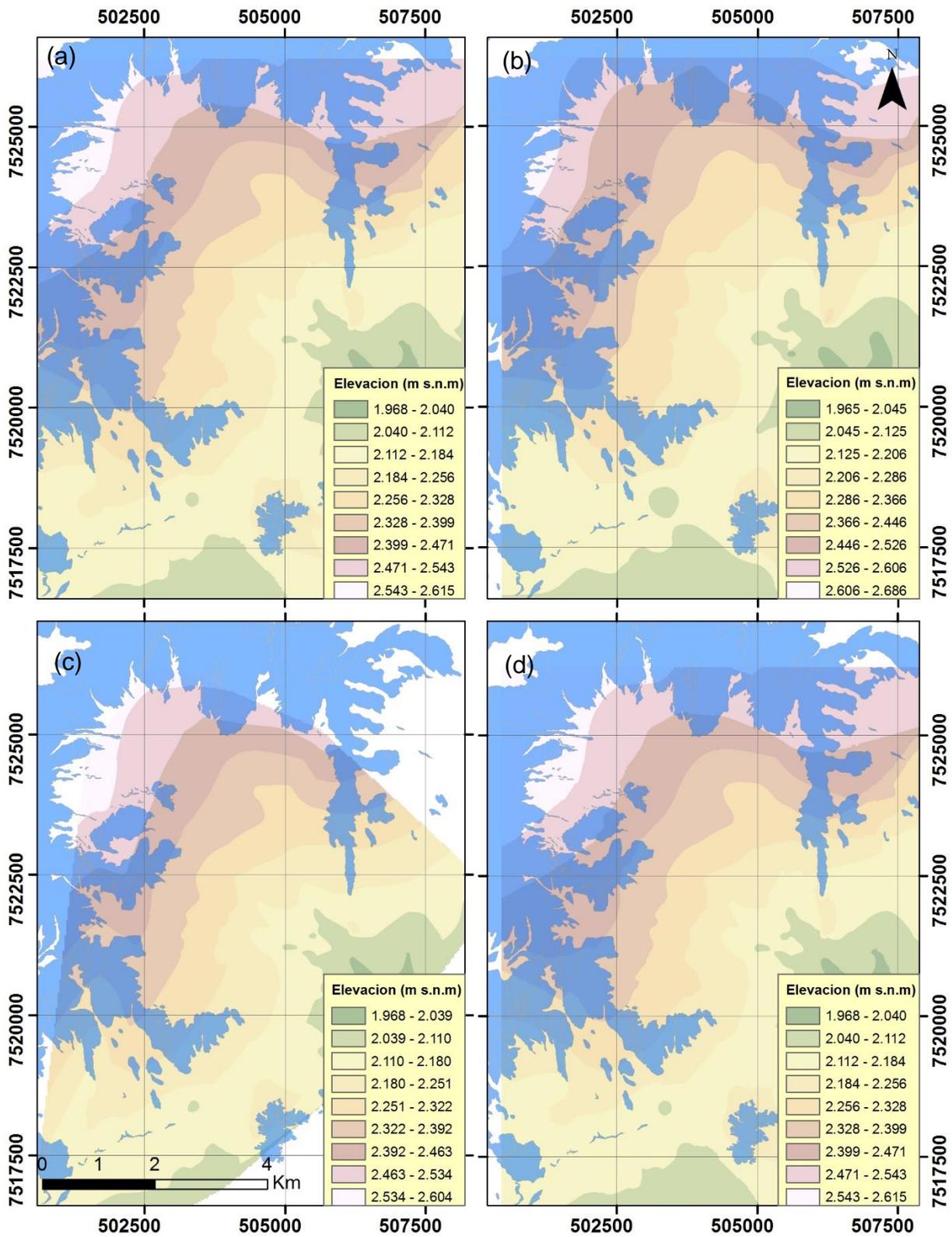
## **4.2 RESULTADOS**

Como se mencionó en el capítulo 3 (procesamiento de datos), los sondeos aportan la información real del contacto entre el sustrato mesozoico-paleógeno y el relleno mioceno-holoceno en la zona cubierta. Usando esa información y el algoritmo computacional en lenguaje Python se calculó el error existente a cada una de las diferentes superficies modeladas que fueron construidas solo con los datos de la zona expuesta (datos de entrada) realizando una interpolación-extrapolación hacia la zona cubierta (en base a los métodos descritos en la Sección 4.1). Estas superficies modeladas fueron construidas usando dos fuentes de información para los datos de entrada, una de ellas fueron los pedimentos y otra las superficies con distintas pendientes.

#### **4.2.1 VARIABILIDAD DE LA SUPERFICIE CUBIERTA: SONDAJES**

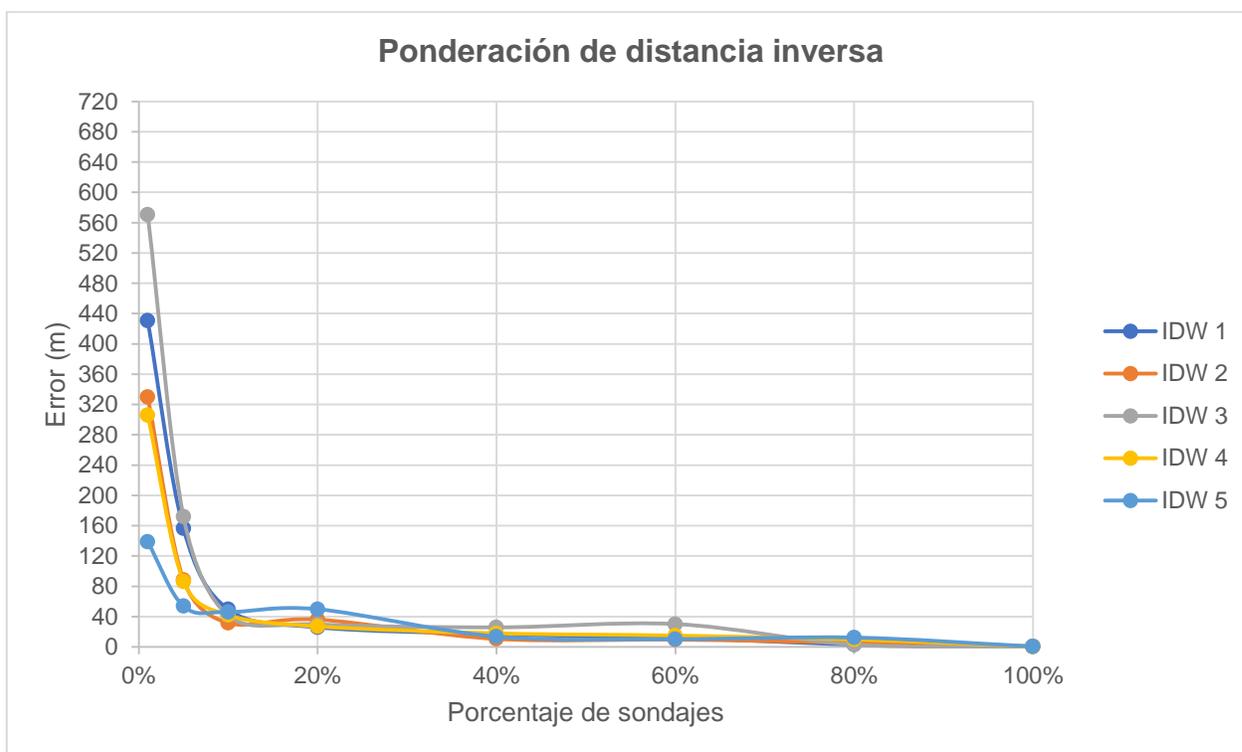
Como se quiere probar una técnica predictiva, donde se conoce el resultado al que se quiere llegar (contacto real entregado por los datos de salida: sondajes) es necesario conocer como es esta realidad. Por lo tanto, para saber la disposición y rugosidad de la superficie cubierta del contacto roca-grava (en el área de cuenca) de los sondajes e interpolaciones con los cuatro métodos indicados (Figura 13).

De la Figura 13 se puede observar que con los cuatro métodos se sigue la misma tendencia de una disminución de la elevación hacia la cuenca de manera gradual y casi con los mismos rangos de elevación en las mismas zonas. Poseen un valor mínimo de 1.965 – 1.968 m s.n.m. con todos los métodos y un máximo de 2.686 m s.n.m. para el caso de Spline y 2.604-2.615 m s.n.m. para el resto. Estas pequeñas diferencias de elevación se deben a los distintos cálculos matemáticos en que se basa cada uno de los métodos.

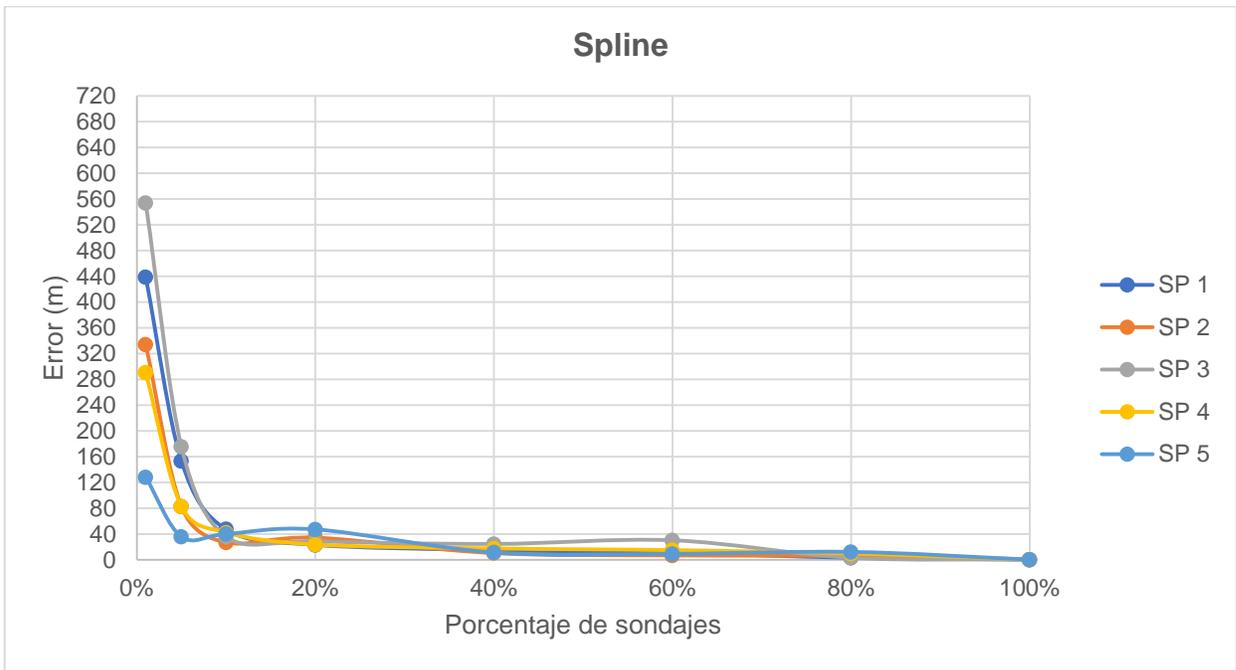


**Figura 13:** Interpolación de la superficie cubierta (contacto real) a partir de la información de sondajes con los cuatro métodos (a) IDW, (b) Spline, (c) Vecino Natural y (d) Kriging.

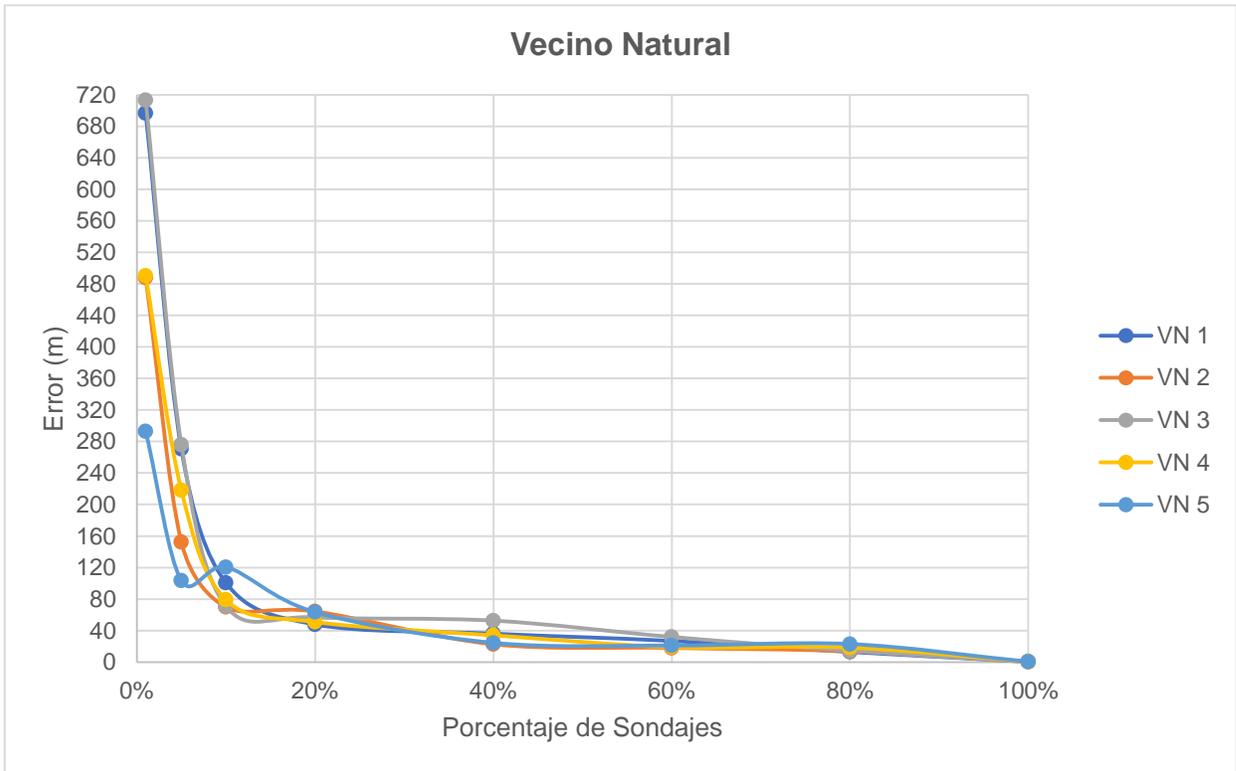
Para saber el método que define mejor la superficie, se fue eliminando información de sondajes, de manera aleatoria, y calculando el error respecto al 100% de datos en la zona cubierta. Por esta razón, para observar el comportamiento de los datos, se crearon distintos gráficos de dispersión (Figura 14, 15, 16 y 17) donde se muestra el error (MAE) con los cuatro métodos con cinco grupos aleatorios a medida que aumenta la cantidad de información de sondajes utilizados para la interpolación.



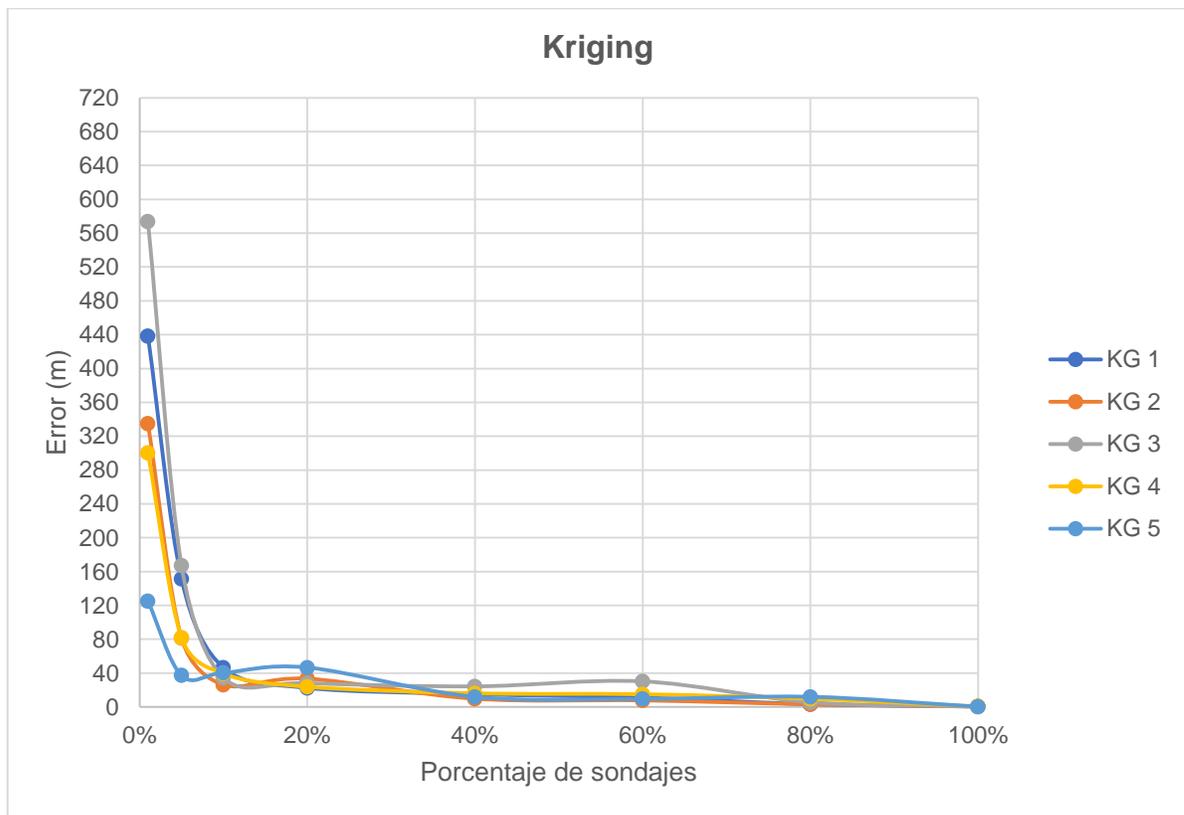
**Figura 14:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método de Ponderación de distancia inversa (IDW). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 15:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método de Spline (SP). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 16:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método de Vecino Natural (VN). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 17:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios con el método Kriging (KG). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).

Para los cuatro métodos y los cinco grupos aleatorios considerados se puede observar que las curvas de error presentan un quiebre abrupto en el valor cercano al 10% de los datos (Figuras 14, 15, 16 y 17). Es decir, cuando se elige entre 10 y 100% de datos, el MAE es relativamente bajo, mientras que cuando se elige entre 1 y 10%, el MAE es relativamente alto. En efecto, con 10 a 100% de la información, el error es menor a 46 m con el método de IDW, menor a 40 m con el método Spline, menor a 121 m con Vecino Natural y menor a 40 m con Kriging. Por el contrario, con un 1% de datos, el MAE va de 138 a 570 m, 128 a 564 m, 293 a 713 m y 124 a 573 m con los métodos de IDW, Spline, Vecino natural y Kriging, respectivamente. Y con un 5%, va de 53 a 172 m para IDW, 36 a 175 m para Spline, 103 a 276 m para Vecino natural y 37 a 167 m para Kriging.

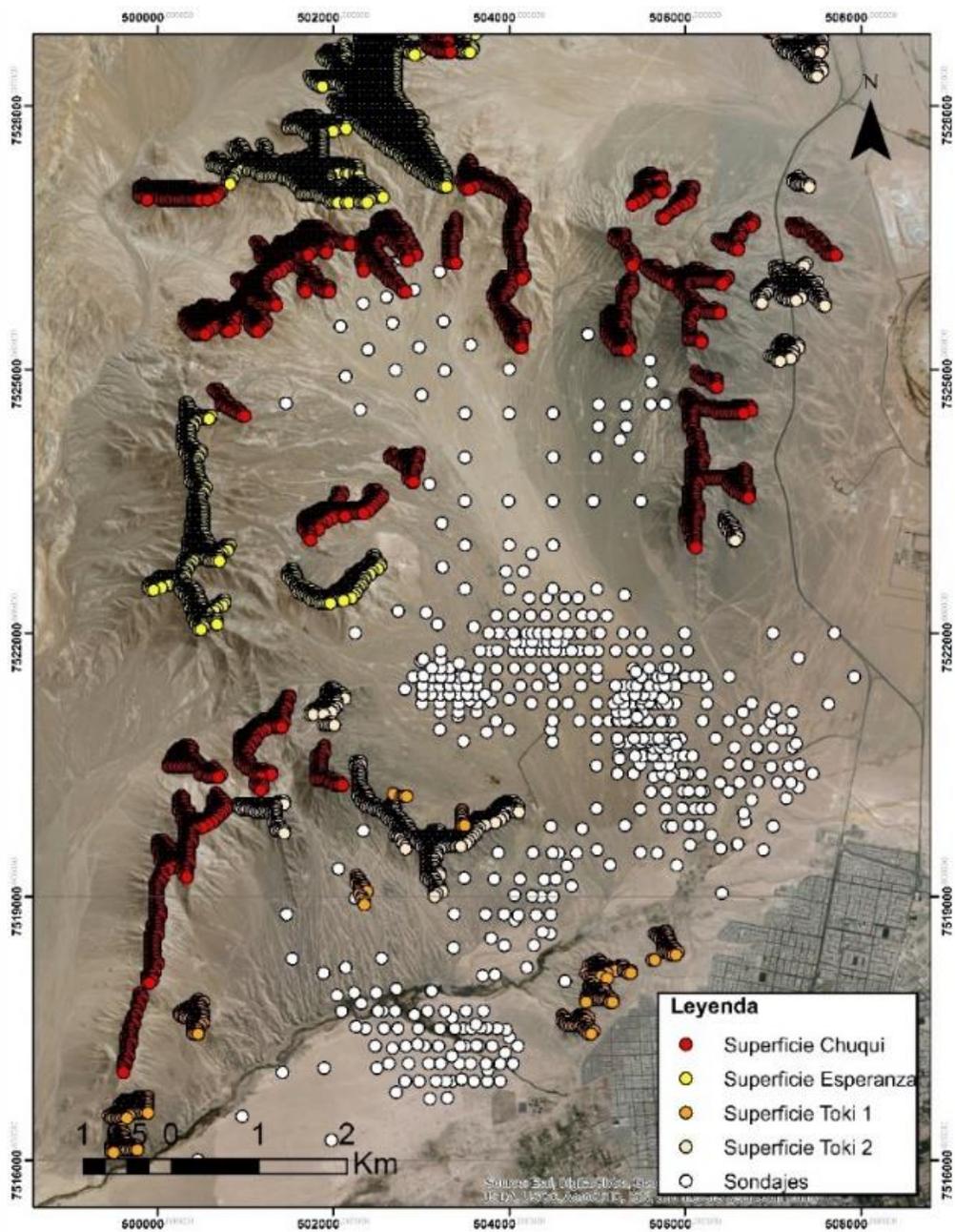
Por otro lado, esto sugiere que con más de un 10% de los datos de sondajes, la superficie cubierta quedaría relativamente bien definida, es decir, no sería necesario contar con más información para modelarla. Además, estos cuatro gráficos (Figuras 14, 15, 16 y 17) muestran que no existe algún método donde el error sea

considerablemente menor, pues todas las curvas se comportan de forma similar. A pesar de esto, si existe un método que posee un mayor error y variabilidad con un bajo porcentaje que es el método de Vecino natural.

