



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Análisis geostatístico de la distribución del muestreo para el control de  
calidad de las vías terrestres

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

**Presenta:**  
José Juan Puga Olvera

**Dirigido por:**  
M. C. Omar Chávez Alegría

**SINODALES**

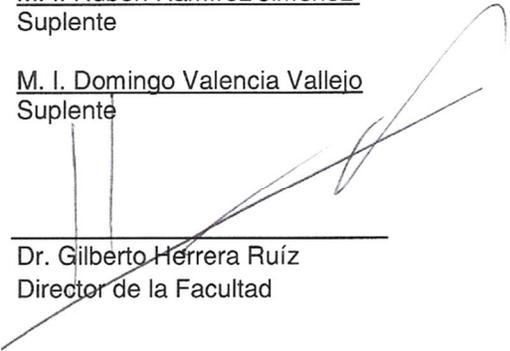
M. C. Omar Chávez Alegría  
Presidente

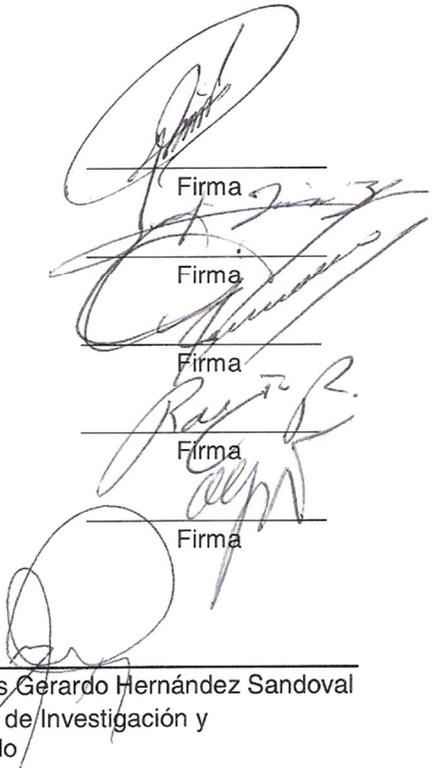
Dr. Saúl Obregón Biosca  
Secretario

M. I. José Antonio Gómez López  
Vocal

M. I. Rubén Ramírez Jiménez  
Suplente

M. I. Domingo Valencia Vallejo  
Suplente

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Gilberto Herrera Ruíz  
Director de la Facultad

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Junio 2011  
México

## RESUMEN

La compactación es un proceso mecánico para mejorar la estabilidad y aumentar la resistencia de los materiales usados en la construcción de pavimentos. El propósito es que los efectos del clima y las cargas vehiculares no afecten las condiciones de seguridad y funcionalidad de la carretera. La verificación se realiza a través de un muestreo en la superficie del tramo de pavimento construido, el problema estriba en determinar el número y ubicación de calas para extraer material que sea representativo y analizarlo, todo esto, sujeto a la normativa dictada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Este trabajo se basa en establecer el número y localización espacial de muestras con base en lo que se establece en la norma de uso actual M-CAL-1-02/01, después se genera un nuevo modelo de localización estableciendo en el criterio realizar por lo menos un punto de control en intervalos de 50 metros de distancia, sin cruces entre rangos. A los dos métodos de localización se les realiza un proceso de análisis geoestadístico mediante el método de interpolación denominado kriging ordinario, con la finalidad de observar la distancia adecuada para que el muestreo pueda ser considerado representativo del tramo de camino estudiado. Con base en los resultados obtenidos, es factible mejorar el criterio de ubicación espacial de los puntos de muestreo, lo cual a largo plazo impactará en la calidad de la estructura de pavimento y por tanto de las vías terrestres en su conjunto.

Palabras clave: Geoestadística, compactación, kriging ordinario, normativa.

## SUMMARY

Compaction is a mechanical process to improve stability and increase the resistance of the materials used in pavement construction. The purpose is to avoid the effects of weather and vehicular loads on the safety and functionality of the road. Verification is accomplished through sampling at the surface of the built pavement section. The main problem is the determination of the number and location of test samples in order to extract representative pieces for later analysis; all of this under the norms issued by the Communications and Transportation Secretary (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). This study is based on the number and spatial location of samples according to the current norm M-CAL-1-02/01, then, a new model for locating samples is proposed, which considers the criteria of taking at least one control point in 50 meters intervals, without crossing between ranges. The two methods of location are subjected to a geostatistical analysis process through an the interpolation method known as ordinary kriging, with the purpose of determining the proper distance so that sampling can be considered representative of the studied road reach. Based on the results obtained, it is possible to improve the criterion of spatial location of sampling points, which in the long term will have an impact on the quality of the pavement structure and therefore the roads as a whole.