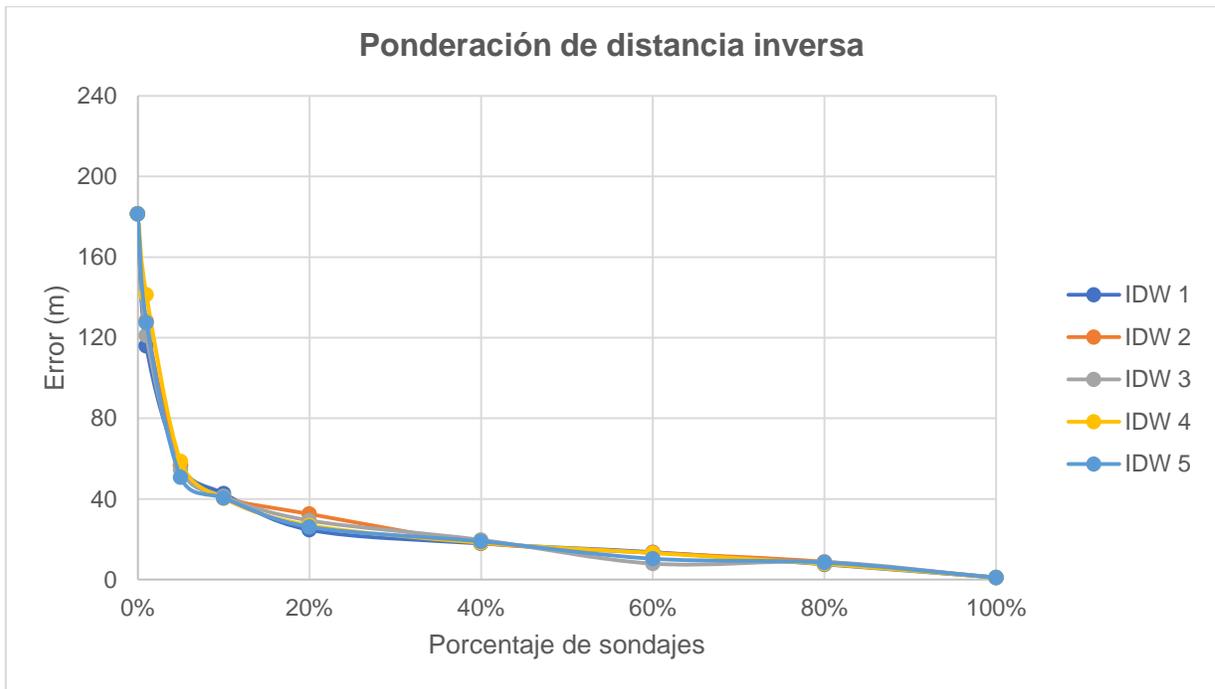
#### **4.2.2 MODELADO DE SUPERFICIES GEOMORFOLÓGICAS**

En el subcapítulo 3.1.2, se expuso que las superficies geomorfológicas también se representaron como una base de puntos con coordenadas  $(x, y, z)$ , las cuales fueron utilizadas para modelar el contacto en la zona cubierta. Para esto, se utilizó la unión de las superficies geomorfológicas (o pediplanos) consolidadas en este trabajo (Figura 18) y se calculó el error medio absoluto (MAE) asociado a cada una de las superficies interpoladas-extrapoladas con los distintos métodos (Figura 19, 20, 21 y 22).

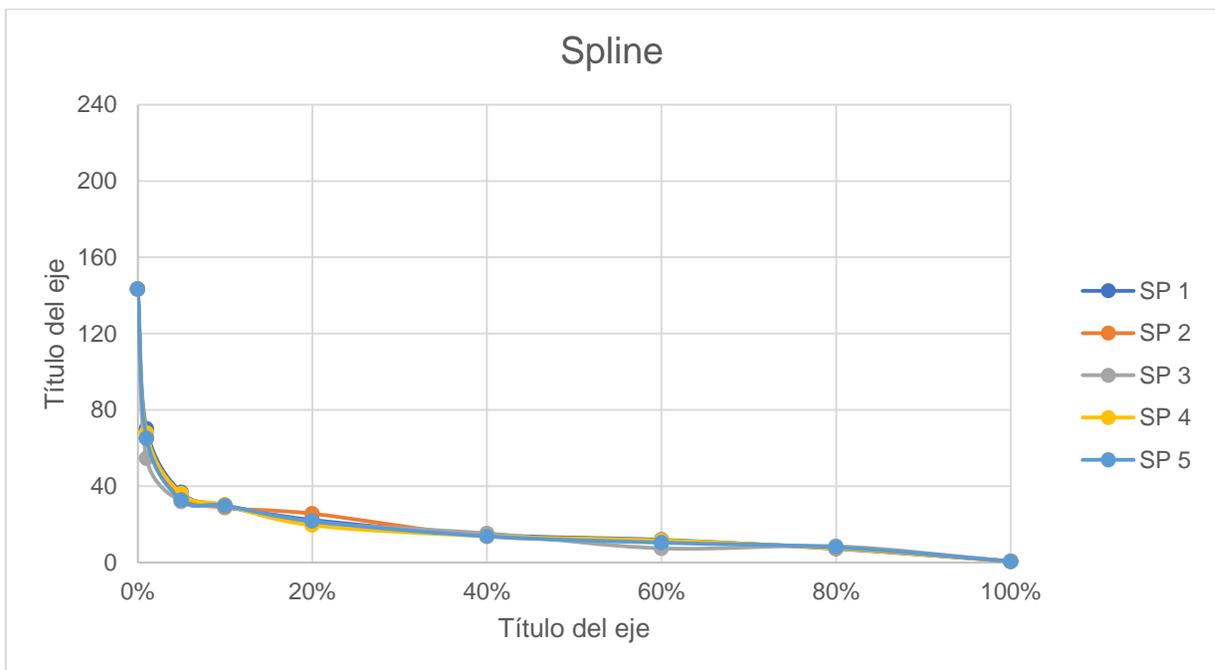
Asimismo, se realizó un experimento similar al anterior pero esta vez se hizo un análisis en conjunto de los datos de entrada y salida (superficies geomorfológicas y sondajes). Esto último se hizo para estudiar el efecto de los datos de la superficie expuesta o geomorfológica sobre la cubierta principalmente cuando hay pocos sondajes, menor o igual a un 10%, pues bajo este porcentaje existe un error considerable al realizar la interpolación en el subcapítulo anterior.



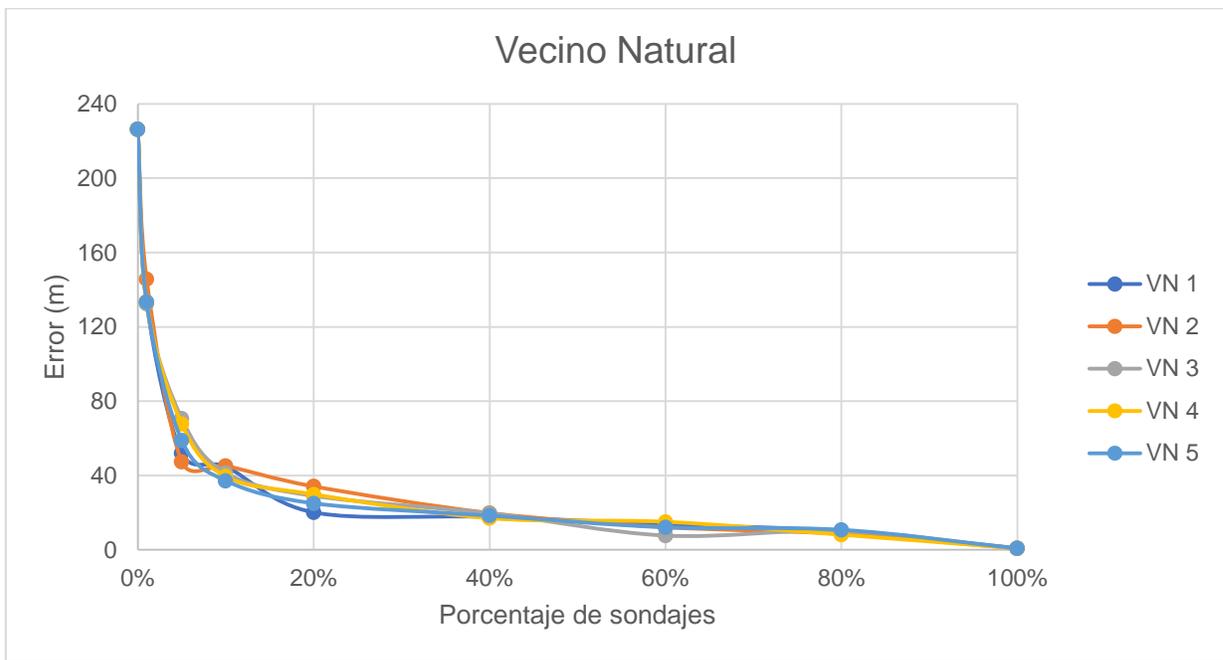
**Figura 18:** Imagen que representa la base de datos de las superficies geomorfológicas (puntos de colores) más los sondajes (puntos blancos).



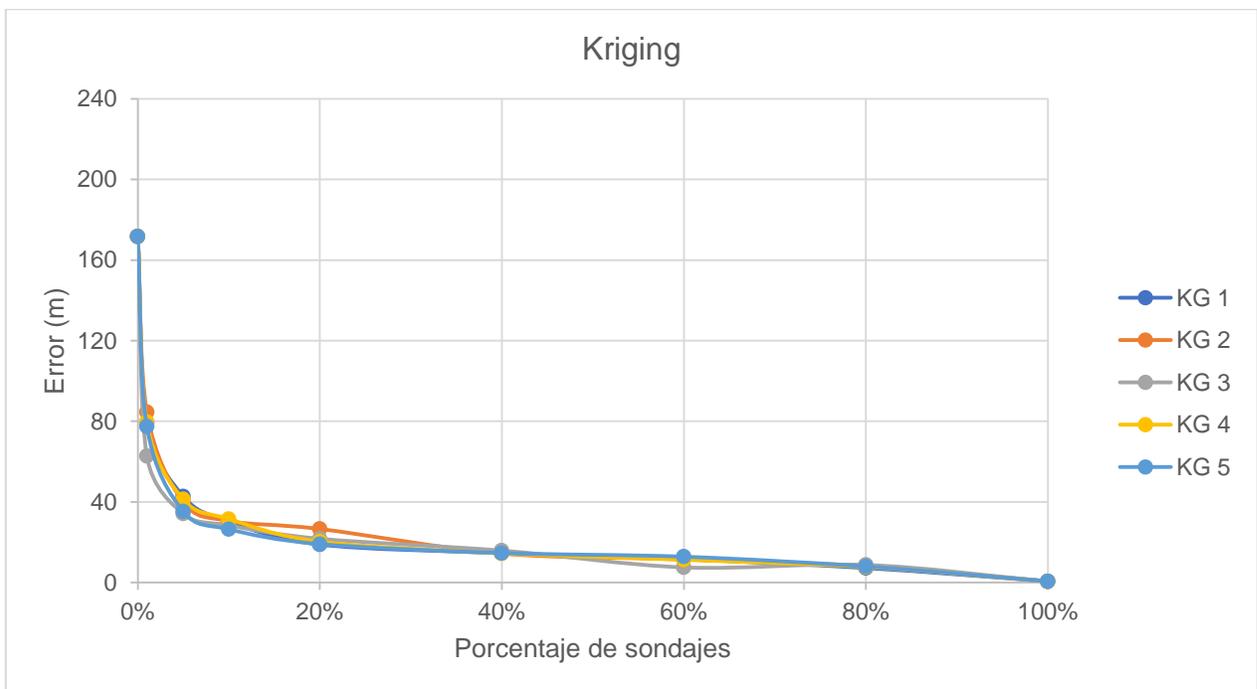
**Figura 19:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Ponderación de distancia inversa (IDW). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 20:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Spline (SP). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 21:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Vecino Natural (VN). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 22:** Gráfico que representa el error asociado a cada una de las superficies interpoladas con distintos grupos aleatorios de sondaje junto con los datos de entrada de las superficies geomorfológicas con el método de Kriging(KG). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).

Los gráficos de las Figuras 19, 20, 21 y 22 muestran que el MAE obtenido de la extrapolación de las superficies geomorfológicas (el valor que corresponde a un 0% de sondajes) es 182, 143, 226 y 172 m con los métodos de IDW, Spline, Vecino Natural y Kriging respectivamente. Estos valores son similares e incluso en algunos casos menores que utilizando solo la información de los sondajes.

Al utilizar en conjunto los datos de entrada y salida, los gráficos muestran que tanto la variabilidad como el error disminuye drásticamente. Obteniéndose el menor MAE con el método de Spline y el mayor con Vecino Natural.

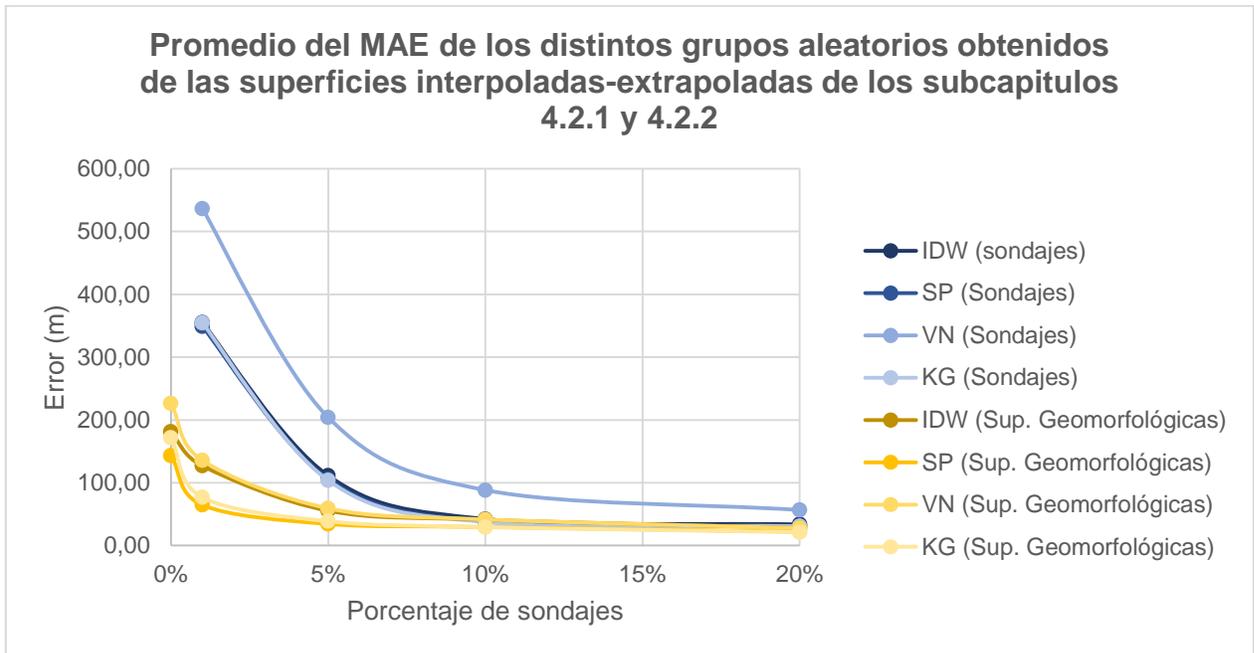
Para observar mejor la variabilidad del MAE de una superficie modelada con una misma cantidad de información, es decir mismo porcentaje, pero con distintos grupos aleatorios, se generó una tabla para ambos casos, solo sondajes y superficies geomorfológicas más sondajes donde se muestra la desviación estándar del MAE mostrado en los gráficos de las Figuras 14, 16, 16, 17, 19, 20, 21 y 22 que se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 3:** Desviación estándar del MAE de los grupos aleatorios con un mismo porcentaje de sondajes con los cuatro métodos en dos situaciones: Solo sondajes y Superficies geomorfológicas más sondajes.

|            | Solo sondajes |       |       |       | Superficies geomorfológicas más sondajes |     |     |     |
|------------|---------------|-------|-------|-------|--|-----|-----|-----|
|            | IDW           | SP    | VN    | KG    | IDW                                      | SP  | VN  | KG  |
| <b>1%</b>  | 142,9         | 143,1 | 155,4 | 149,1 | 8,6                                      | 5,3 | 5,1 | 7,4 |
| <b>5%</b>  | 45,1          | 51,1  | 67,2  | 48,3  | 2,7                                      | 1,8 | 8,9 | 3,4 |
| <b>10%</b> | 6             | 6,9   | 19,5  | 6,8   | 0,8                                      | 0,6 | 3,0 | 1,8 |
| <b>20%</b> | 8,8           | 8,9   | 6,6   | 8,8   | 2,8                                      | 2,0 | 4,7 | 2,8 |
| <b>40%</b> | 5,1           | 5,1   | 10,7  | 5,0   | 0,6                                      | 0,6 | 1,1 | 0,5 |
| <b>60%</b> | 7,6           | 8,4   | 5,3   | 8,1   | 2,2                                      | 1,6 | 2,5 | 1,8 |
| <b>80%</b> | 3,7           | 3,6   | 3,7   | 3,5   | 0,5                                      | 0,5 | 1,0 | 0,5 |

De la Tabla 3 se puede observar que la desviación estándar de los resultados va disminuyendo a medida que aumenta la cantidad de información de sondajes en ambos casos. La desviación estándar de las superficies geomorfológicas más sondajes, disminuye considerablemente en relación con solo sondajes, llegando a ser más de 10 veces menor cuando se usaron bajos porcentajes.

Los resultados obtenidos de estas dos secciones (4.2.1 y 4.2.2) muestran que en ambos casos ocurre lo esperado, que al aumentar la cantidad de información disminuye el error y variabilidad del MAE (desviación estándar). Existe una reducción significativa de estos dos parámetros al agregar la información de las superficies geomorfológicas, lo que estaría indicando que estas ayudan a mejorar la superficie de contacto que se desea modelar (Figura 23).



**Figura 23:** Gráfico que representa el promedio del MAE de los cinco grupos aleatorios de las superficies generadas a partir de solo sondajes (tonos azules) y las superficies geomorfológicas sin y con bajo porcentaje de sondaje (tonos amarillos), con los métodos de Inverso Ponderado de distancia (IDW), Spline (SP), Vecino Natural (VN) y Kriging(KG). El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados para cada modelo y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).

El gráfico muestra una mejor forma de visualizar y poder comparar los resultados obtenidos hasta este capítulo, donde se muestra el promedio del MAE obtenido de los cinco grupos aleatorios. En este caso los datos de entrada (sondajes) y salida (Superficies geomorfológicas) se usan en conjunto para poder seguir analizando y precisando la superficie cubierta con el uso de un bajo porcentaje de sondajes, porque en ese tramo es donde se puede hacer una mejor comparación y ver cómo se comporta la interpolación-extrapolación de estos pediplanos. Donde se observa una clara disminución del promedio del MAE al momento de utilizar estos datos de entrada por si solos o al agregarle información de sondajes. Disminuyendo el promedio (solo sondajes a superficies geomorfológicas más sondajes) con un 1% de 355 a 126 m para IDW, de

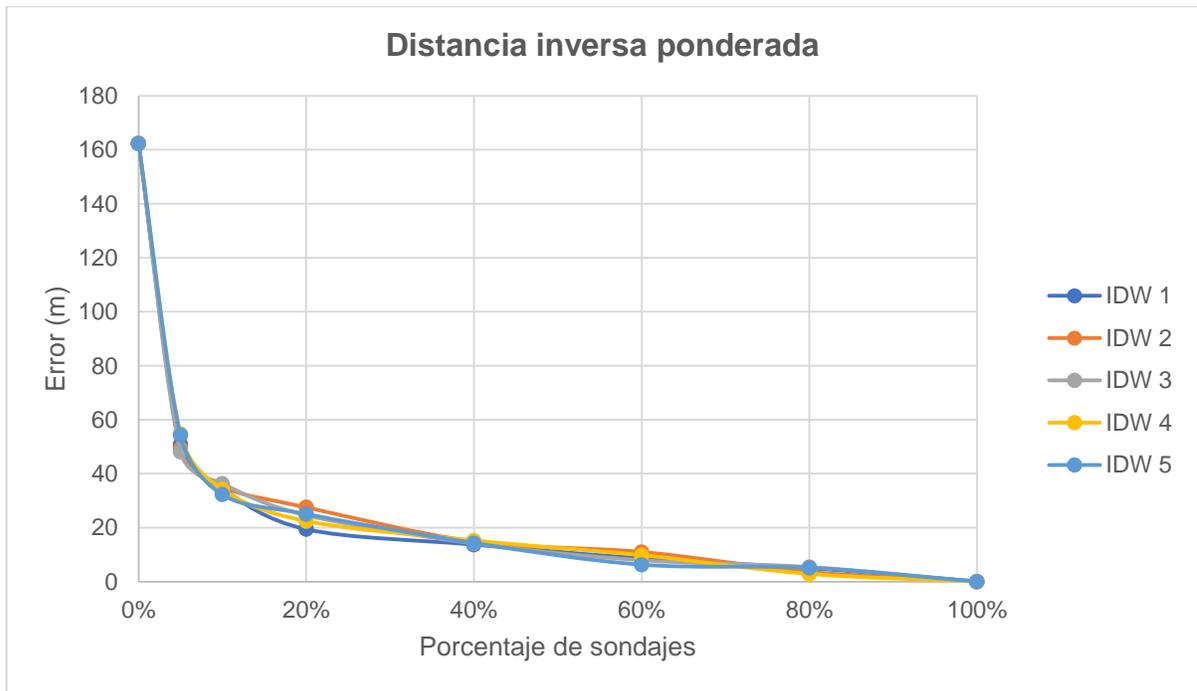
348 a 64 m con Spline, de 536 a 135 m con Vecino Natural y de 354 a 76 m con Kriging. Con un 5% disminuye de 111 a 55 m, 105 a 34 m, 204 a 59 m y de 103 a 38 m con los métodos de IDW, Spline, Vecino Natural y Kriging respectivamente. Estos resultados muestran que estas superficies de bajo relieve entregan un buen modelo predictivo que se ajuste a la realidad.

Por otro lado, este segundo experimento muestra que existen dos métodos que entregan un menor error tanto en el caso de la interpolación-extrapolación de solo las superficies geomorfológicas (0% de sondajes) como en los casos donde se añaden distintos porcentajes de sondajes. Estos son IDW, Spline y Kriging, sin embargo, no se puede descartar totalmente algún método para las pruebas siguientes.

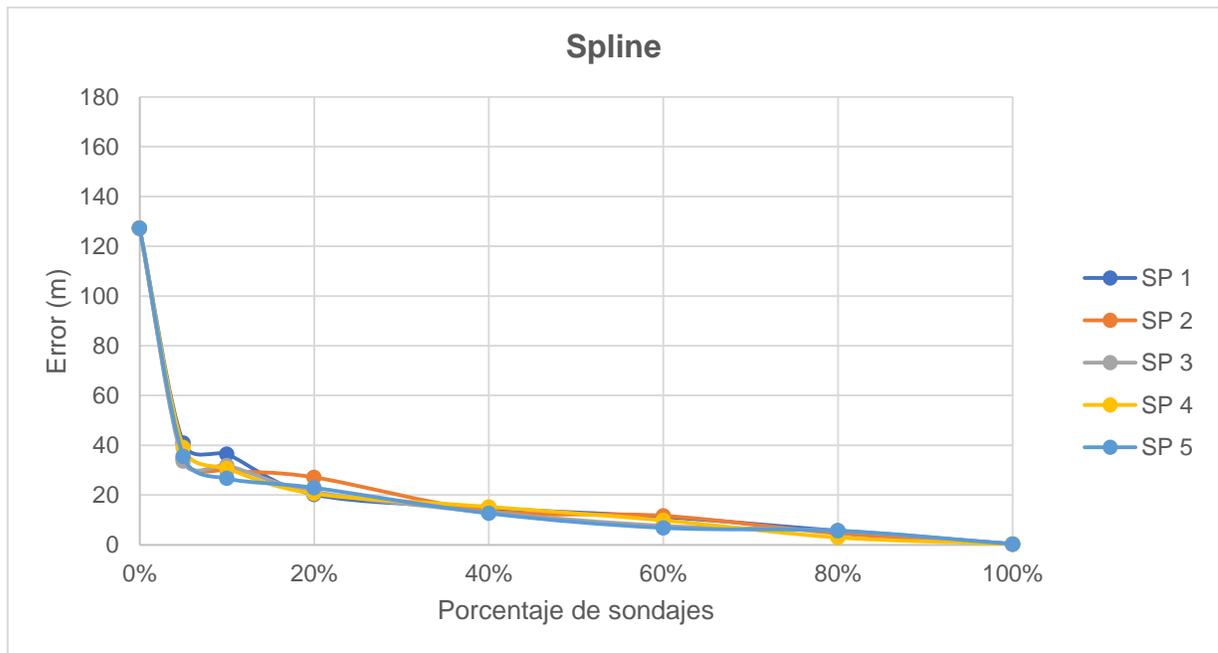
#### **4.2.3 MODELADO DE SUPERFICIES CON PENDIENTE MENOR A 10°**

Una vez obtenida la clasificación de superficies según pendiente (capítulo 3.2.2), más lo expuesto en las Secciones 4.2.1 y 4.2.2, se realizó una segunda prueba para determinar si una selección simple por pendiente desde la zona expuesta es adecuada para predecir la superficie cubierta, y qué método de interpolación-extrapolación es mejor. Para esto, se tomaron los puntos que representan las superficies con pendientes menores o iguales a 10°. Esta selección de puntos de entrada ( $m \leq 10$ ) fue debido a que la baja pendiente es una de las características morfométricas de los pediplanos.

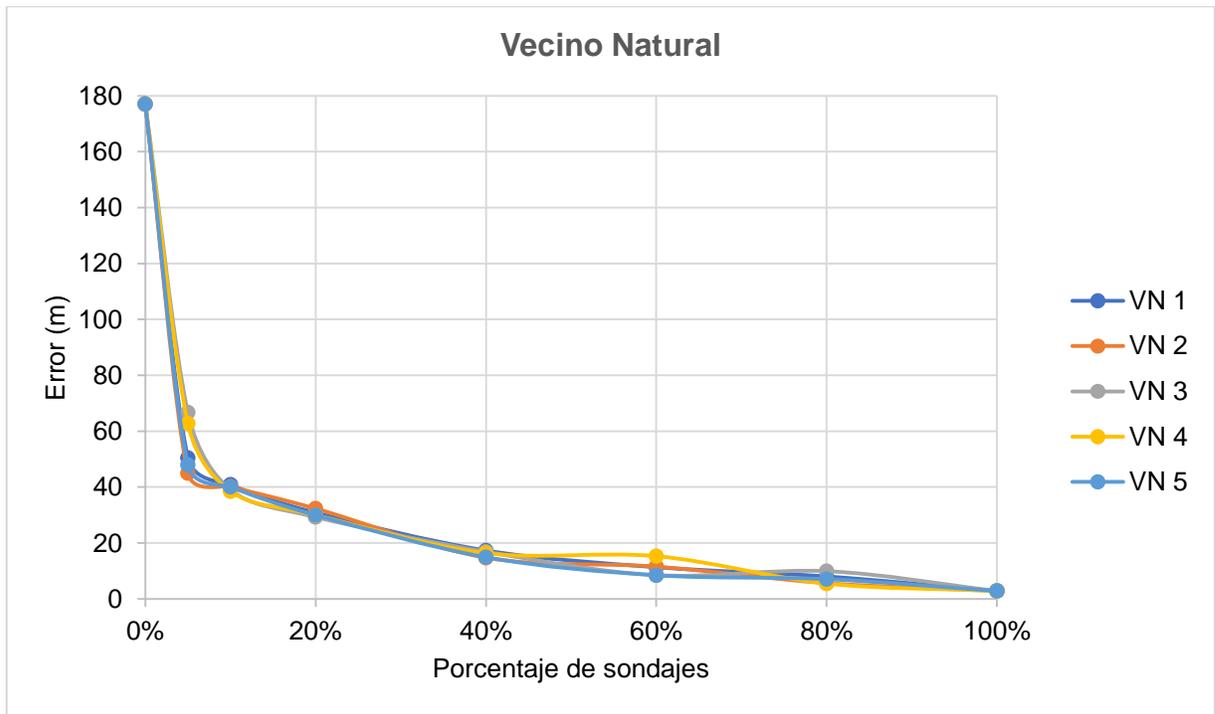
Los valores del error para cada una de las superficies obtenidas con distintos grupos aleatorios se representaron en gráficos de dispersión (Figura 24, 25, 26 y 27) donde en el eje horizontal se encuentra el porcentaje de sondajes utilizados y en el eje vertical el error (MAE), al igual que en el capítulo 4.2.1 y 4.2.2 y se repitió el mismo paso anterior para los cuatro métodos.



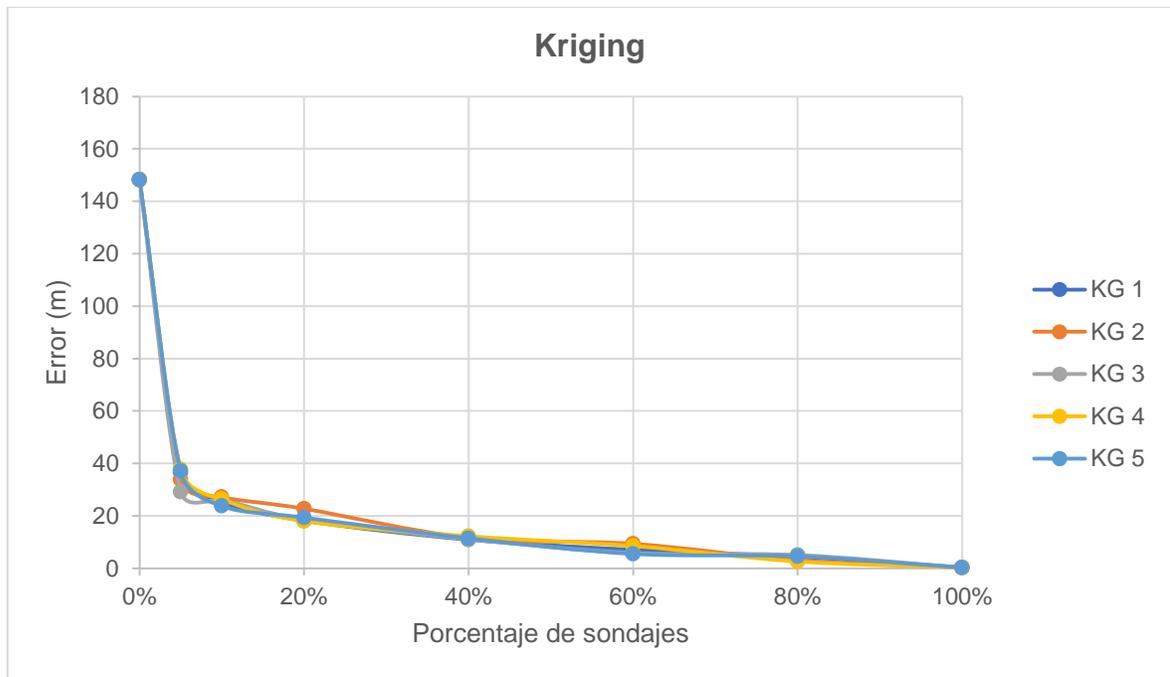
**Figura 24:** Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente. El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 25:** Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Spline (SP) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente. El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



**Figura 26:** Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Vecino natural (VN) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente. El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).



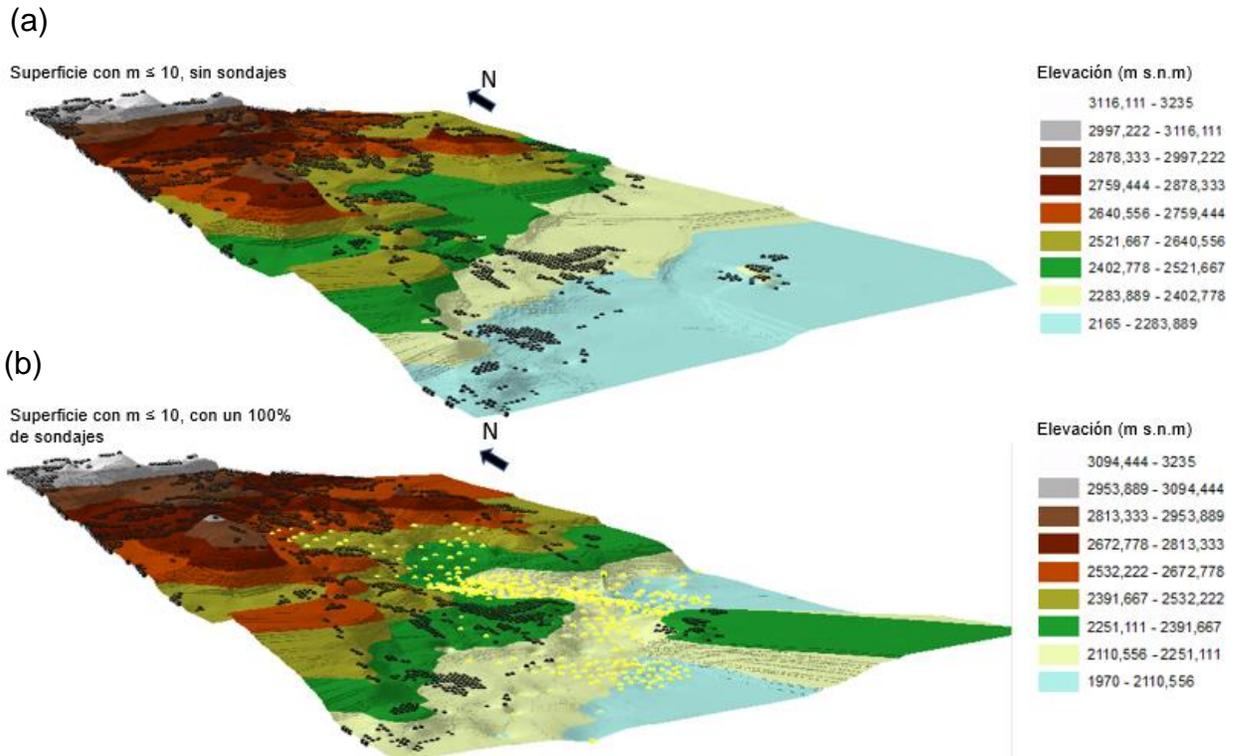
**Figura 27:** Error asociado a las superficies interpoladas con el método de Kriging (KG) con cinco grupos de sondajes distintos seleccionados aleatoriamente. El eje horizontal corresponde al porcentaje de sondajes utilizados y el eje vertical contiene el valor del error asociado (MAE).

De los resultados mostrados en las Figuras 24, 25, 26 y 27, se observa que el MAE para las superficies interpoladas-extrapoladas es de 162, 127, 177 y 148 m para los métodos de IDW, Spline, Vecino Natural y Kriging respectivamente. Además, independiente del grupo aleatorio de sondajes, la tendencia es la misma para todos los métodos y el valor del error es similar dentro de los cinco grupos, caso similar a lo de las superficies geomorfológicas.

A pesar de que los métodos que entregaron el menor error fue el de Spline y Kriging, para realizar una mejor elección se hizo una observación y comparación de los perfiles de una sección representativa obtenidos de las distintas superficies interpoladas-extrapoladas con los distintos porcentajes de sondajes.

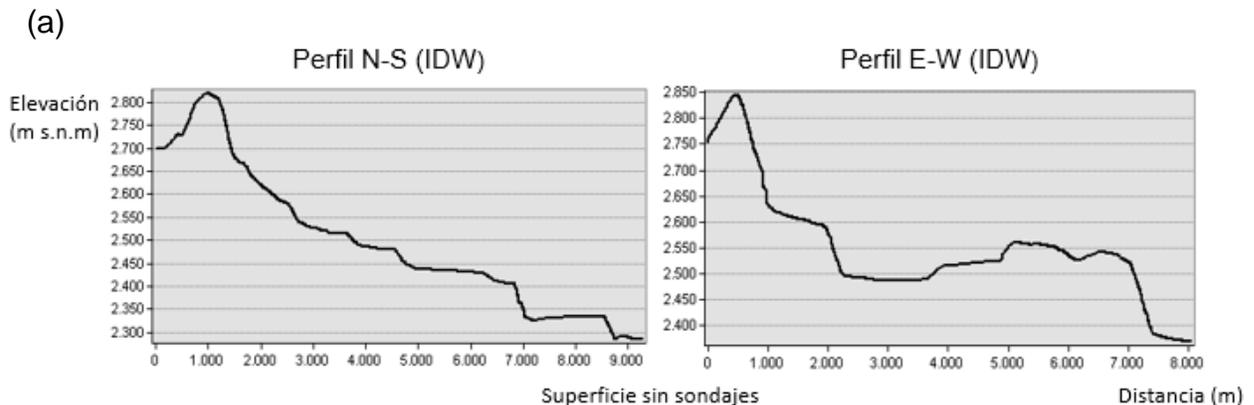
#### Ponderación con inverso de la distancia (IDW)

De la Figura 28 se puede observar que la superficie modelada con  $m \leq 10^\circ$  se encuentra sobre la superficie real en la zona cubierta (Figura 28 (b)). En el caso sin sondajes, la elevación mínima del contacto se encuentra entre 2.165 y 2.284 m s.n.m. mientras que el real está entre 1.970 y 2.111 m s.n.m. A pesar de esta diferencia, la tendencia a una disminución de la altura hacia el Sureste es similar para ambos casos (con y sin información de sondajes).

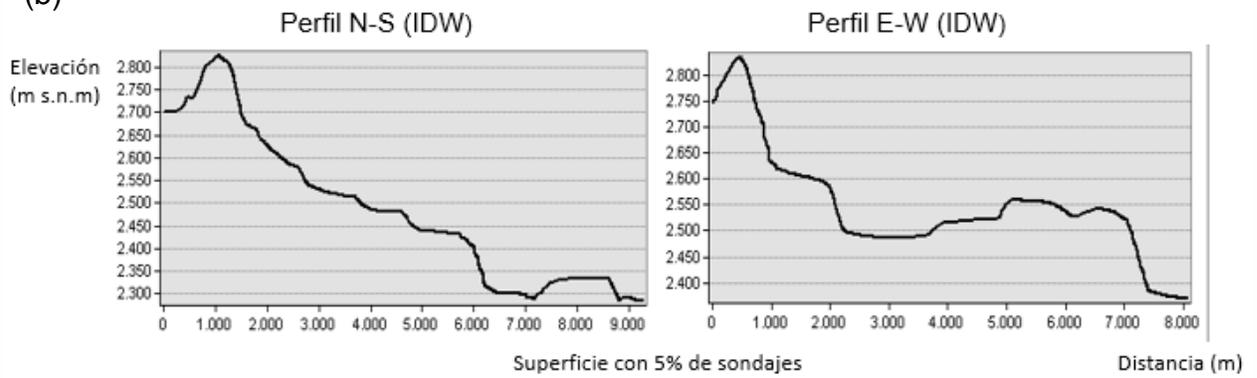


**Figura 28:** Representación en 3D de las superficies con el método de interpolación ponderación según inverso de la distancia. (a) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , sin aporte de información de sondajes. (b) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , con la información del 100% de los sondajes. Los puntos negros corresponden a la base de datos de entrada para la interpolación, tanto para (a) como para (b), y los puntos amarillos representan los sondajes.

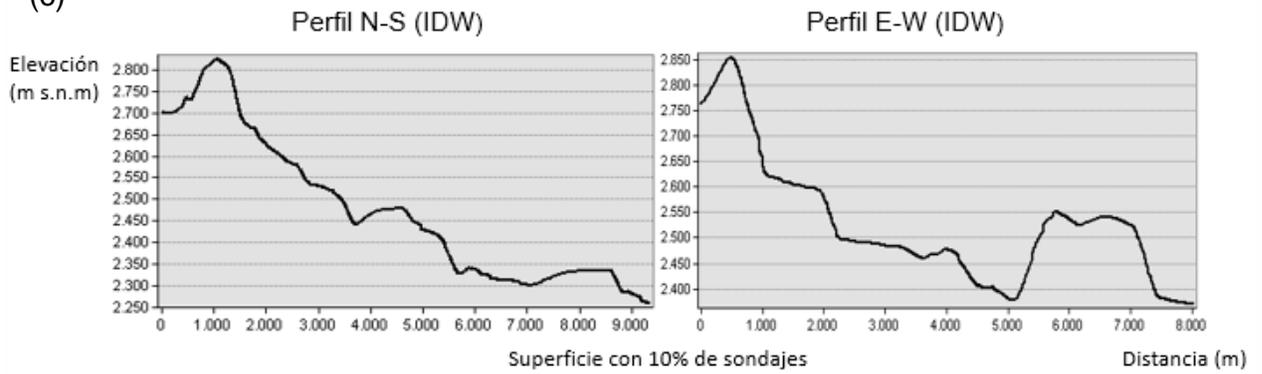
Para poder tener una mejor visión del comportamiento del contacto modelado en las superficies, se realizaron perfiles dirección N-S y E-W aumentando el porcentaje de sondajes (Figura 29).



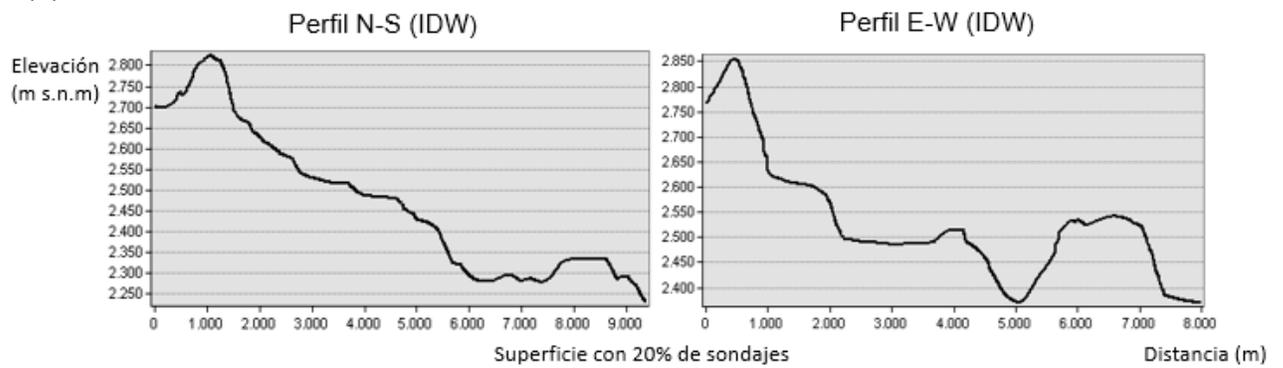
(b)



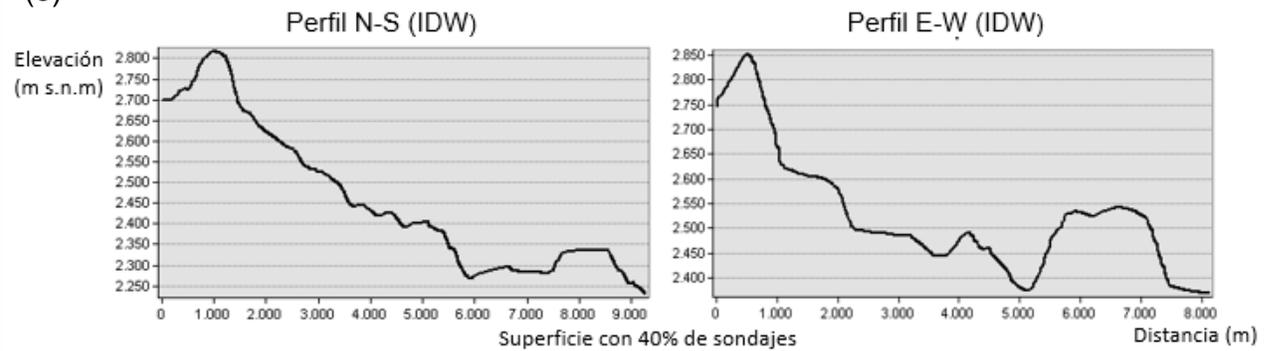
(c)



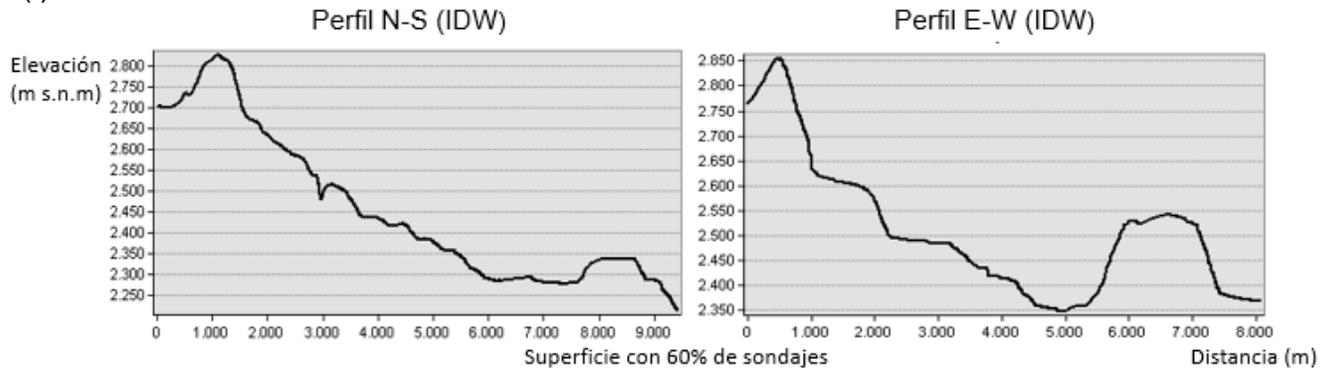
(d)



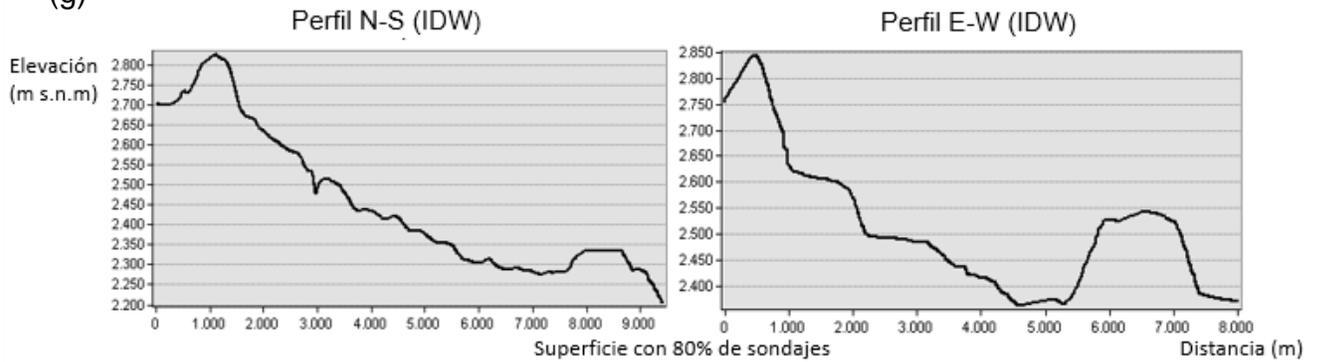
(e)