Keywords: Geostatistics, compaction, ordinary kriging, normative.

## DEDICATORIAS

A todos y cada uno de mis seres queridos, amigos y familiares que viven en México o residen fuera, sepan que siempre estuvieron cerca de mí, mostrándome su apoyo y brindándome su cariño. Ya que todos son parte importante de mi vida y participes de este logro.

### **En memoria**

Alex Olvera  
Rodrigo Puga Ríos  
Efraín Puga Jiménez  
Ing. Israel Gustavo Bucio Paredes

## **AGRADECIMIENTOS**

Al M.C. Omar Chávez Alegría, así como también al Dr. Saúl Obregón Biosca, por su disposición de compartir experiencia y orientarme en un ambiente estupendo de trabajo y aprendizaje, gracias por brindar siempre una actitud de respeto, confianza y ayuda.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a todos sus docentes, compañeros y colegas de clase.

A mis sínodos, por sus consejos, observaciones y comentarios.

A las personas que junto conmigo laboran en la Unidad General de Servicios Técnicos del Centro SCT Querétaro.

# ÍNDICE

## Contenido

	Página
1 INTRODUCCIÓN	9
2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	13
2.1 Descripción del Problema.	13
2.2 Justificación.	14
2.3 Alcances.	15
2.4 Control de calidad.	19
2.5 Geoestadística.	20
3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DEL TRABAJO	23
Hipótesis.	23
Objetivos.	23
4 MARCO TEÓRICO	25
4.1 La compactación en las vías terrestres.	25
4.1.1 Método de control y verificación de calidad vigente.	26
4.1.2 Fenómeno Determinístico.	
4.1.3 Fenómeno Estocástico.	27
4.1.4 Elementos de estadística.	28
4.1.5 Técnicas Geoestadísticas.	33
5 METODOLOGÍA	43
5.1 Aplicando la Normativa.	47
5.2 Muestreo propuesto.	49
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
6.1 Superficie Geoestadística.	53
6.2 Parámetros de medición.	54
6.3 Análisis estadístico.	55
6.3.1 Grado de compactación.	56
6.4 Análisis Geoestadístico de las superficies.	58
6.4.1 Condiciones del análisis	59
6.5 Características y limitaciones de la información disponible.	69
7 CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA REVISADA	75

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
Tabla 1. Tabla de números aleatorios, columnas 01 a 14 de 28. Fuente Normativa SCT (2010 Norma M-CAL-1-02/01).	45
Tabla 2. Tabla de números aleatorios (continuación), columnas 15 a 28 de 28. Fuente Normativa SCT (2010 2010 Norma M-CAL-1-02/01).	46
Tabla 3. Tabla de números aleatorios seleccionada de la Normativa para determinar los valores A y B.	48
Tabla 4. Selección del número y ubicación de las muestras.	49
Tabla 5. Propuesta de selección del número y ubicación de las muestras.	50
Tabla 6. Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos. Fuente SCT (2010 Norma N-CMT-4-02-001/04).	54
Tabla 7. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa.	55
Tabla 8. Distribución del muestreo establecido al aplicar el método propuesto.	55
Tabla 9. Parámetros estadísticos del atributo.	57
Tabla 10. Parámetros estadísticos de las distancias de correlación.	66
Tabla 11. Parámetros estadísticos de la media de predicción de error.	66
Tabla 12. Parámetros estadísticos de la distancia de correlación (atributos reales).	68
Tabla 13. Parámetros estadísticos de las medias de error de predicción (atributos reales).	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
<b>Figura 1.</b> Sección transversal de un terraplén. Adaptado de la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) N-CTR-CAR-1-01-009/00	16
<b>Figura 2.</b> Nombres comunes de las capas usadas en una carretera. Las terracerías se componen del: cuerpo de terraplén, subyacente y subrasante. El pavimento se coloca sobre este conjunto de capas.	17
<b>Figura 3.</b> Nombres de las capas que conforman la estructura de pavimento flexible, rígido y mixto.	18
<b>Figura 4.</b> Fenómeno Determinístico, representado por un modelo de manera esquemática. Fuente, Silva (2009), en él se muestra que dado un valor de entrada se obtiene un único valor de salida cada vez que se corre el modelo.	27
<b>Figura 5.</b> Fenómeno estocástico representado por un modelo de manera esquemática Silva (2009), en él se muestra que dado un valor de entrada se obtiene una respuesta diferente cada vez que se corre el modelo.	28
<b>Figura 6.</b> Ejemplo de la representación gráfica de la frecuencia de datos de un error medido (Salinas, 2009).	32
<b>Figura 7.</b> Representación esquemática de la ubicación espacial de los puntos donde previo un análisis se conoce el atributo, dentro del espacio de un tramo analizado, los números al lado de los puntos oscuros (Z) solamente indican el número correspondiente de la prueba de la cual se obtuvo el grado de compactación.	34
<b>Figura 8.</b> Parámetros del semivariograma o Variograma.	38
<b>Figura 9.</b> Representación gráfica del tramo y la ubicación de los sitios donde se realizarán las muestras, según la Normativa.	49
<b>Figura 10.</b> Representación gráfica del tramo y la ubicación de los sitios donde se realizarán las muestras, según la propuesta.	51
<b>Figura 11.</b> Orientación de las superficies analizadas.	53
<b>Figura 12.</b> Gráfica donde se muestra la dispersión de los puntos de muestreo dentro de un tramo (superficie) de 600 metros de longitud y 11 metros de ancho, según la Normativa SCT.	56
<b>Figura 13.</b> Gráfica donde se muestra la dispersión de los puntos de muestreo dentro de un tramo (superficie) de 600 metros de longitud y 11 metros de ancho, según método propuesto.	56