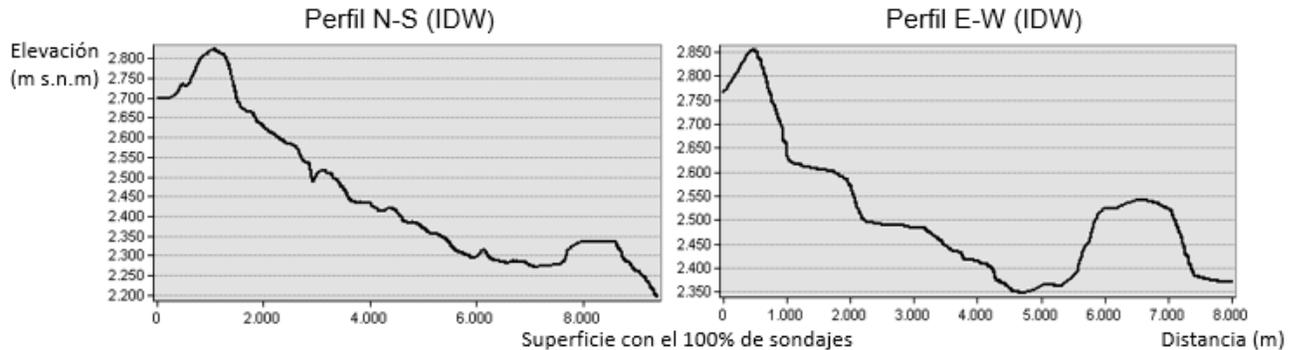
(f)



(g)



(h)



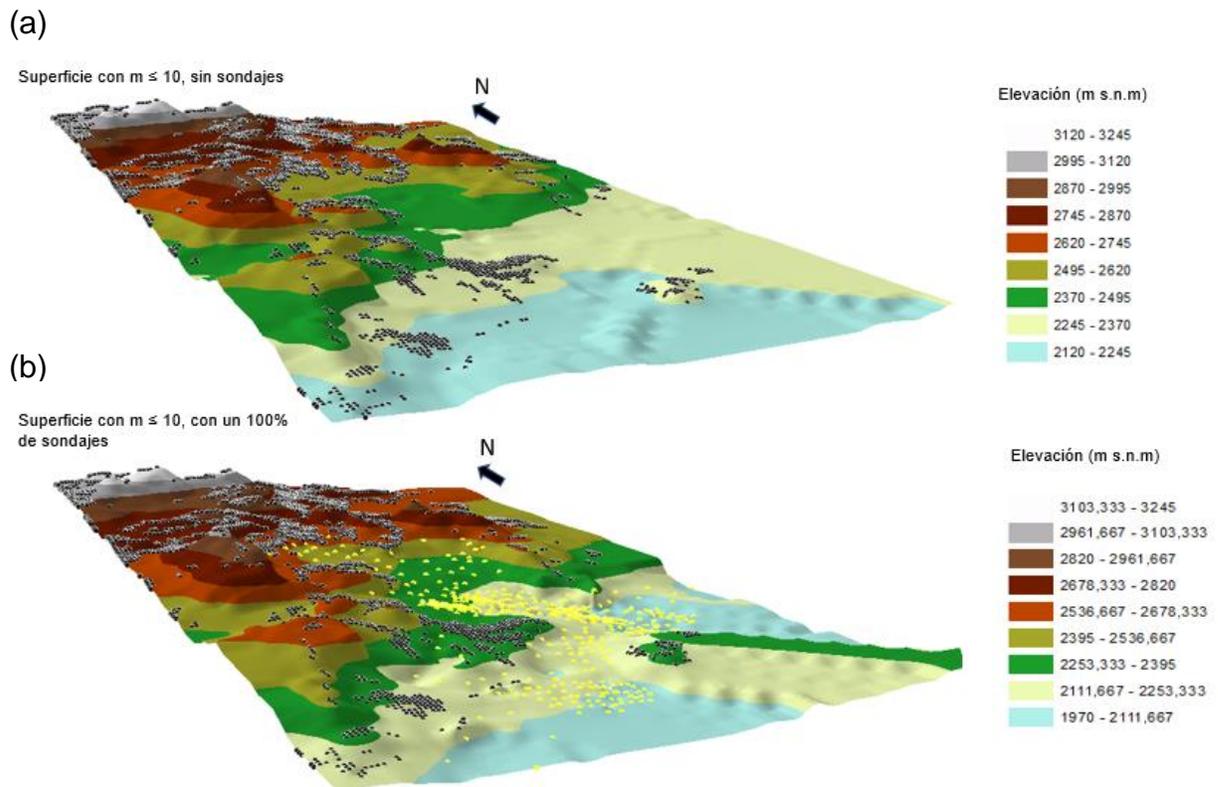
**Figura 29:** Perfiles con dirección N-S (a la izquierda) y E-W (a la derecha) de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes. En el eje horizontal se muestra la distancia (m) y en el eje vertical la elevación con respecto al nivel del mar (m.s.n.m.). (a) Perfiles de la superficie interpolada sin sondajes. (b) Perfiles de la superficie interpoladas con un 5% de los sondajes. (c) Perfiles de la superficie interpolada con un 10% de los sondajes. (d) Perfiles de la superficie interpolada con un 20% de los sondajes. (e) Perfiles de la superficie interpolada con un 40% de los sondajes. (f) Perfiles de la superficie interpolada con un 60% de los sondajes. (g) Perfiles de la superficie interpolada con un 80% de los sondajes. (h) Perfiles de la superficie interpolada con un 100% de los sondajes.

Los perfiles muestran que a medida que aumenta la cantidad de sondajes la profundidad del contacto aumenta. En el perfil de dirección N-S, una de las zonas con menor elevación está a unos 2.340 m s.n.m., mientras que agregando la información de solo un 5% de los sondajes disminuye aproximadamente a 2.300 m s.n.m. A medida que aumenta la cantidad de sondajes, esta zona de menor elevación (a partir de los 6.000 m. de distancia) tiene un incremento en la distancia que cubre, siendo en un comienzo cercana a los 1.000 m y finalizando con casi 2.000 m.

Por otro lado, en el perfil E-W, en la Figura 29 (a) y (b), los perfiles son prácticamente iguales, una zona plana con una elevación de aprox. 2.500 m. Luego, la tendencia general es que a medida que aumenta la cantidad de sondajes, esta zona plana deja de serlo y empieza a inclinarse cada vez más hacia el este llegando a una elevación de alrededor de 2.250 m s.n.m., que en un comienzo (Figura 29 (c)) es más angosta y cada vez de hace más ancha finalizando con unos 1.000 m de distancia.

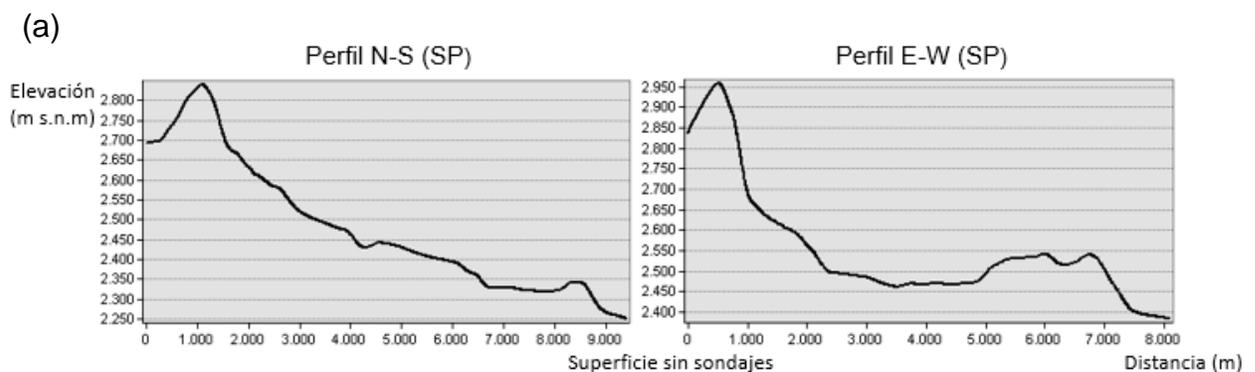
### Spline

De la Figura 30 se observa que la superficie modelada a partir de las zonas con  $m \leq 10^\circ$  se encuentra sobre el contacto real. En el caso sin sondajes la elevación mínima del contacto se encuentra a unos 2.120-2.245 m.s.n.m. mientras que la real está entre los 1.970-2.110,667 m.s.n.m. A pesar de esta diferencia, la tendencia a una disminución de la altura hacia el Sureste es similar para ambos casos.

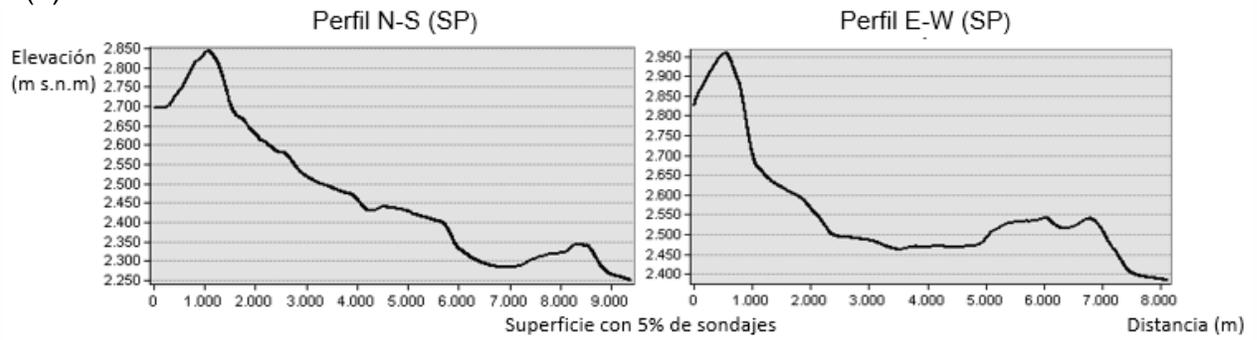


**Figura 30:** Representación en 3D de las superficies con el método de Spline. (a) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , sin aporte de información de sondajes. (b) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , con la información del 100% de los sondajes. Los puntos negros corresponden a la base de datos de entrada para la interpolación, tanto para (a) como para (b) y los puntos amarillos representan los sondajes.

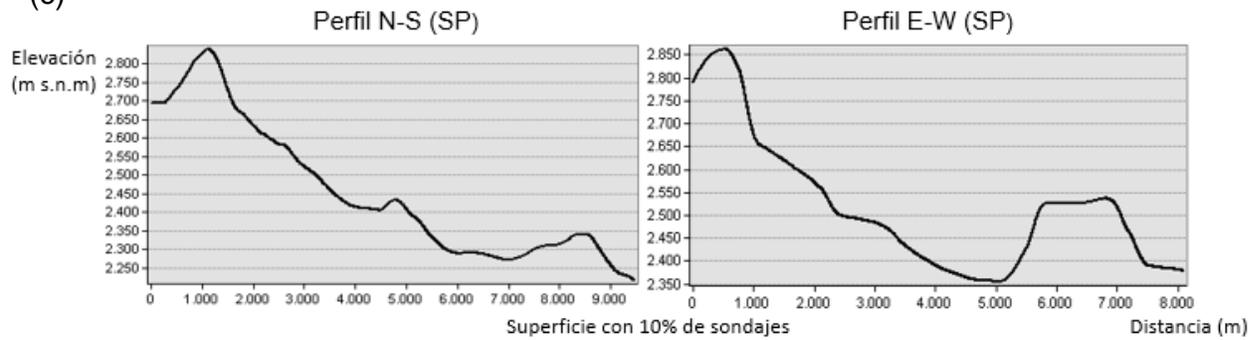
Para poder tener una mejor visión del comportamiento del contacto modelado, al igual que en el caso de IDW, se realizaron perfiles dirección N-S y E-W en las superficies en la misma sección, aumentando el porcentaje de sondajes (Figura 31).



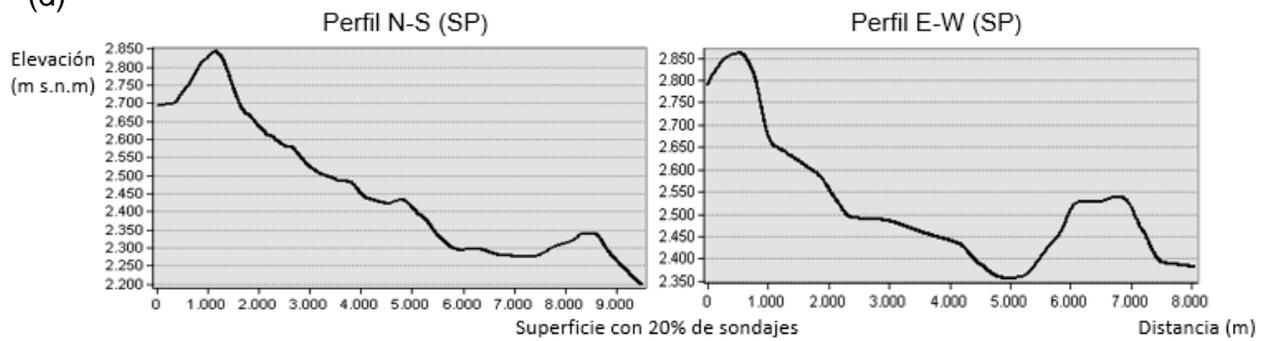
(b)



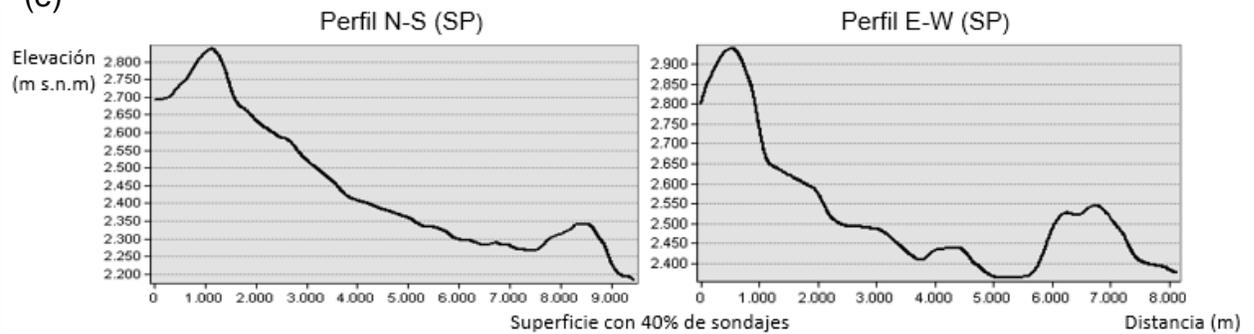
(c)

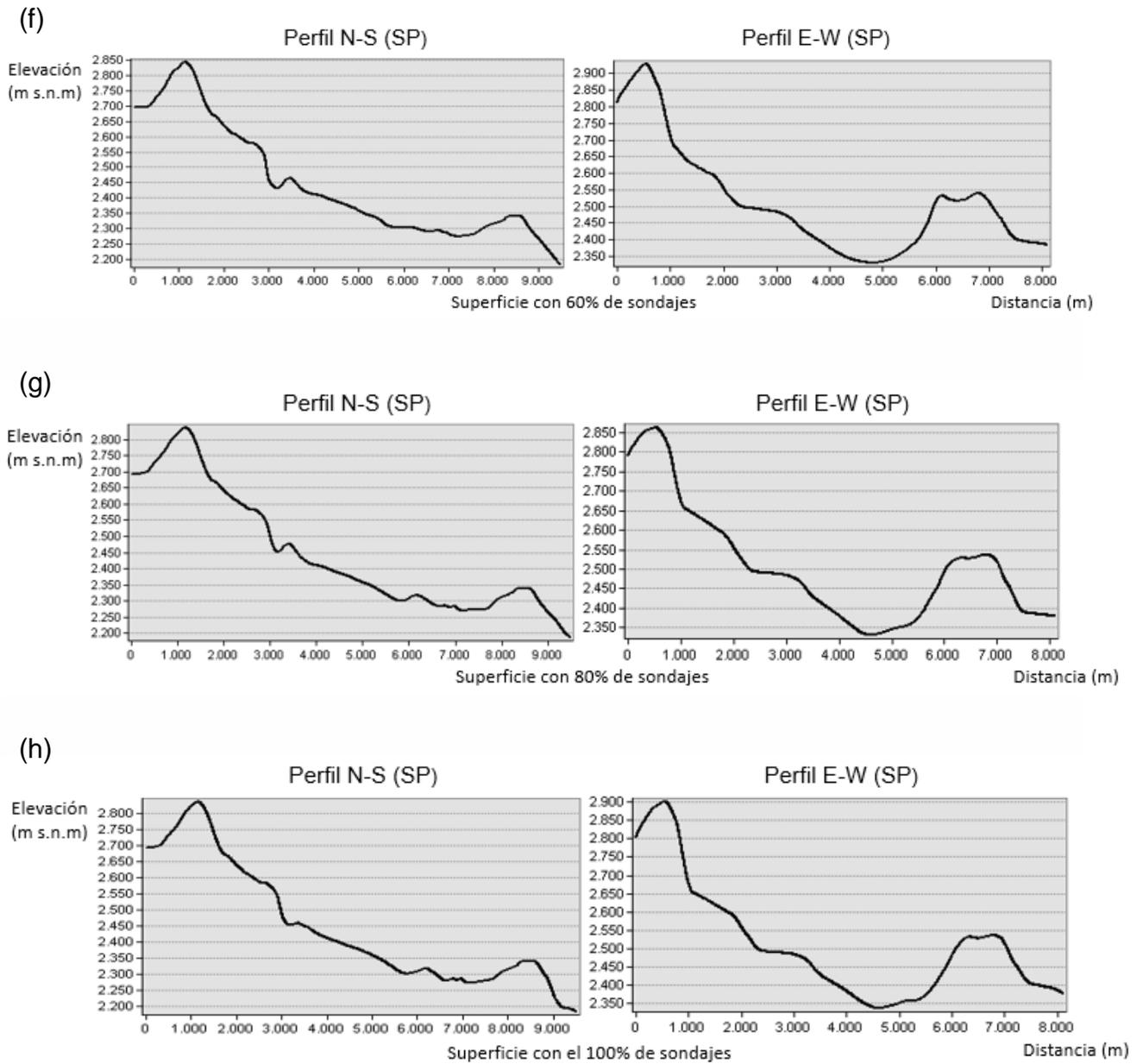


(d)



(e)



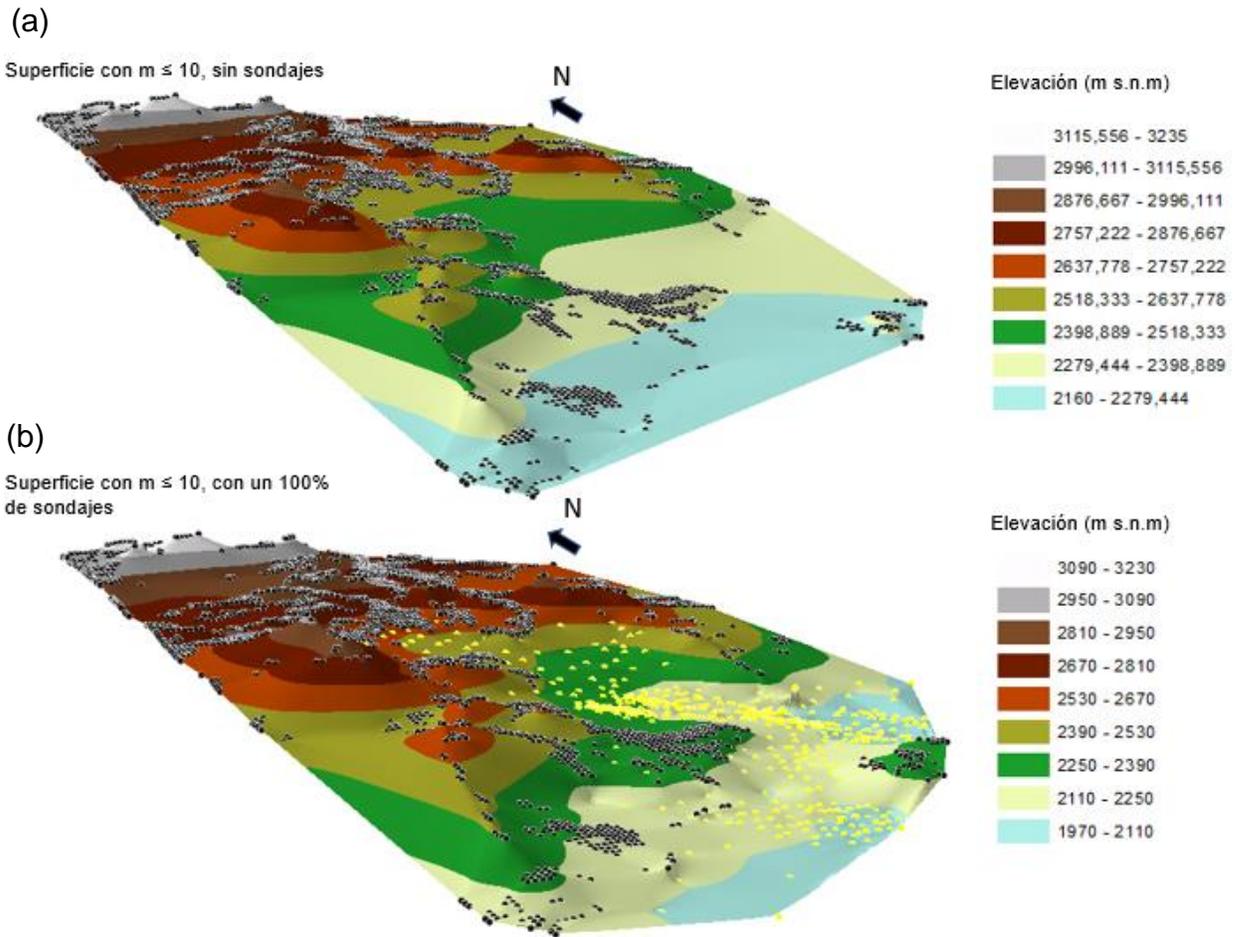


**Figura 31:** Perfiles con dirección N-S (a la izquierda) y E-W (a la derecha) de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes. En el eje horizontal se muestra la distancia (m) y en el eje vertical la elevación con respecto al nivel del mar (m.s.n.m.). (a) Perfiles de la superficie interpolada sin sondajes. (b) Perfiles de la superficie interpolada con un 5% de los sondajes. (c) Perfiles de la superficie interpolada con un 10% de los sondajes. (d) Perfiles de la superficie interpolada con un 20% de los sondajes. (e) Perfiles de la superficie interpolada con un 40% de los sondajes. (f) Perfiles de la superficie interpolada con un 60% de los sondajes. (g) Perfiles de la superficie interpolada con un 80% de los sondajes. (h) Perfiles de la superficie interpolada con un 100% de los sondajes.

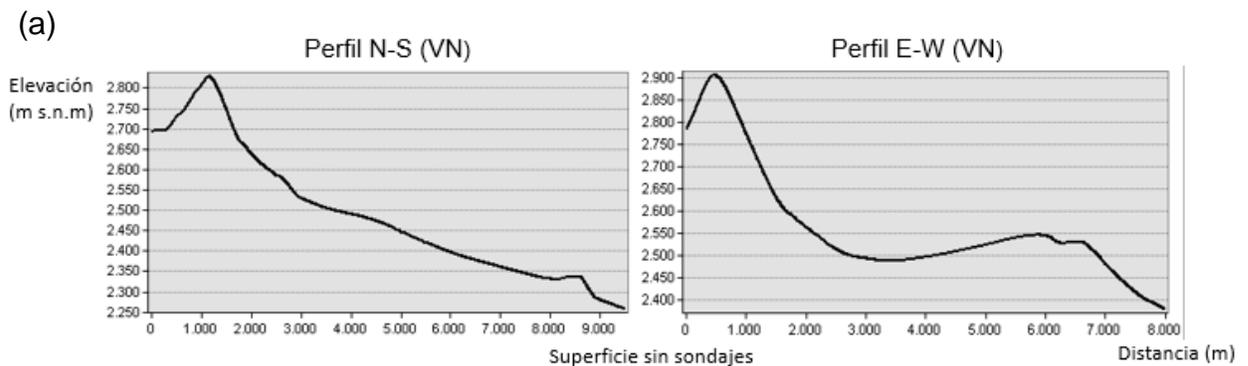
Al igual que con el método anterior, los perfiles muestran que a medida que aumenta la cantidad de sondajes la profundidad del contacto que modelado En el perfil realizado con dirección N-S, una de las zonas con menor elevación está a unos 2.330 m s.n.m., mientras que agregando la información de los sondajes disminuye inmediatamente bajo los 2.300 m s.n.m. de una forma suave y gradual. En este caso, el perfil E-W es similar al N-S y va disminuyendo gradualmente la elevación desde una zona plana a unos 3.450 m s.n.m. que se transforma en una superficie con una inclinación hacia el Este llegando a los 3.350 m s.n.m.

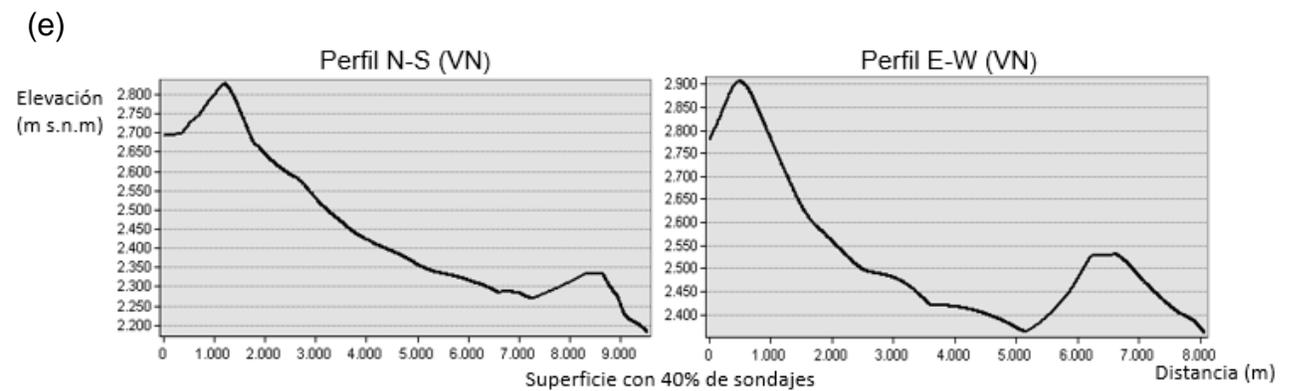
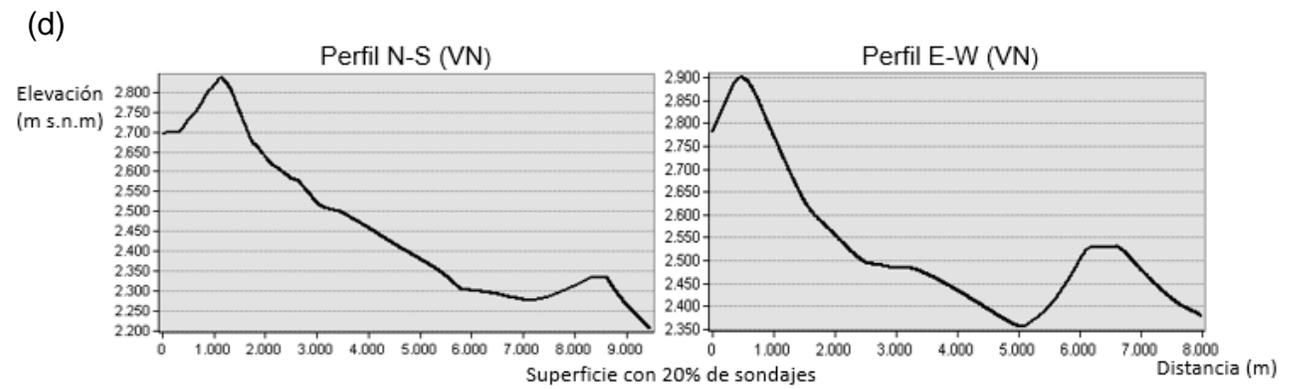
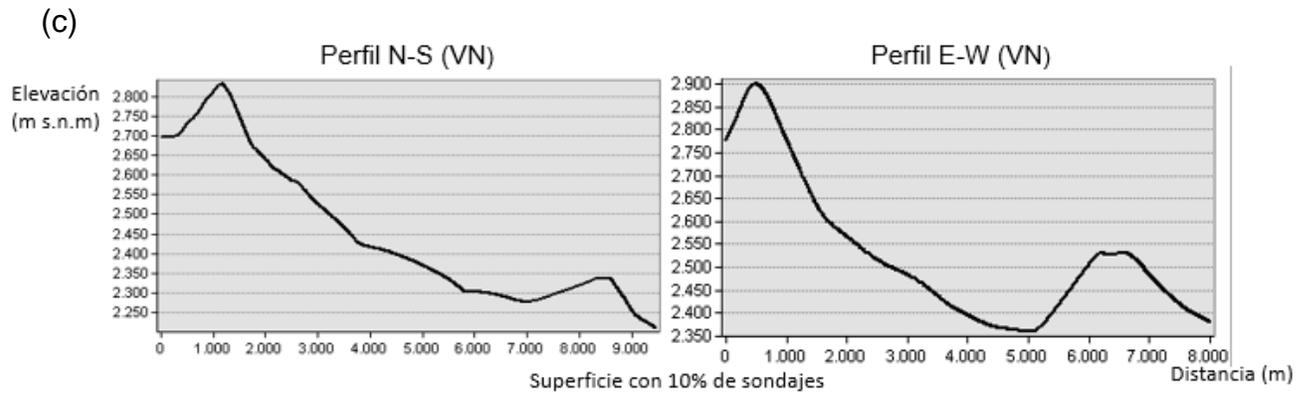
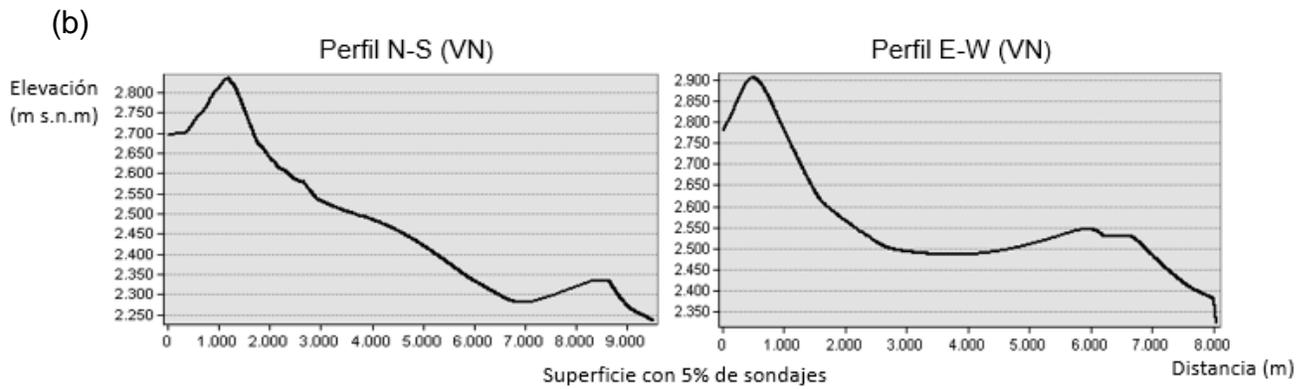
### Vecino Natural

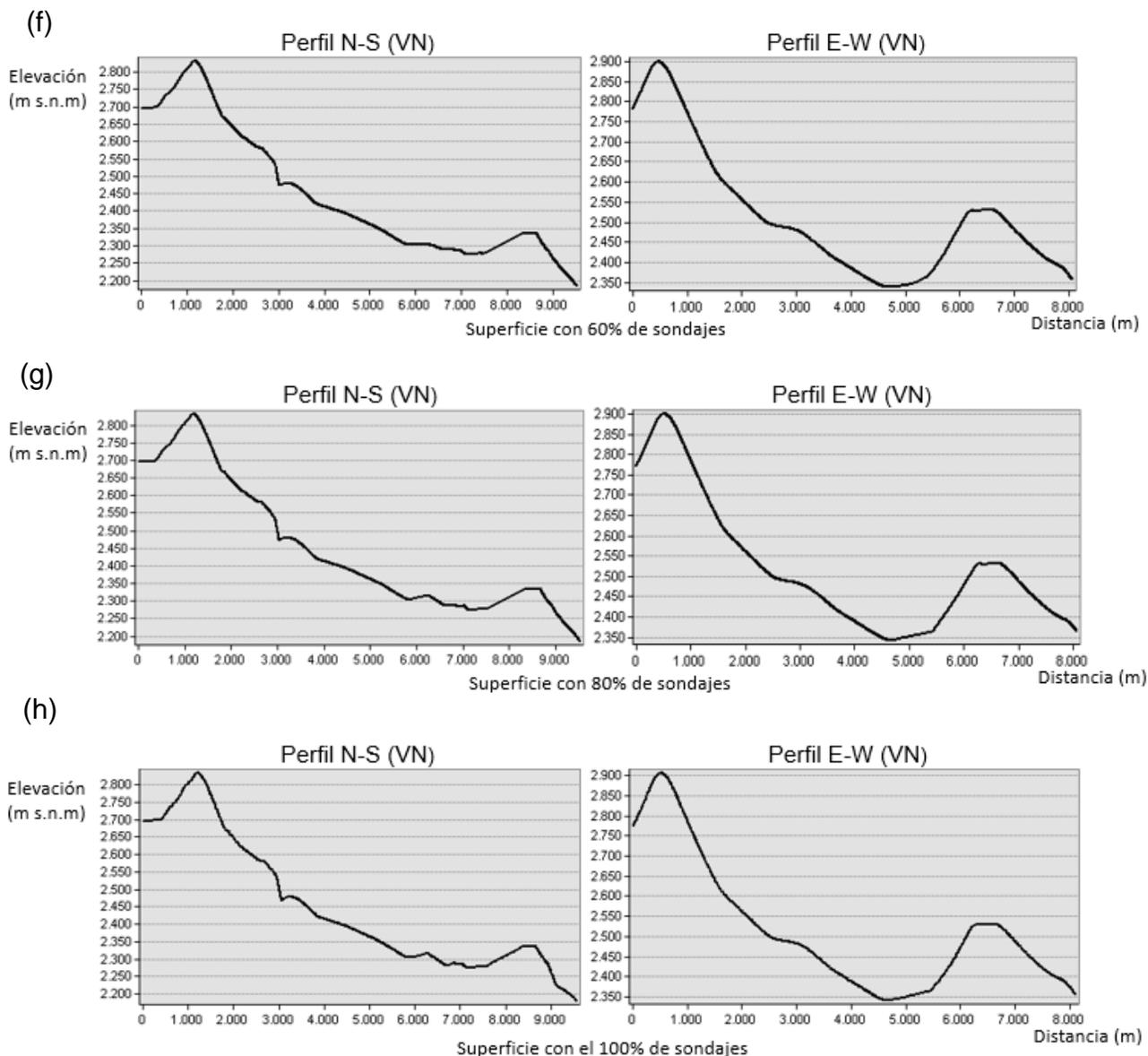
De la figura 32 se puede observar que las características generales son similares a los casos anteriores. La superficie modelada con  $m \leq 10^\circ$  se encuentra sobre la superficie real en la zona cubierta. En el caso sin sondajes la elevación mínima del contacto se encuentra a unos 2.160 – 2.279 m s.n.m. mientras que el real está entre los 1.970 – 2.110 m s.n.m. Entre los métodos vistos, éste es el que posee una mayor diferencia entre contacto modelado-contacto real, pero a pesar de esto mantiene la misma tendencia disminuyendo la altura hacia el sureste.



**Figura 32:** Representación en 3D de las superficies con el método de Vecino Natural. (a) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , sin aporte de información de sondajes. (b) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , con la información del 100% de los sondajes. Los puntos negros corresponden a la base de datos de entrada para la interpolación, tanto para (a) como para (b) y los puntos amarillos representan los sondajes.







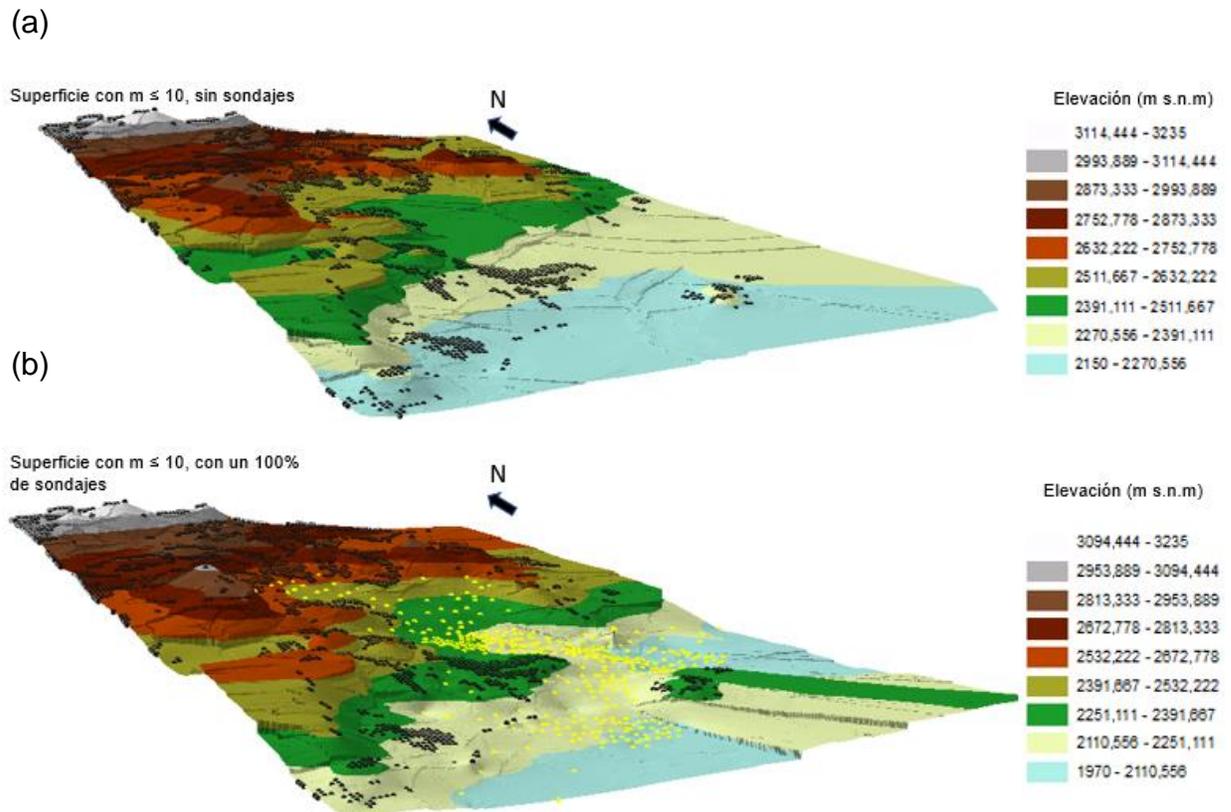
**Figura 33:** Perfiles con dirección N-S (a la izquierda) y E-W (a la derecha) de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes. En el eje horizontal se muestra la distancia (m) y en el eje vertical la elevación con respecto al nivel del mar (m.s.n.m.). (a) Perfiles de la superficie interpolada sin sondajes. (b) Perfiles de la superficie interpolada con un 5% de los sondajes. (c) Perfiles de la superficie interpolada con un 10% de los sondajes. (d) Perfiles de la superficie interpolada con un 20% de los sondajes. (e) Perfiles de la superficie interpolada con un 40% de los sondajes. (f) Perfiles de la superficie interpolada con un 60% de los sondajes. (g) Perfiles de la superficie interpolada con un 80% de los sondajes. (h) Perfiles de la superficie interpolada con un 100% de los sondajes.

En este caso los perfiles a medida que van aumentando la cantidad de sondajes difieren de los dos casos anteriores pues la curva es similar, sin altos y bajos de manera abrupta, desde 0% hasta un 100% sondajes. Para la sección N-S, a medida que se aumenta la cantidad de información, la pendiente se va haciendo cada vez mayor, mientras que en el perfil E-W hasta la Figura 33 (b) la zona central (con menor altura)

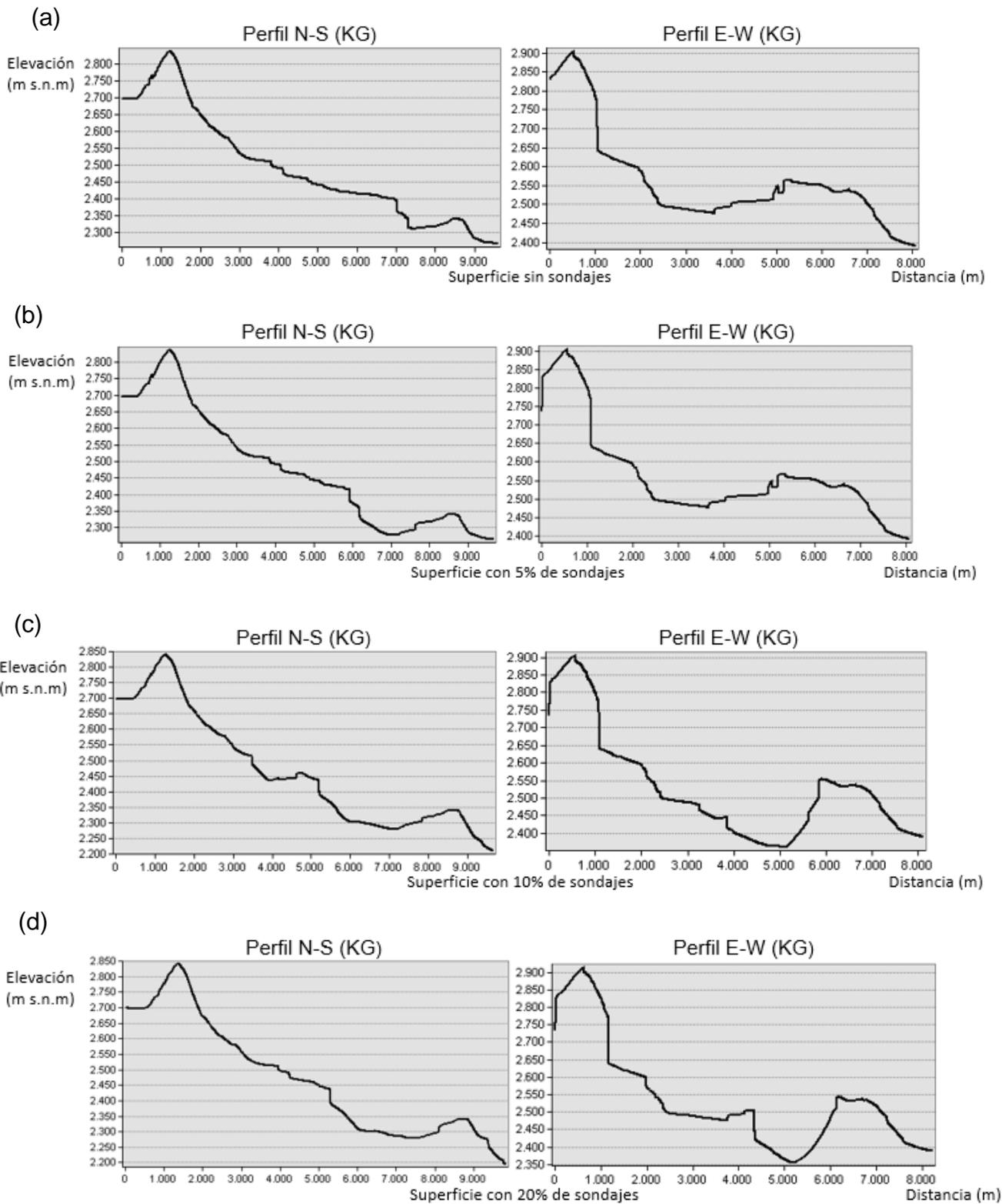
se mantiene casi plana, mientras que en los otros (desde (c) hasta (h)), a medida que aumenta el porcentaje la pendiente se incrementa.