<b>Figura 14.</b> Representación gráfica de la ubicación de los puntos de muestreo dentro de la superficie por analizar con geoestadística. Para el caso del muestreo propuesto.	58
<b>Figura 15.</b> Representación gráfica de la ubicación de los puntos de muestreo dentro de la superficie por analizar con geoestadística. Para el caso de la Normativa SCT.	59
<b>Figura 16.</b> Mapa de la superficie del muestreo según Normativa SCT. Analizada con	60
<b>Figura 17.</b> Mapa de la superficie del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.	61
<b>Figura 18.</b> Mapa del error estándar, de la superficie del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.	62
<b>Figura 19.</b> Mapa del error estándar, de la superficie del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.	62
<b>Figura 20.</b> Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en el recuadro se puede observar la distancia transversal dentro de la elipse de representación.	64
<b>Figura 21.</b> Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en el recuadro se puede observar la distancia longitudinal dentro de la elipse de representación.	64
<b>Figura 22.</b> Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en el recuadro se puede observar el radio de representación.	65
<b>Figura 23.</b> Comparación del Error de predicción de la Normativa y la Propuesta (atributos propuestos).	67
<b>Figura 24.</b> Comparación del Error de predicción de la Normativa y la metodología Propuesta (atributos reales).	69

## 1 INTRODUCCIÓN

En enero de 1967, George B. Sherman et al. presentan un análisis estadístico para la compactación de terraplenes, bajo la conducción del estado de California en Estados Unidos, la Agencia de Transporte y Negocios, el Departamento de Trabajos Públicos, la división de Carreteras y el Departamento de Investigación de Materiales de ese estado, en un reporte preparado en cooperación con el Departamento de Transporte Federal de Carreteras. Éste estudio es la punta de lanza del presente trabajo ya que en él se presenta por primera vez un estudio con análisis estadístico para obtener la distribución óptima del control de calidad de la compactación de terraplenes.

En el reporte se menciona que existen variaciones en la compactación dependientes principalmente de las pruebas de control, pero que la dispersión de los resultados es prácticamente insignificante en los tramos de prueba estudiados. El análisis estadístico fue relevante en el estudio ya que las normas AASHO por sus siglas en inglés (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras del Estado), las cuales, en aquel momento incluían además de otras cosas, el control de calidad de las diferentes vías terrestres.

El reporte propone además una serie de procedimientos para que se genere un control de calidad adecuado, entre ellos la Oficina Pública de Vialidades (Bureau of Public Roads), menciona que ***por lo menos 50 muestras deberán ser ubicadas al azar para cada proyecto***, esta consideración la toma en cuenta Rico y Del Castillo (1979), los autores hacen referencia a las normas AASHO dentro del capítulo de compactación, diciendo que para obtener un control de calidad de la compactación adecuado se deberá obtener la longitud del tramo a estudiar (L) y a éste se le dividirá entre 50 con el fin de obtener el número de muestras que se requieren para hacer un estudio confiable.