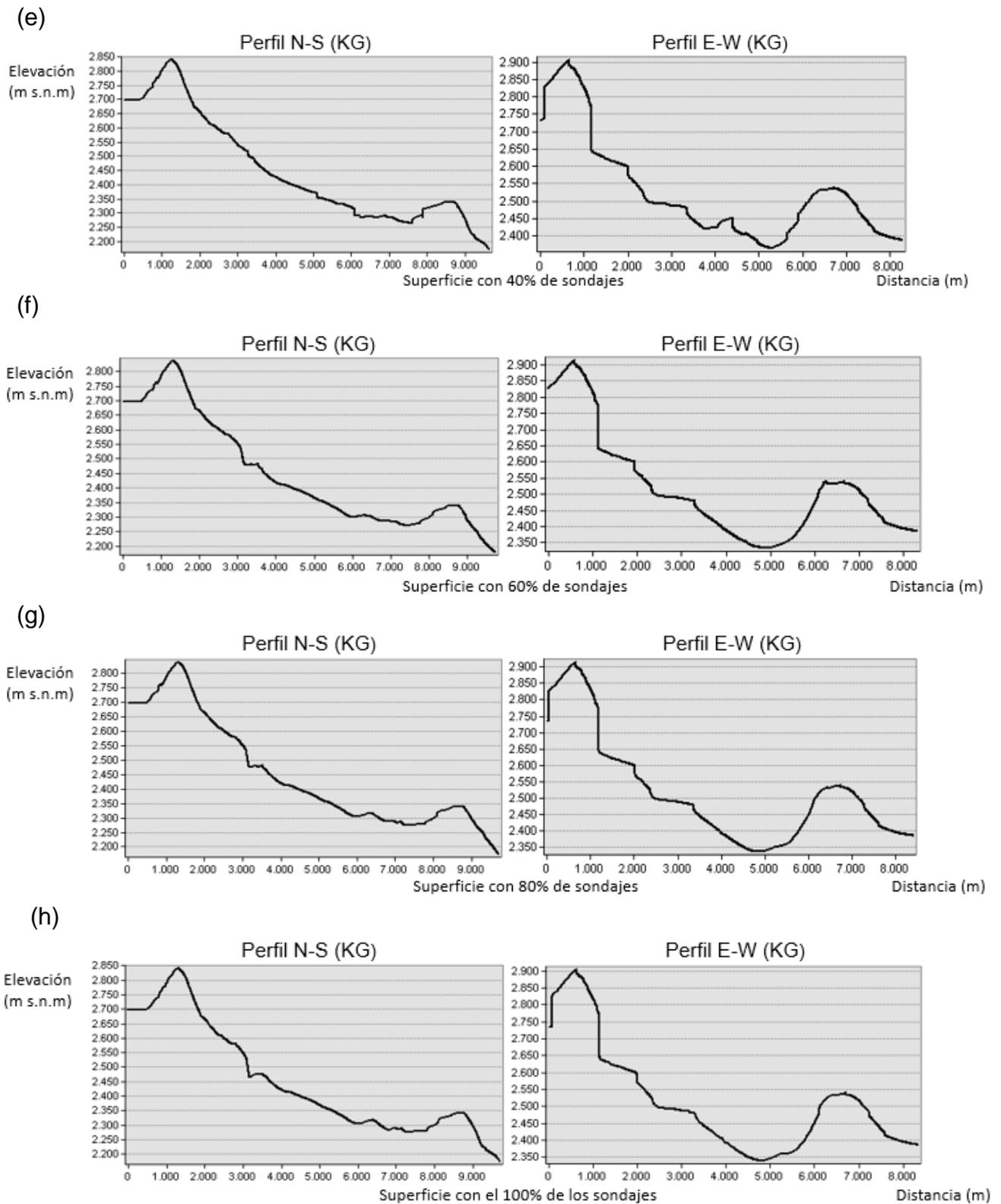
### Kriging

La Figura 34 muestra que las características generales son similares a los casos anteriores. La superficie modelada a partir de las zonas con  $m \leq 10^\circ$  se encuentra sobre el contacto real. La leyenda muestra que en el caso sin sondajes la elevación mínima del contacto se encuentra a unos 2.150 – 2.270 m s.n.m. mientras que el real está entre los 1.970 – 2.110 m s.n.m. Además, muestra la misma tendencia de una disminución de altura hacia el sureste.



**Figura 34:** Representación en 3D de las superficies con el método de Kriging. (a) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , sin aporte de información de sondajes. (b) Modelo creado a partir de las superficies con  $m \leq 10^\circ$ , con la información del 100% de los sondajes. Los puntos negros corresponden a la base de datos de entrada para la interpolación, tanto para (a) como para (b) y los puntos amarillos representan los sondajes.





**Figura 35:** Perfiles con dirección N-S (a la izquierda) y E-W (a la derecha) de las distintas superficies modeladas con distinta cantidad de sondajes. En el eje horizontal se muestra la distancia (m) y en el eje vertical la elevación con respecto al nivel del mar (m.s.n.m.). (a) Perfiles de la superficie interpolada sin sondajes. (b) Perfiles de la superficie interpolada con un 5% de los sondajes. (c) Perfiles de la superficie interpolada con un 10% de los sondajes. (d) Perfiles de la superficie interpolada con un 20% de los

*sondajes. (e) Perfiles de la superficie interpolada con un 40% de los sondajes. (f) Perfiles de la superficie interpolada con un 60% de los sondajes. (g) Perfiles de la superficie interpolada con un 80% de los sondajes. (h) Perfiles de la superficie interpolada con un 100% de los sondajes.*

Con este método las superficies poseen mayor rugosidad que en los otros casos. En el perfil N-S a diferencia de los métodos anteriores, desde un comienzo llega a una mayor profundidad, pero en un espacio acotado de unos 200 m. y de manera abrupta cayendo con una pendiente pronunciada, pero a medida que aumenta la cantidad de sondajes la pendiente se va haciendo cada vez suave, siendo la superficie de baja altura cada vez más amplia. Por otro lado, el perfil E-W, tiene un comportamiento similar con los otros casos, en un comienzo (sin sondajes) hay una zona más o menos plana a unos 2.500 m s.n.m. que luego, al agregar más información, cae primero solo al lado W con un alta pendiente para luego disminuir. Cabe destacar que con Kriging la superficie modelada al ser más rugosa posee unos altos y bajos muy irregulares, que no aparecieron con ningún otro método.

En consecuencia, usando los puntos con pendiente menor a  $10^\circ$  como datos de entrada (desde la zona expuesta) para predecir-modelar la superficie cubierta se observa que los métodos que entregaron un menor MAE son los métodos Spline y Kriging, con 127 y 148 m respectivamente, mientras que IDW indican 162 m y VN, 177 m (Figuras 24, 25, 26 y 27).

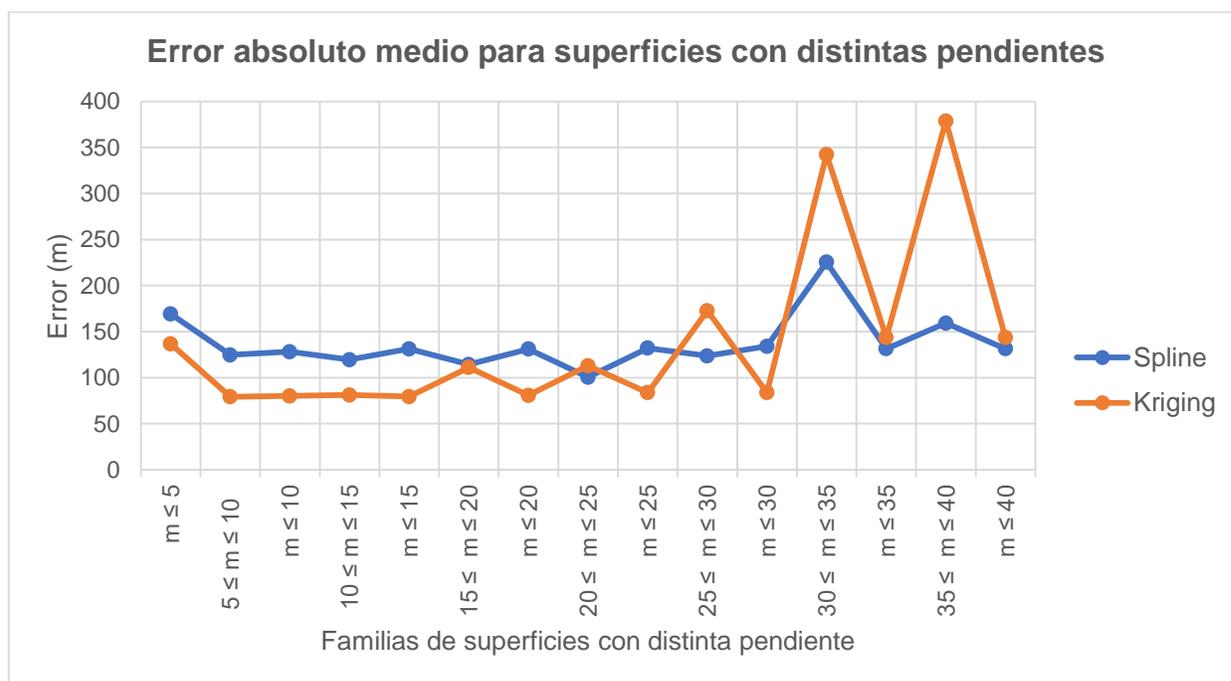
Aunque estos dos métodos tienen un error similar, su comportamiento al interpolar-extrapolar es muy distinto. Spline genera una superficie mucho más suave que en algunos casos se puede alejar de la realidad. Mientras que Kriging genera una superficie más rugosa, pero sobre todo para el caso sin sondajes o con un mínimo porcentaje de ellos, se acerca más en algunas zonas al contacto real. En consecuencia, se podrían considerar los dos métodos para tener una mejor modelo.

#### **4.2.4 MODELADO DE SUPERFICIE CON DISTINTOS RANGOS DE PENDIENTE**

Como se quiere estudiar el comportamiento que tiene la extrapolación de superficies con distintos rangos de pendiente, se realizó un gráfico donde se muestra el MAE en función del rango de pendiente que representa la superficie (Figura 36). Por otro lado, a partir del segundo código escrito en Python que entrega un vector con las distintas

diferencias de elevación, se generó otro tipo de gráfico con el fin de que se pueda visualizar mejor alguna pendiente óptima, tal que su proyección se asemeje al contacto real y que así tenga la menor diferencia en “z”, en promedio.

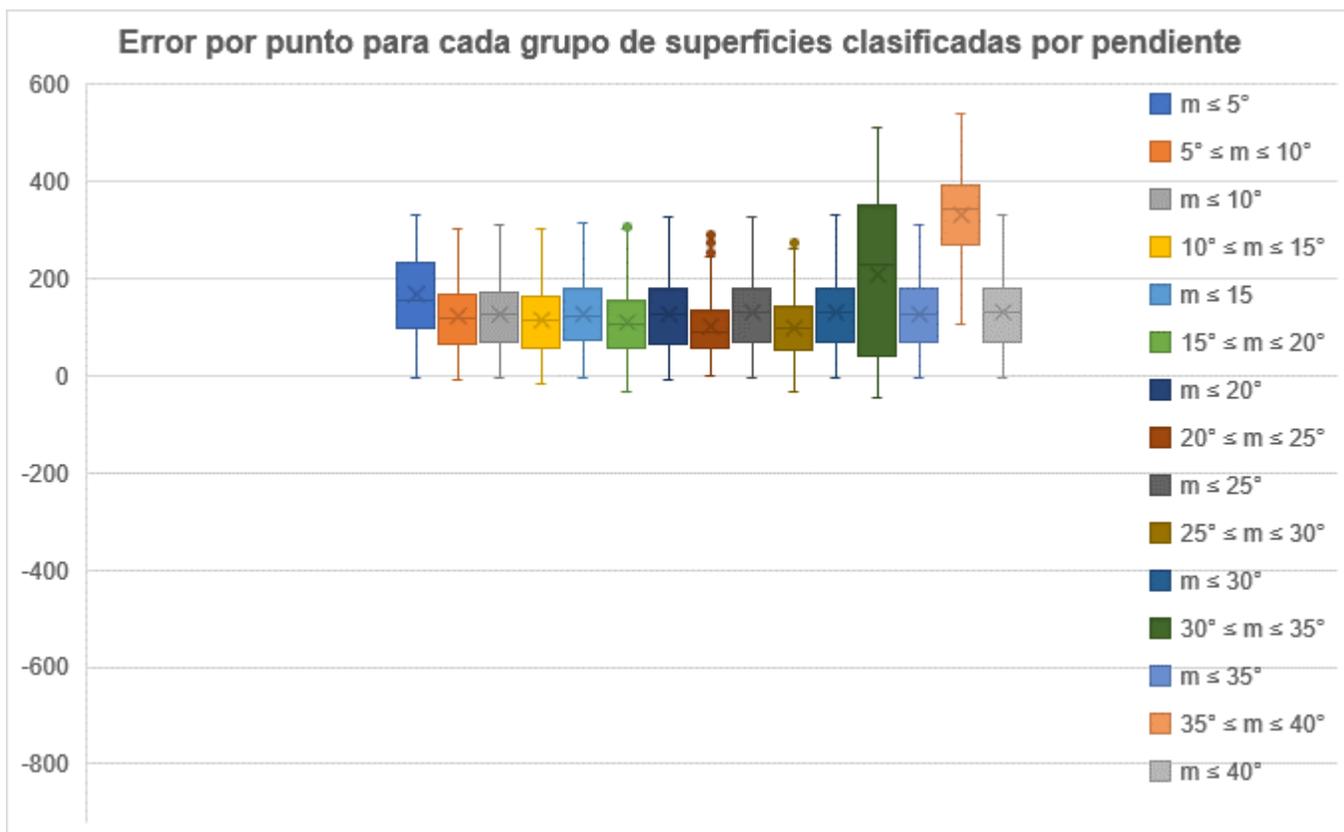
Así, para cada grupo de pendientes, aparte del mismo tipo de gráfico que muestra el MAE (Figura 36), se generó un gráfico de distribución del error, utilizando un diagrama de “Caja-Bigotes. Como se concluyó en la sección anterior, los métodos más adecuados son Spline y Kriging, y, por lo tanto, el presente análisis consideró solo estos métodos. La distribución del MAE se presenta en los gráficos de las Figuras 37 y 38.



**Figura 36:** Error absoluto medio (MAE) asociado a las superficies interpolada-extrapolada usando distintos rangos de pendientes, con el método de Spline y Kriging.

Del gráfico de la figura 36 se puede observar que el valor del MAE disminuye de 169 a 124 m para Spline y de 136 a 79 m para Kriging al pasar a pendientes mayores a  $5^\circ$ , luego se mantiene relativamente constante (entre 112 y 130 m para Spline y 79 y 112 m. para Kriging) con pendientes bajas, hasta los  $25^\circ$ . Cuando se extrapolan las superficies con pendiente mayor a  $25^\circ$  aumenta el error, sobre todo para los valores que están acotados inferior y superiormente ( $25^\circ \leq m \leq 30^\circ$ ,  $30^\circ \leq m \leq 35^\circ$  y  $35^\circ \leq m \leq 40$ ) tomando valores considerablemente más altos con el método de Kriging (172, 342 y 378 m), mientras que Spline tiene menos variabilidad. Con este último, el comportamiento es distinto al aumentar los rangos de pendientes, ya que los cambios

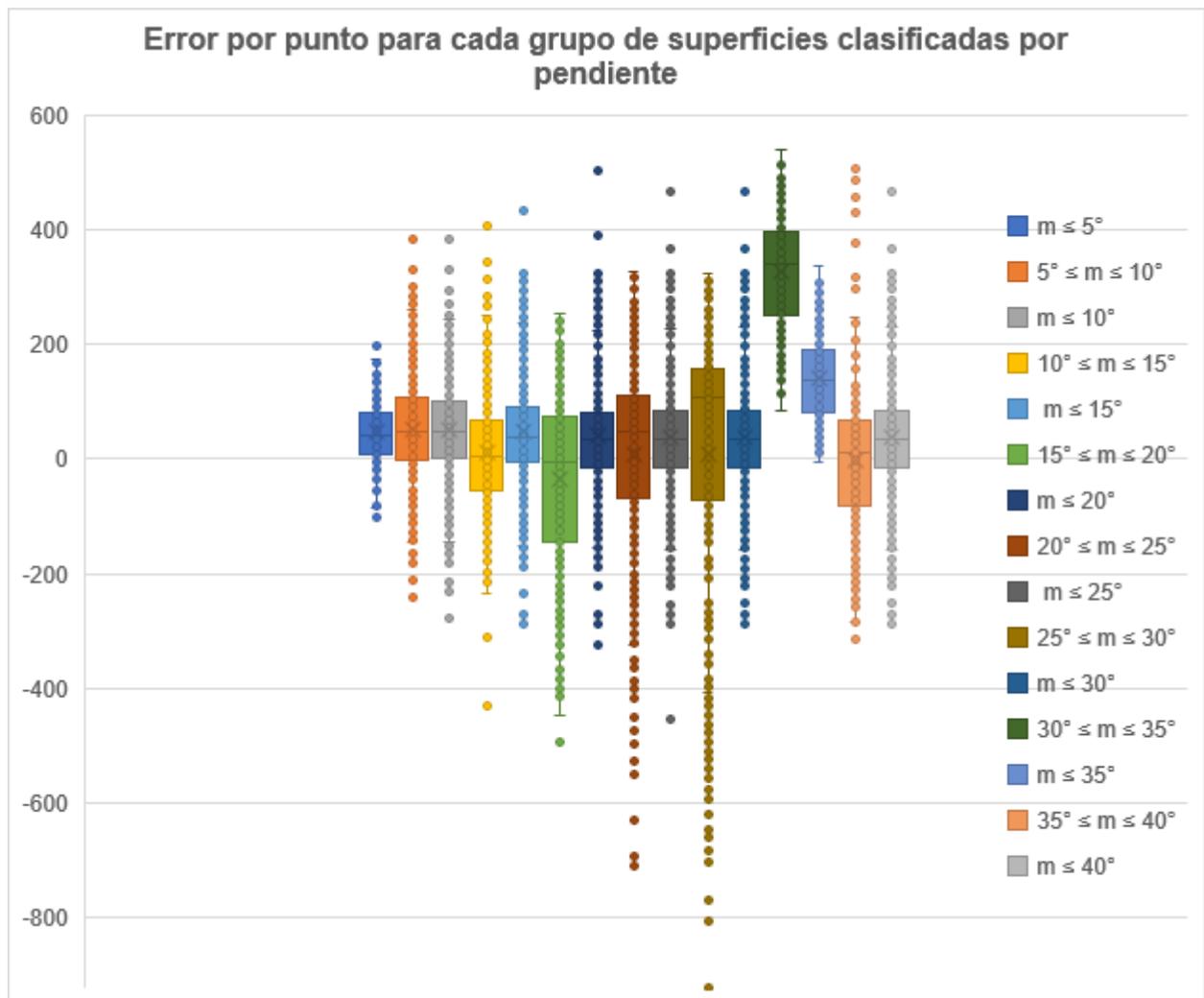
no son tan notorios como en Kriging, incluso disminuye en el rango de pendiente entre 25° y 30. Por lo tanto, se aprecia que las pendientes con menor MAE para ambos métodos son las menores a 25°. Para las pendientes bajas, Kriging en general posee un error de casi 40m. menor que Spline pero al pasar este rango, pendientes mayores a 25, se revierte la situación donde Spline tiene el menor MAE.



**Figura 37:** Distribución del MAE según rangos de pendiente con el método de Spline, Los valores menores a cero indican que el contacto quedó bajo el real, mientras que los positivos, sobre.

El gráfico de la Figura 37, generado con Spline, muestra que existe una similitud entre las diferencias de elevación para cualquier pendiente y en general se encuentran sobre cero, lo que quiere decir que el contacto interpolado para cualquier pendiente elegida esta sobre el real. También se observa que las diferencias de “z” se encuentran más cercanas a cero cuando la pendiente es acotada superior e inferiormente, a diferencia de la que está acotada solo por un extremo, encontrándose esta diferencia más lejana a cero, por lo tanto, a una mayor elevación. Con este método no se puede determinar

alguna pendiente óptima pues todas se comportan de manera similar, lo que se condice con lo mostrado en el gráfico de la Figura 36.



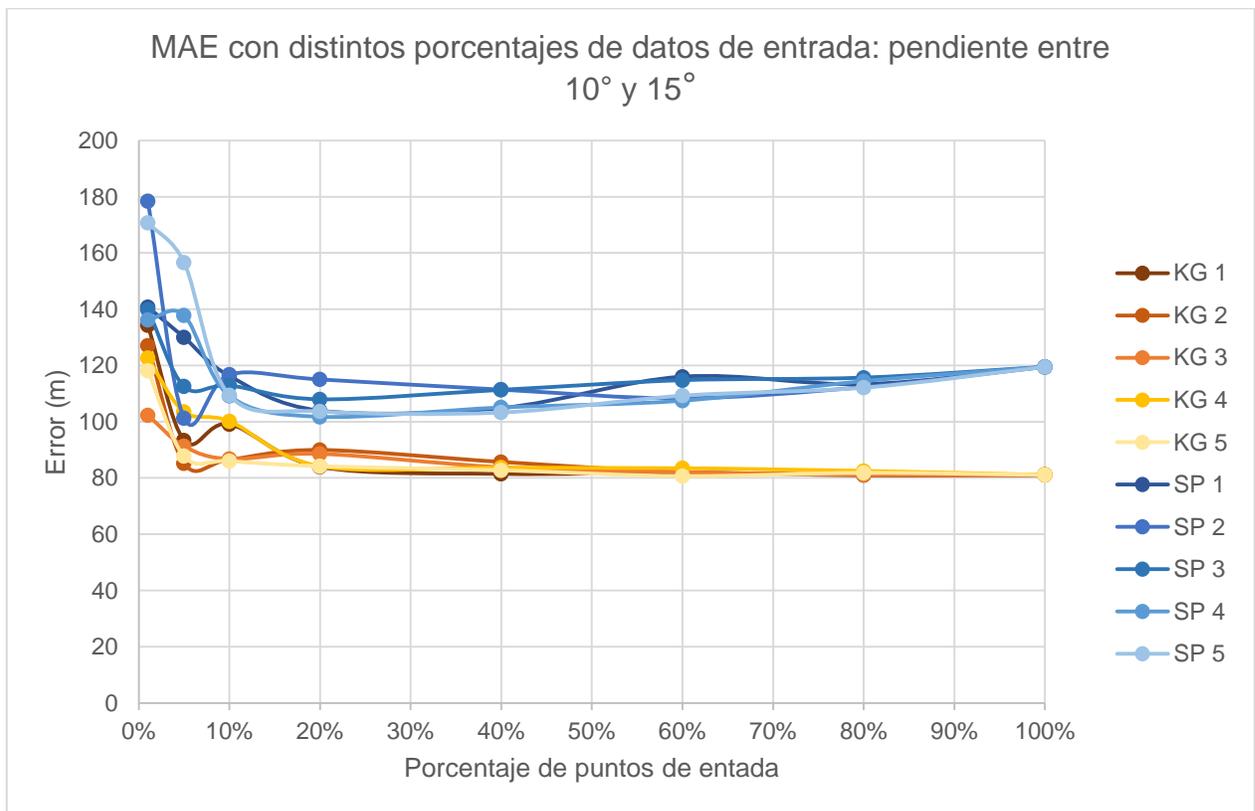
**Figura 38:** Distribución del MAE, según rangos de pendiente con el método de Kriging, Los valores menores a cero indican que el contacto quedó bajo el real, mientras que los positivos, sobre.

De acuerdo con gráfico de la figura 38, el método de Kriging posee una mayor variabilidad de sus resultados para cada selección de pendiente. Se puede observar que para los casos de pendiente acumulada ( $m \leq 5^\circ$ ,  $m \leq 10^\circ$ ,  $m \leq 15^\circ$ ,  $m \leq 20^\circ$ ,  $m \leq 25^\circ$ ,  $m \leq 30^\circ$ ,  $m \leq 35^\circ$  y  $m \leq 40^\circ$ ) las diferencias en “z” se encuentran casi en su totalidad sobre cero y sus “bigotes” son más acotados tanto para valores superiores e inferiores. Por otro lado, las pendientes que se encuentran acotadas superior e inferiormente poseen valores más variados y las cajas se encuentran más centradas. También se muestra que a medida que se eligen rangos de pendiente más altos, la superficie

modelada queda por debajo de la superficie real principalmente hasta el rango de pendiente 25°- 30°. Igualmente se puede observar que las últimas cuatro familias de pendientes presentan una distribución muy por sobre la línea cero, puesto que las mayores pendientes se encuentran a una mayor altitud (Figura 11), por lo tanto, los valores de elevación que interpola se encuentran sobre los reales. De estas observaciones se puede deducir que las superficies con una pendiente menor a 20°, se ajustan mejor al modelo real, pero hay un valor de pendiente que da un MAE bajo y la distribución de los datos de error es centrada en el valor cero, o sea sus “bigotes” son casi simétricos hacia arriba y abajo (color amarillo en Figura 38). Este valor de pendiente es la que se encuentra acotada entre 10° y 15°, con un MAE de 119 m para el método de Spline y 81 m para Kriging. Cabe destacar que este valor del MAE es considerablemente menor en comparación con las superficies geomorfológicas que dieron como resultado 143 y 172 m con Spline y Kriging respectivamente, siendo este último valor más del doble que el resultado recién obtenido con esta pendiente “óptima” encontrada.

#### **4.2.5 VARIABILIDAD DE LA SUPERFICIE EXPUESTA**

Como ya se conocen los métodos de interpolación que dan un menor error (Spline y Kriging) y la superficie con una pendiente (entre 10° y 15°) cuya proyección es cercana al contacto real, se realizó un experimento similar a lo expuesto en la Sección 4.2.1 para evaluar la variabilidad de los datos de entrada del modelamiento. Se seleccionó aleatoriamente distinta cantidad de puntos que representan la superficie expuesta. Se tomó cinco grupos aleatorios de un 1 %, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de los 9.516 puntos que representan dicha superficie y posteriormente se calculó su MAE.



**Figura 39:** Relación entre el MAE y la cantidad de puntos de entrada que representan la superficie con pendiente entre 10° y 15° (expresado en porcentaje de puntos utilizados).

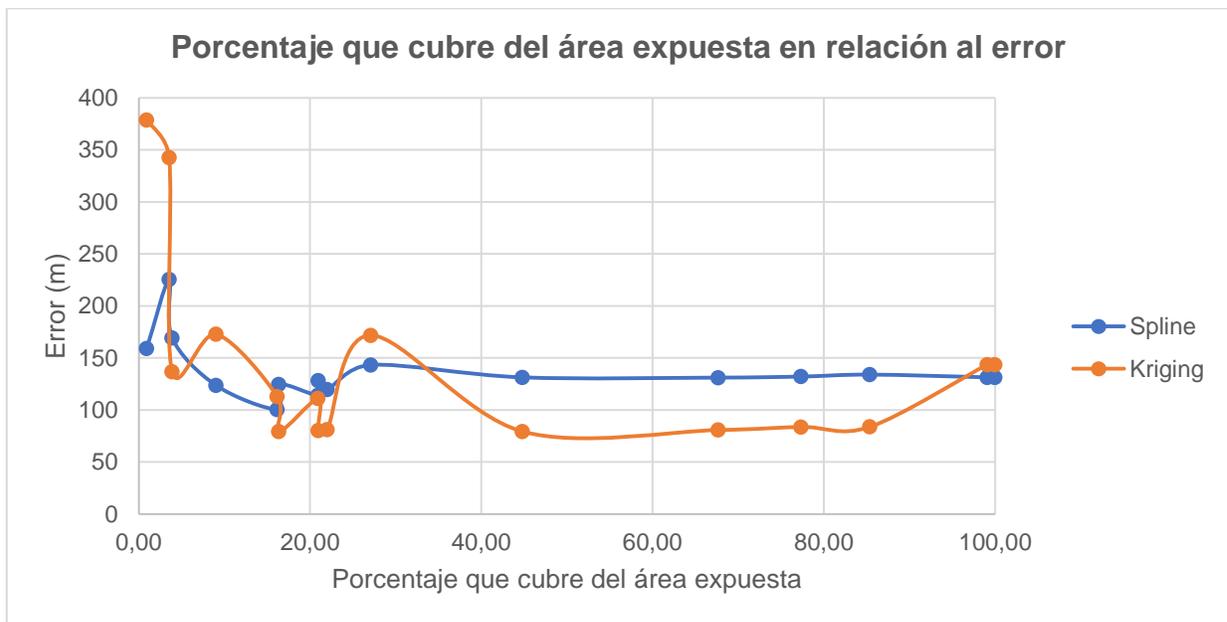
Del gráfico de la Figura 39 se puede observar que en todos los casos Kriging presenta un MAE aprox. de 20 m menor que Spline al igual que en el gráfico de la Figura 36. Existe cierta relación al aumentar la cantidad de datos de entrada, pero no es muy claro. El “quiebre” al igual que en los casos anteriores se aprecia en el 10% y el comportamiento es similar para todos los grupos aleatorios. Con el método de Kriging, si existe una disminución del MAE, con un promedio para el 10% de 92 m y con un 100% este es de 81 m. Sin embargo, con el método de Spline sucede lo contrario, hay un aumento del MAE al aumentar la cantidad de puntos de entrada, el promedio para un 10% de los sondajes es de 112 mm mientras que para el 100% es 119 m. Asimismo, cabe destacar que la diferencia del MAE con un 1% de datos con respecto al 100% de ellos no es muy grande, siendo de 34 m para Spline y 40 m para Kriging, caso muy distinto a lo ocurrido en los casos anteriores donde la esta diferencia superaba el 100%

Además, como se mostró en las Tablas 1 y 2, la cantidad de puntos de entrada representa una parte del área total expuesta, así se generó un gráfico que relaciona el área que cubre o cantidad de puntos de entrada con el error absoluto medio de cada

superficie extrapolada (Figura 40). Es posible observar que no hay una relación entre el área que cubre o cantidad de puntos de entrada y el error de la superficie extrapolada cuando esta cubre menos de un 30% de la superficie expuesta. A pesar de que mayor al 15% el comportamiento es más lineal, no se observa una clara disminución o aumento del error a medida que aumenta el porcentaje.

**Tabla 4:** Tabla donde se muestra el orden de las superficies desde las que cubren menor a mayor porcentaje del área expuesta.

| <b>Superficie</b>                     | <b>Porcentaje que cubre del área expuesta (%)</b> |
|---------------------------------------|---|
| <b><math>25 \leq m \leq 30</math></b> | 0,93  |
| <b><math>25 \leq m \leq 30</math></b> | 3,55  |
| <b><math>m \leq 5</math></b>          | 3,90  |
| <b><math>25 \leq m \leq 30</math></b> | 9,03  |
| <b><math>20 \leq m \leq 25</math></b> | 16,18   |
| <b><math>5 \leq m \leq 10</math></b>  | 16,36   |
| <b><math>15 \leq m \leq 20</math></b> | 20,92   |
| <b><math>m \leq 10</math></b>         | 20,95   |
| <b><math>10 \leq m \leq 15</math></b> | 22,00   |
| <b>S. geomorfológicas</b>             | 27,10   |
| <b><math>m \leq 15</math></b>         | 44,79   |
| <b><math>m \leq 20</math></b>         | 67,68   |
| <b><math>m \leq 25</math></b>         | 77,33   |
| <b><math>m \leq 30</math></b>         | 85,38   |
| <b><math>m \leq 35</math></b>         | 99,08   |
| <b><math>m \leq 40</math></b>         | 100   |



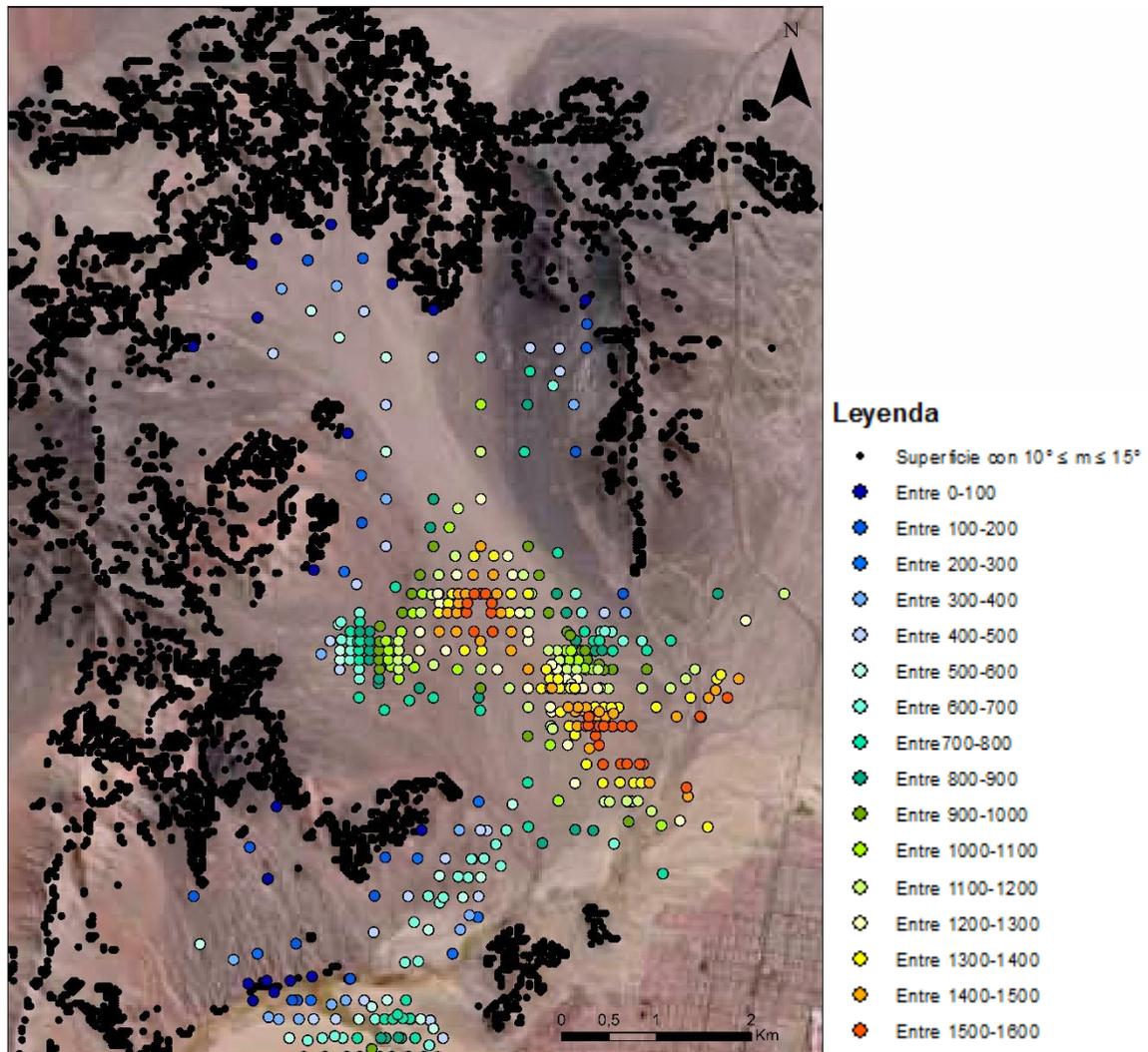
**Figura 40:** Porcentaje del área expuesta que cubre cada rango de pendiente y su MAE correspondiente.

De lo observado de los gráficos de las Figuras 39 y 40, se puede decir que no existe una relación clara y directa entre la cantidad de información de datos de entrada con el MAE, pues a pesar de que los gráficos muestran distintos tipos de información, los porcentajes en ambos casos representan una cantidad de datos de entrada o área que cubren de la zona expuesta. Por lo tanto, de ambos se puede decir que, con muy bajos porcentajes, menor a 10%, si aumenta el MAE, pero no de forma significativa, a excepción de Kriging e la Figura 40. y que a partir del 10% el MAE se mantiene con pocas variaciones, e incluso para Kriging con el mayor porcentaje (Figura 40) el MAE es considerablemente mayor. Lo que indica que la calidad de información que entrega el tipo de entrada es más importante que la cantidad.

#### 4.2.6 EFECTO DE LA DISTANCIA (BUFFER)

Se revisó el efecto de la distancia a la que se encuentra la información de la zona expuesta respecto de la predicción obtenida para la zona cubierta. Para esto se realizaron franjas (o "buffer") de 100 m de ancho desde el borde de la cuenca (o borde del sustrato mesozoico-paleógeno) hasta llegar a los 1.600 m. Estas áreas quedaron representadas por polígonos que luego fueron interceptados con los sondajes para

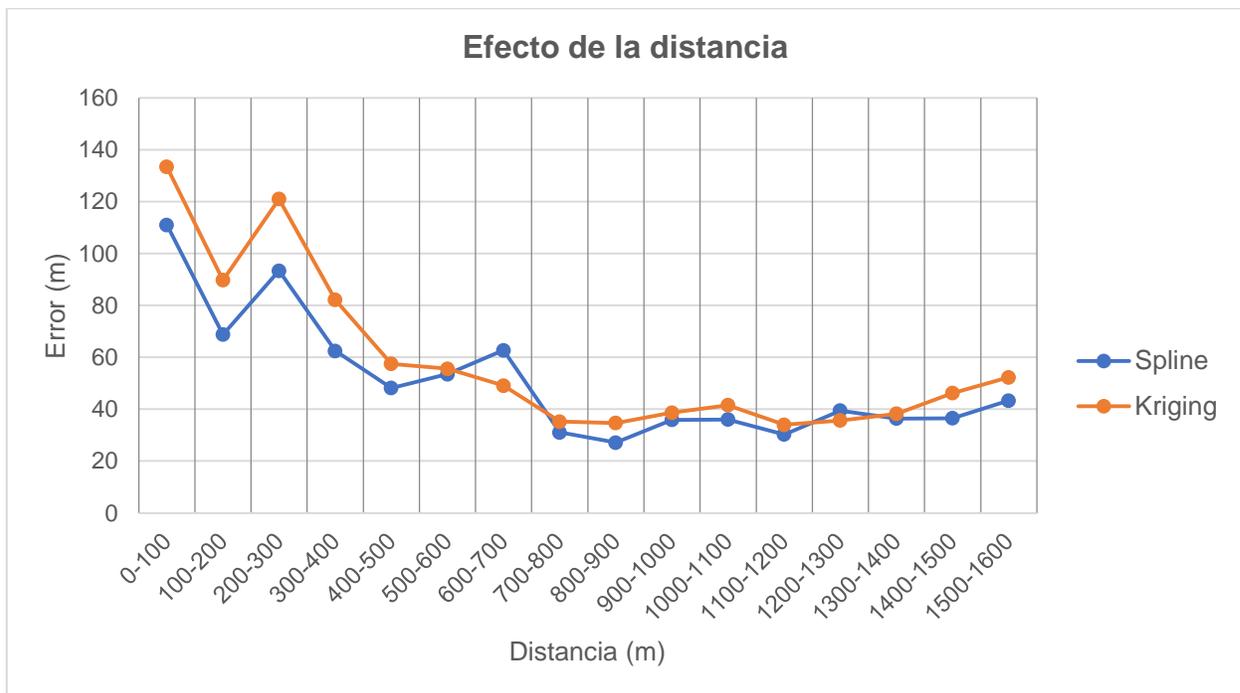
saber cuáles y cuántos entran que cada zona; cada una contiene entre 9 y 44 sondajes (Figura 40 y Tabla 5). Los sondajes más alejados del borde de la cuenca se ubican en la franja de distancia 1.500-1.600 m; por lo tanto, se crearon 16 franjas de 100 m de ancho (Tabla 5). En el área expuesta, se seleccionó la base de datos correspondiente a pendientes entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ , y con los métodos Spline y Kriging se calculó el MAE respecto a los puntos de sondaje existentes en cada franja de distancia (Figura 41).



*Figura 41: Mapa que muestra los sondajes que se encuentran cada 100m de distancia.*

**Tabla 5:** Cantidad de sondajes que contiene cada rango de distancia.

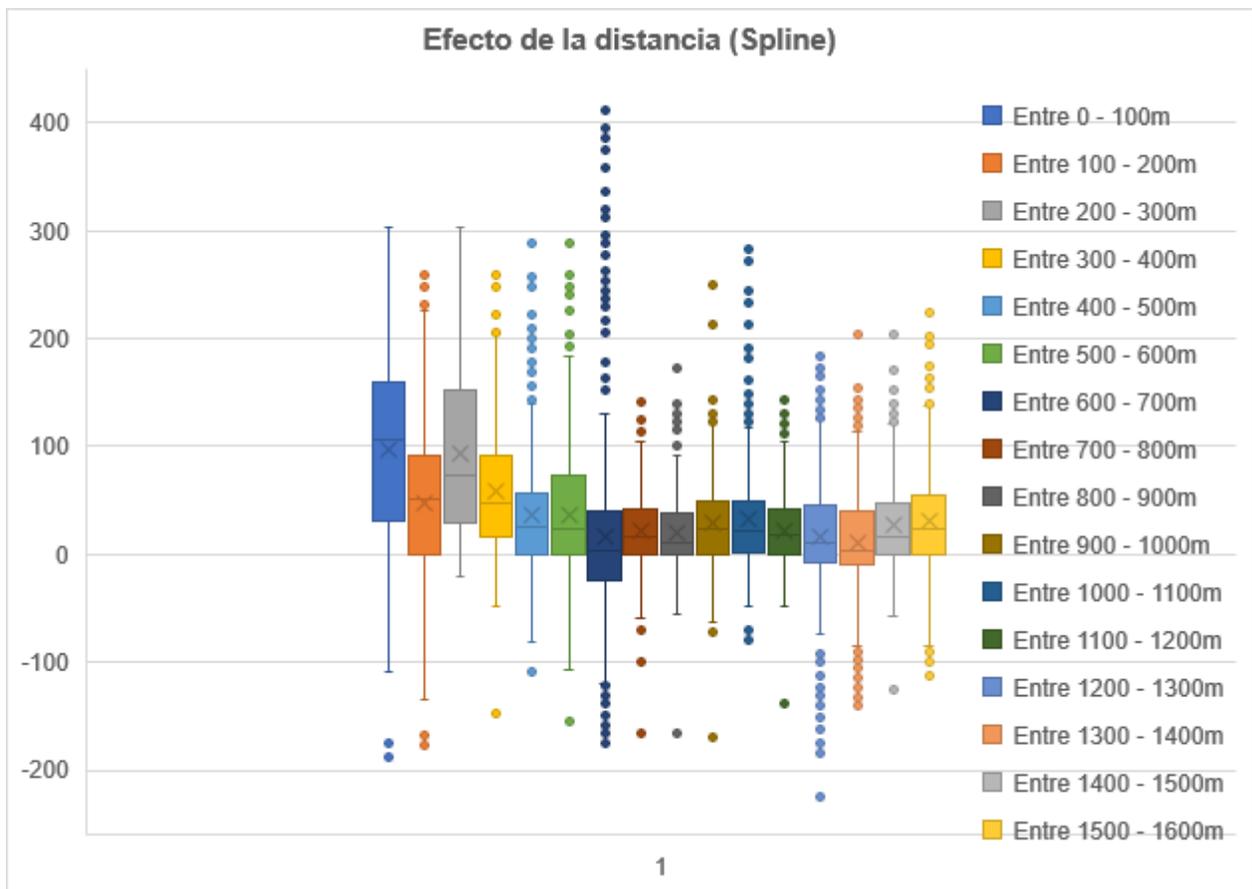
| <b>Rango de distancia (m)</b> | <b>Número de sondajes</b> |
|-------------------------------|---------------------------|
| <b>0 - 100</b>                | 21                        |
| <b>100 - 200</b>              | 16                        |
| <b>200 - 300</b>              | 9                         |
| <b>300 - 400</b>              | 15                        |
| <b>400 - 500</b>              | 24                        |
| <b>500 - 600</b>              | 20                        |
| <b>600 - 700</b>              | 40                        |
| <b>700 - 800</b>              | 36                        |
| <b>800 - 900</b>              | 29                        |
| <b>900 - 1000</b>             | 31                        |
| <b>1000 - 1100</b>            | 34                        |
| <b>1100 - 1200</b>            | 44                        |
| <b>1200 - 1300</b>            | 32                        |
| <b>1300 - 1400</b>            | 38                        |
| <b>1400 - 1500</b>            | 35                        |
| <b>1500 - 1600</b>            | 29                        |



**Figura 42:** Error absoluto medio (MAE) de la superficie interpolada-extrapolada con pendientes entre 10° y 15°, con respecto a la distancia al borde de la cuenca. Se calculó con los distintos grupos de sondajes que se encuentran en el mismo rango de distancia y utilizando los métodos Spline y Kriging.

Se observa que, con ambos métodos, a medida que aumenta la distancia a la zona expuesta, el MAE va disminuyendo, desde 110-130 m hasta un mínimo de 27 m para Spline y 34 m con Kriging, a los 800-900 m de distancia (Figura 41). Sobre 900 m de distancia, el MAE aumenta levemente, no superando los 55 m. Cabe destacar que, dentro del rango de distancia con el menor error, la cantidad de sondajes presentes es 29, que está dentro del promedio del número de sondajes en todas las franjas, es decir, este bajo error no se debe a que exista una mayor cantidad de sondajes en esa zona.

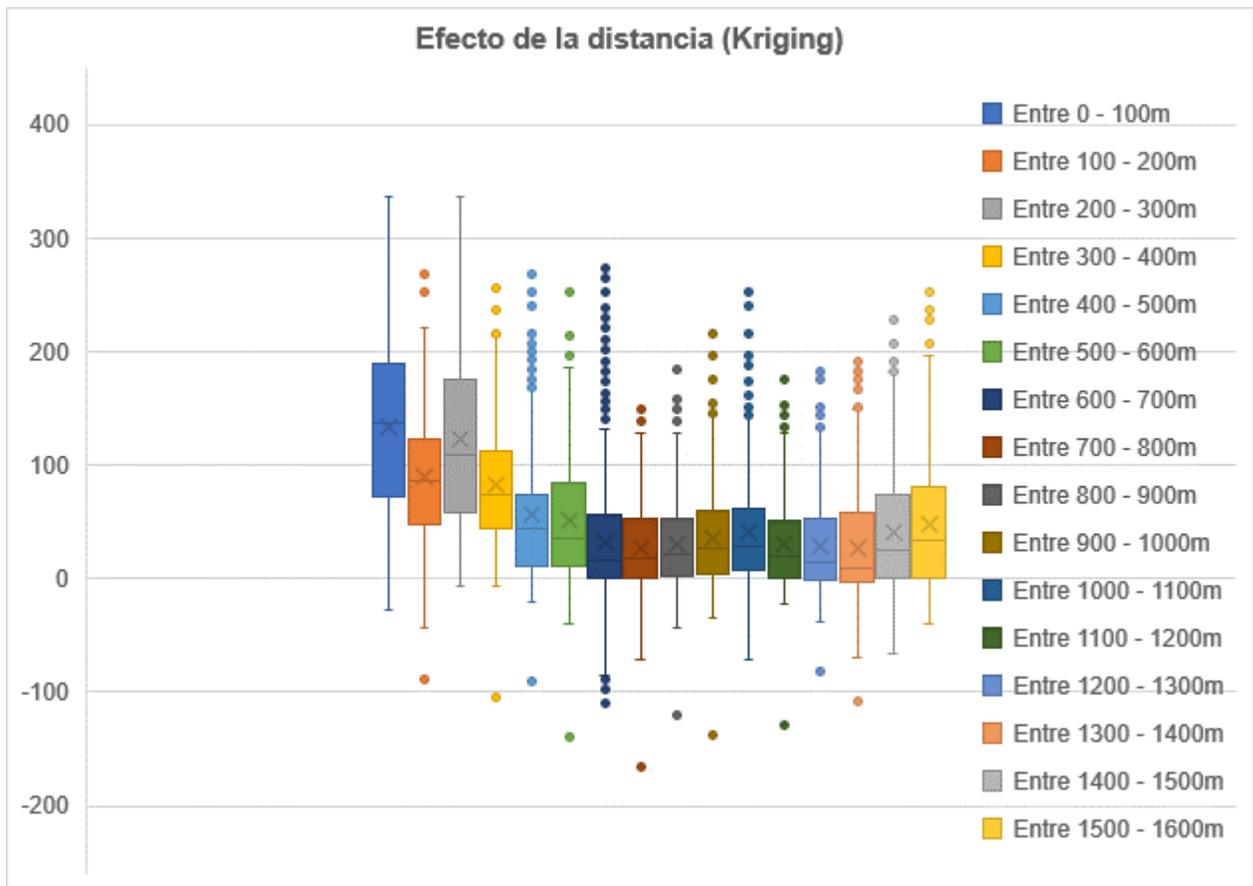
Para conocer la distribución del error en cada franja o “buffer”, se calculó su valor real-entero con los métodos indicados y se graficaron (Figura 43 y 44).



**Figura 43:** Diferencias entre el valor de la altitud real del contacto con la modelada según el método de Spline, para superficies con pendientes entre 10° y 15°. En el eje "y", se muestran las diferencias para cada coordenada (x,y) de los sondajes. Los valores menores a cero indican que el contacto quedó bajo el real, mientras que los positivos, sobre.

Del gráfico de la Figura 43 se puede observar que al igual que en las pruebas para distintas pendientes, el método de Spline interpola generalmente por sobre el contacto real, quedando la caja del esquema por sobre la línea de cero en la mayoría de los casos, aunque a diferencia del gráfico de la Figura 36 donde casi no hay valores negativos, en este caso si hay, pues al usar información proveniente de los sondajes, estos hacen que la superficie modelada sea un poco más profunda. En un comienzo los valores están más dispersos hasta los 600-700 m y luego de ese rango se acota bastante (entre 700-800 m y 800-900 m) además de tener los tres cuartiles (caja central) mucho más centrada en la línea del 0 que representa el valor del contacto real. Luego de se dispersa de nuevo entre los 900-1.000 m y 1.000.-1.100 m y vuelve acotarse en el rango 1.100-1.200 m. Este comportamiento que se tiene al pasar los 1.100 m de distancia puede ser por la forma que posee la superficie expuesta (Figura

40), pues al tener forma de herradura, se alejan de algunos bordes, pero se acercan a otros, pudiendo entregar valores erróneos del efecto que podría provocar la distancia a la cual se tiene la información.



**Figura 44:** Diferencias entre el valor de la altitud real del contacto y la modelada, según el método de Kriging, para superficies con pendientes entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ . En el eje "y", se muestran las diferencias para cada coordenada (x,y) de los sondajes. Los valores menores a cero indican que el contacto quedó bajo el real, mientras que los mayores a cero, sobre.

El gráfico de la figura 44 muestra que, hacia los extremos, la variación de las diferencias de altura es mayor, pero se acota en el centro quedando la caja más centrada entre los 700-800 m y 800-900 m y posterior a este rango de valor, el comportamiento no es tan claro (se acotan y se dispersan) al igual que con el método de Spline. A pesar de esto, estos resultados mostrados en las Figuras 43 y 44 se condice con el error medio total (Figura 42), pues los menores valores se encuentran dentro de esos rangos de distancia. Además, de los tres gráficos (Figura 42, 43 y 44) se puede observar que los sondajes que se encuentran a distancias cercanas (menor a 600 m) no estarían aportando información relevante para generar una superficie modelada cercana a la

real a diferencia de las que están en el centro de la cuenca. Debido a la forma que poseen los cerros que rodean la cuenca, no se puede considerar de manera fiable la información que aportan los sondajes que se encuentran a más de 1.000 m pues se acercan a otras zonas de la superficie expuesta.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Una de las incertidumbres de la geología es la información en profundidad, la cual se puede obtener con el uso de sondajes y/o geofísica. Por lo tanto, en este trabajo, se probó una metodología para inferir-modelar el contacto cubierto entre el basamento y la cobertura-relleno de una cuenca. Se usaron las características geomorfológicas y parámetros morfométricas presentes en la zona expuesta, donde aflora el basamento, junto con herramientas geoestadísticas predictivas. Se eligió una zona de cuenca rodeada de cerros, de  $6 \times 10 \text{ km}^2$ , en una zona de clima árido a hiperárido, y donde se cuenta con información de 495 sondajes sobre el espesor de la cobertura, donde fue posible analizar la variabilidad espacial de la superficie del contacto basamento-grava en la zona cubierta. Dicha variabilidad se estudió con cuatro métodos de interpolación (IDW, Spline, Vecino Natural y Kriging).

Para conocer el comportamiento de los métodos, se generaron superficies a partir de distinta cantidad de sondajes con varios grupos aleatorios y se calculó su diferencia (o error) respecto de la superficie definida por el 100% de datos. Esto mostró que todos los métodos se comportan de manera similar y que el MAE obtenido es similar en tres de los cuatro métodos, por lo que el método de Vecino natural presenta un error relativamente mayor, sin embargo, el primer experimento no fue suficiente para determinar el óptimo. También se puede decir que el rango del MAE obtenido para los distintos grupos aleatorios es muy variable al usar una misma cantidad de información con el uso de poco porcentaje de sondajes. Además, se determinó que con una cantidad de 10% de los sondajes el error es menor a 46 m con el método de IDW, menor a 40 m con Spline, menor a 121 m con Vecino Natural y menos de 40 m con Kriging. Es decir, con 10% de los datos de sondajes, la superficie cubierta quedaría relativamente bien definida, y no sería necesario contar con más información para modelarla-obtenerla-definirla.

Se precisó la distribución espacial de los pedimentos “escalonados” de la zona expuesta y su unión y extrapolación hacia la zona cubierta se correlacionó con el contacto basamento-grava, correspondiente a la superficie preservada antes de la depositación del relleno mioceno-holoceno. Donde el MAE obtenido del modelado a partir de las superficies geomorfológicas fue de 182, 143, 226 y 172 m con los métodos

de IDW, Spline, Vecino Natural y Kriging respectivamente. Siendo el menor error el obtenido con Spline y el mayor con Vecino Natural. Por otro lado, la tabla que muestra la desviación estándar obtenida del MAE muestra que la variabilidad disminuye considerablemente al utilizar la información de las superficies geomorfológicas más los sondeos, siendo en algunos casos más de 10 veces mayor para el caso de solo sondeos. Además, el promedio del MAE obtenido de los cinco grupos aleatorios muestra una disminución del error considerable reduciéndose con un 1% de sondeos, de 355 a 126 m para IDW, de 348 a 64 m con Spline, de 536 a 135 m con Vecino Natural y de 354 a 76 m con Kriging. Con un 5% disminuye de 111 a 55 m, 105 a 34 m, 204 a 59 m y de 103 a 38 m con los métodos de IDW, Spline, Vecino Natural y Kriging respectivamente. Lo que demuestra que estas superficies de bajo relieve ayudan considerablemente crear un modelo que se ajuste a la realidad.

En consecuencia, identificar rasgos geomorfológicos aportaría con información relevante para predecir la geometría de la superficie cubierta. Siempre y cuando tomando en consideración que se aceptaron ciertos supuestos de que estos pedimentos se formaron debido a distintos eventos degradacionales durante varios episodios logrando este “escalonamiento”, además de que los depósitos que rellenan la cuenca provienen del mismo sistema y que no existen fallas Neógenas activas. Pues si hubiese existido un aporte de material externo al sistema, el relleno de la cuenca sería de tal espesor que la interpolación-extrapolación de estas superficies no se podría considerar como correcta. En el caso que, si existiera material alóctono, se debería proceder con un estudio más acabado del relleno de la cuenca y conocer las tasas de erosión y depositación del sistema. Por otra parte, si existieran fallas Neógenas activas, debería realizarse una restitución de la superficie para llegar a la configuración previa al fallamiento, conociendo el tipo de falla, desplazamiento y acortamiento que pudieron provocar al sistema.

La selección de puntos que representan superficies con pendiente menor o igual a  $10^\circ$  tuvo una distribución muy similar a la interpolación-extrapolación con las cuatro superficies geomorfológicas, lo que sugiere que realizar una simple selección solo a partir de la pendiente también aporta información relevante para conocer el contacto,

siempre y cuando sea en zonas con condiciones tectónicas y climáticas similares al área de estudio que permitan la conservación de dichas superficies.

Por otro lado, el agregar solo un 1% o 5% de la información de sondajes disminuye drásticamente el error, acercándose bastante a la realidad, por lo tanto, no sería necesario tener una gran cantidad de sondajes, para conocer el contacto basamento-grava en la zona cubierta, incluso con 5 sondajes que equivalen al 1% disminuye considerablemente. A pesar de que esto ocurre con los cuatro métodos, existen dos que poseen un menor error, estos son Spline y Kriging.

De acuerdo con los resultados, hay casos en que Spline genera superficies que presentan un menor MAE, pero otras veces Kriging entrega mejores modelos. Estas diferencias se deben a que, por un lado, Spline genera una superficie mucho más suave que en algunos casos se puede alejar de la realidad, pues la función se ajusta a los datos pasando exactamente por los datos de entrada sin alejarse de los valores máximos y mínimos. Mientras que Kriging genera una superficie más rugosa, pero sobre todo para el caso sin sondajes o con un mínimo porcentaje de ellos, se acerca más en algunas zonas al contacto real, debido a la relación estadística que hace entre los puntos de entrada, donde asume una correlación espacial entre la distancia y la dirección de los datos. Por otra parte, del análisis realizado a partir de las superficies con distintos rangos de pendiente se pudo apreciar que las pendientes con menor MAE son las que poseen una inclinación menor a 25° con ambos métodos. Sin embargo, para las pendientes bajas Kriging posee en general errores menores, de casi 40 m menos que Spline, pero al pasar a pendientes con inclinación mayor a 25°, la situación se revierte. Lo que se podría interpretar que de acuerdo con el método matemático que posee y lo observado de los perfiles generados, Spline suaviza tanto la curva que no logra generar una diferencia notoria al crear las superficies con distintos rangos de pendiente. Por lo tanto, se podrían tomar en conjunto las dos superficies generadas con estos métodos para tener una mejor aproximación a lo que sería la realidad.

La superficie modelada se encontró siempre por sobre la real, tanto con los pedimentos como con las pendientes menor o igual a 10° al realizar la extrapolación. En base a esto, se determinó que la superficie proyectada con pendiente entre 10 y 15° es la que posee uno de los menores errores absolutos medios (MAE = 119 m con Spline y 81 con

Kriging) y que los errores se distribuyen simétricamente respecto de 0 cuando se usa Kriging.

El análisis sobre la cantidad de datos de entrada necesarios para el modelamiento mostró que no existe una clara relación entre las dos variables, MAE y cantidad de datos de entrada, lo que podría indicar que es más importante la calidad de la información en la zona expuesta que la cantidad. Que en este caso la calidad se refiere al tipo de información considerada para hacer la extrapolación que en esta situación son las pendientes, tanto para las distintas familias, como para las superficies geomorfológicas, pues una de las características indicativas de estas geformas es su baja inclinación.

Los resultados obtenidos a partir de los datos de entrada y salida han sido realizados con una selección aleatoria de estos últimos, por lo que alguna ubicación espacial en específico podría entregar información relevante que disminuyera el MAE de la superficie modelada. Por lo tanto, la distancia a la que se encuentra el sondaje podría ser relevante, por esto mismo se pudo apreciar que los sondajes ubicados a poca distancia de la zona expuesta no estarían aportando información relevante para generar la superficie modelada, a diferencia de los que están al centro de la cuenca (700-800 y 800-900 m) se encuentran los sondajes que aportan la información necesaria para que el error sea mínimo, y que corresponden a menos de un 10% de los sondajes, que en las primeras pruebas, un 10% de sondajes añadidos a los datos de entrada entregaba un MAE muchísimo mayor. Por otro lado, debido a la forma que poseen los cerros que rodean la cuenca no se pueden considerar de manera fiable la información que aportan los sondajes más alejados, pues se acercan en los otros extremos.

Los resultados muestran que esta metodología requiere de una simple y baja cantidad de datos de entrada (como la selección de puntos por pendiente), para entregar una estimación razonable del grosor de la cobertura obviamente con un cierto rango de error. Lo que podría llegar a evitar costos considerablemente sin algún impacto ambiental.

Como recomendación es necesario hacer un estudio geomorfológico de la zona y tener una comprensión de cómo se llegó y se formó la distribución actual, en este caso a la presencia de pedimentos para realizar una metodología similar a esta. Pues si la

formación y preservación de lo que se encuentra bajo superficie fuera afectado por agentes externos, como el aporte materiales alóctonos a la cuenca o la presencia de fallas con actividad reciente, la proyección de estos pedimentos no sería la correcta. No obstante, si se tuviera la información de las tasas de erosión y depositación o información del movimiento que ha tenido la falla, este inconveniente al momento de usar esta metodología se podría solucionar de manera sencilla.

Este es un segundo experimento donde se aplica una metodología predictiva para el espesor de cobertura. Es recomendable probar en otras áreas, con un clima distinto donde se conserven geformas similares y que sea posible tener información de sondajes para poder determinar errores. Esta comparación es relevante pues los métodos elegidos si reflejan y proyectan las características de las superficies descubiertas, con una misma tendencia general, pero con un inevitable grado de incerteza.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Alpers, C., y Brimhall. G., 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: Evidence from supergene mineralization at La Escondida: Geological Society of America Bulletin, v. 100, p. 1640-1656.

Bosque Sendra, J 2000. Sistemas de Información Geográfica, Ediciones Rialp, Madrid.

Bouzari, F. & Clark, A. 2002. Anatomy, evolution, and metallogenic significance of the supergene orebody of the Cerro Colorado porphyry copper deposit, I Región, Northern Chile. Economic Geology, 97, 1701-1740.

Burbank, Douglas W y Anderson, Robert S, 2001. Tectonic geomorphology. Blackwell Science.

Clark, A.H., Tosdal, R.M., Farrar, E., and Plazolles, V.A., 1990, Geomorphologic environment and age of supergene enrichment of the Cuajone, Quellaveco, and Toquepala porphyry copper deposits, southern Peru: Economic Geology, v. 85, p. 1604–1628.

Clark, M. K., Royden, L. H., Whipple, K. X., Burchfiel, B. C., Zhang, X y Tang, T., 2006. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau. Journal of Geophysical research, Vol. 111.

Cooke, R.U., 1970. Stone pavement in deserts. Geog., 60: 560 – 77.

Dilles, J. H.; 1999. The Geology of the El Abra Area. Informe interno Codelco. 29 p., 1 mapa geológico digital a escala 1:25.000.

Dilles, J. H.; 2008. The Geology of the Fortuna Granodiorite Complex and implications for porphyry copper exploration. Informe interno Codelco. 63 p., 3 mapas digitales a escala 1:25.000.

Dohrenwend, J. C. and Parsons, A.J., 2009. Pediment in Arid Environments. In Abrahams, A.D. and Parsons, A.J., Eds., Geomorphology of Desert Environments, 2nd Edition, Springer, New York, 377 – 411.

Dunai, T.J., González, G. & Juez-Larré, J. 2005. Oligocene–Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33, 321-324.

Evenstar, L., Hartley, A., Stuart, F., Mather, A., Rice, C. & Chong, G. 2009. Multiphase development of the Atacama Planation Surface recorded by cosmogenic  $^3\text{He}$  exposure ages: Implications for uplift and Cenozoic climate change in western South America. *Geology*, 37, 27–30.

Franke, R. 1982. Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. *Computer and Mathematics with Applications*. Vol. 8. Nº 4. Pág. 273–281. Gran Bretaña.

Fuentealba, J.; 2005. Geología de la zona sur de la Sierra de Moreno. Informe de memoria de título, interno, Exploraciones Mineras S.A., Codelco. 56 p., 16 figs., 4 anexos, 1 mapa y 5 perfiles.

Fuentealba, J.; 2006. Geología del Complejo plutónico Sierra de Moreno, segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria de título, Dpto de Geología, Universidad de Chile, 77 p.

Gómez, I.; 2006a. Geología de la Sierra Quenante, Región de Antofagasta, Norte de Chile. Informe de memoria de título, interno, Exploraciones Mineras S.A., Codelco. 58 p., 5 figs., 8 anexos, 3 mapas y 5 perfiles.

Gómez, I.; 2006b. Anatomía del Complejo Plutónico Quetena: implicancias petrogenéticas. Memoria de título, Dpto. De Geología, Universidad de Chile. 63 p.

González, F. 2015. Modelado de superficies cubiertas en el borde occidental de la Depresión Central del Norte de Chile a partir de la morfometría del paisaje adyacente de la Cordillera de la Costa. Memoria de título. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Hartley, A. & Chong, G. 2002. A late Pliocene age for the Atacama Desert. Implications for the desertification of Western South America. *Geology*, 30, 43-46.

Houston, J. & Hartley, A. 2003. The Central Andean west slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyperaridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology*, 23, 1453-1464.

Jordan, T., Blanco, N., Dávila, F., Tomlinson, A., 2006. Sismoestratigrafía de la Cuenca Calama (22° - 23° LS.), Chile. Congreso Geológico Chileno, N°. XI, Actas, Vol 1, pp. Universidad Católica del Norte, Antofagasta.

Kober, F., Schlunegger, F., Zeilinger, G. & Schneider, H. 2006. Surface uplift and climate change: The geomorphic evolution of the Western Escarpment of the Andes of northern Chile between the Miocene and present. In: Willett, S.D., Hovius, N., Brandon, M.T. & Fisher, D. (eds) *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*. Geological Society of America, Special Papers, 398, 75–86.

Lamb, S., y Davis, P., 2003. Cenozoic climate change as a possible cause for the rise of the Andes. *Science*; vo.425; p.792- 797.

Lira, G. 1989. Geología del área preandina de Calama, con énfasis en la estratigrafía y paleotopografía del Mesozoico, 22° a 24°40' latitud sur, Región de Antofagasta, Chile. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica: 233p.

Marinovic, N. y Lahsen, A., 1984, Hoja Calama, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 58, mapa escala 1:250.000, Santiago.

Maune, D. F., S. M. Kopp, C. A. Crawford and C. E. Zervas, 2001, Digital elevation model technologies and applications: the Dem user's manual, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Maryland, pp. 1-34.

Mitas, L. y H. Mitasova. 1988. General Variational Approach to the Interpolation Problem. *Computer and Mathematics with Applications*. Vol. 16. N° 12. Pág. 983–992. Gran Bretaña.

Montaño, J.M. 1976. Estudio geológico de la zona de Caracoles y áreas vecinas con énfasis en el Sistema Jurásico, provincial de Antofagasta, II Región, Chile. Tesis de Doctorado (Inédito), Departamento de Geología, Universidad de Chile: 169 p.

Mortimer, C., and Saric, N., 1975, Cenozoic studies in northernmost Chile: *Geologische Rundschau*, v. 64, p. 395–420.

Mortimer, C., 1980, Drainage evolution of the Atacama Desert of northernmost Chile: *Revista Geológica de Chile*, no. 11, p. 3–28.

Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I., Cuitiño, L.; 1993. Estudio Geológico – Estructural de la Cordillera de Domeyko entre Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe registrado IR-93-04, 282 p., 3 mapas escala 1:100.000. Santiago, Chile.

May, G. 1997. Oligocene to Recent evolution of the Calama Basin, northern Chile. Ph. D. Thesis (Unpublished), University of Aberdeen: 274 p. United Kingdom.

May, G.; Hartley, A.J.; Chong, G; Stuart, F.; Turner, P.; Kape, S.J. 2005. Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. *Revista Geológica de Chile* 32 (1): 33-58.

Oliver, M. A. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems". *International Journal of Geographic Information Systems* 4: 313–332. 1990.

O'Sullivan, D. and D. J. Unwin, 2003. *Geographic Information Analysis*, Wiley, Nueva Jersey.

Pardo, R., Kovacic, P., Peigna, P., Faundez, P., Alcota, H. & Rojo, J., 2004; Informe cierre de exploración avanzada Cluster Roki: Genoveva – Quetena – Toki Vol. 1. Informe interno EM S.A.

Pérez, F.; 2005. Geología del extremo sur de la Sierra Moreno. Informe final de memoria de título, interno, Codelco. 86 p., 16 figs., 3 anexos, 1 mapa y 5 perfiles.

Proffett, J. M.; Dilles, J. H.; 2007. SHRIMP-RG ion microprobe U-Pb age determinations of intrusive rock units northeast of the Chuquicamata mine, Chile. Informe interno Codelco, 15 p.

Quang, C.X., Clark, A.H., Lee, J.K.W. & Hawkes, N. 2005. Response of supergene process to episodic Cenozoic uplift, pediment erosion, and ignimbrite eruption in the porphyry copper province of Southern Peru. *Economic Geology*, 100, 87–114.

Rech, J.A., Currie, B.S., Michalski, G. & Cowan, A.M. 2006. Neogene climate change and uplift in the Atacama Desert, Chile. *Geology*, 34, 761-764.

Rutland, R., Guest, J., Grasty, R. 1965. Isotopic age and Andean uplift. *Nature*, N° 208 p. 677 - 678.

Sibson, R. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation", capítulo 2 de *Interpolating Multivariate Data*. John Wiley & Sons: Nueva York, 1981, 21–36.

Sillitoe, R., Mortimer, C., Clark, A., 1968. A chronology of landform evolution and supergene mineral alteration, southern Atacama Desert, Chile. *Transaction of the Institution of Mining and Metallurgy*.

Sillitoe, R. & McKee, E. 1996. Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province. *Economic Geology*, 91, 164-179.

Small, E.K, y Anderson, R.A., 1998, Pleistocene relief production in Laramide mountain ranges western United States: *Geology*, v. 26, p. 123-136.

Strudley, M. W., Murray, A. B., Haff, P.K., 2007. The emergence of pediments, tors, and piedmont junctions from bedrock weathering – regolith thickness feedback. *Geology* 34: 805-808.

Tapia, M. 2009. Relación espacial, temporal y genética entre formas de relieve y paleosuelos del Cenozoico superior, y depósitos de Cu supérgeno en el Distrito Minero de Chuquicamata. Memoria de Título. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

Tomlinson, A.; Blanco, N.; Maksaev, V.; Dilles, J.; Gunder, A.; Ladino, M. 2001. Geología de la precordillera andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20°30' – 22°30' S). Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Informe Registrado R-01-20, 2 Vol.: 444 p., 20 mapas escala 1:50.000. Santiago.

Tomlinson, A.; Blanco, N.; 2008. Geología de la Franja El Abra-Chuquicamata, II Región (21°45'-22°30' S). Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). Informe registrado IR-08-35, 196 p., 5 mapas escala 1:50.000. Santiago, Chile.

Tomlinson, A., Blanco, N. y Dilles, J., 2010, Carta Calama, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Preliminar N° 8, mapa escala 1:50.000.

Vergara, H., 1978a, Cuadrángulo Quehuita y sector occidental del cuadrángulo volcán Miño, Región de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 32, mapa escala 1:50.000, 44p., Santiago.

Watson, D. F. y G. M. Philip. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation". *Geoprocessing* 2:315–327. 1985.

Watson, D. *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Pergamon Press: Londres, 1992.