Sherman et al., (1967), también menciona que ***por cada sitio de estudio se deberán tomar por lo menos dos muestras en cada punto a estudiar (muestras gemelas)***, lo cual sin lugar a dudas la mayoría de las veces no se realiza en campo. Además de lo anterior, también se comenta:

- El análisis de calidad debe ser independiente de las muestras que se obtienen para la verificación de la compactación en campo.
- Sólo los materiales aceptados por el ingeniero residente (encargado de obra) para su compactación podrán ser analizados.
- Cuando sea necesario, las normas locales deberán ser empleadas para criterios de aceptación o rechazo.
- Las muestras deberán de tomarse, lo más cercanas posible, bajo condiciones normales de campo, y con el criterio de cada supervisor.
- Los análisis deben contemplar la varianza, incluyendo; la varianza inherente en el muestreo, la varianza entre muestreos en muestras gemelas, y la varianza inherente en el material o proceso de compactación.
- Siempre que sea posible, los métodos de muestreo marcados por las normas ASTM ó ASSHO deberán ser empleados. De ser necesario se podrá hacer uso de un método local similar al de las normativas planteadas.

Los anteriores puntos no sólo demuestran que el reporte tiene un amplio rango de acción, tomando en cuenta criterios empíricos y teóricos en su conjunto, sino que también muestra conveniente seguir estudiando y actualizando la norma mexicana actual a fin de mejorar lo contenido en los Libros CTR. Construcción, CSV. Conservación y CMT. Características de los Materiales, así como los Manuales del Libro MMP. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, específicamente en el libro CAL. Control y Aseguramiento de Calidad, parte 1. Control de Calidad, Título 02. Criterios Estadísticos de Muestreo (M CAL 1 02/01), en el que se hace legible que la

norma empleada por los Americanos en el año 1967 es vigente actualmente en las normas mexicanas y no sólo eso sino se quita toda comprensión de sentido común y se enfoca en tablas de números aleatorios, lo cual no sólo deforma la realidad de cada estructura analizada, sino que degenera la libertad de decisión del individuo que controla y decide que el control de calidad es adecuado.

Por todo lo anterior, el presente trabajo pretende revisar con base en el método estadístico tipo Kriging ordinario, las posibles implicaciones de utilizar a la letra la normativa antes mencionada, además se propone una nueva metodología (método por secciones), la cual será evaluada no sólo por los investigadores, sino por el público en general, al cual afecta directamente la calidad de la estructura de pavimento por la cual transita actualmente. Además de lo anterior se integran en este documento, las consideraciones contempladas en un inicio por la normativa de Estados Unidos (Sherman et al., 1967) y se pone a criterio del que construye, revisa y supervisa una estructura de pavimento, el uso o no de estas consideraciones.



## 2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### *2.1 Descripción del Problema.*

Todos los materiales empleados en carreteras están sometidos a posibles cambios de diversa índole, tanto físicos como mecánicos e incluso químicos, y para una interpretación rigurosa de su grado de variación es conveniente el análisis estadístico descriptivo de estos parámetros. La calidad y homogeneidad de la obra está en función de muchos factores; los materiales, el proceso de ejecución, los equipos y los propios métodos de ensayo. Los resultados que de estos se obtienen tienden generalmente a seguir una ley gaussiana, ahora bien, cuando se deben tomar decisiones respecto al cumplimiento de las especificaciones sobre materiales o unidades de obra, si se pretende hacer con un pequeño número de determinaciones es muy problemático que la decisión sea justa (Llamazares, 1973). Al respecto de lo descrito por éste autor, se podría decir que mientras más muestras se obtengan es mejor, sin embargo, como es del conocimiento general, esto también puede ser problemático sobre todo si se trata de muestreos directos, ya que produciría alteraciones físicas importantes para los elementos a analizar.

Por otro lado, el concepto de calidad de una carretera es interpretable en función del conjunto de las actividades de análisis, medición, muestreo y pruebas, tanto de campo como de laboratorio de los diversos materiales que se utilicen para la construcción de carreteras. En la práctica, es frecuente realizar pruebas puntuales distribuidas espacialmente y elaborar documentos y reportes de estas actividades, obteniendo así un registro ordenado y detallado de cada una de ellas, para posteriormente llevar a cabo un análisis estadístico descriptivo de los parámetros a analizar; tales como compactación del material, humedad, espesor, granulometría, etc., con lo cual se pretende tener un control de la obra en toda su extensión. La interrogante que se plantea en este trabajo se desprende de la diferencia que entre pruebas existe un espacio de

separación, por lo tanto existe una variabilidad de material aparentemente desconocido en el espacio donde no se realizaron pruebas o análisis de ningún tipo, y por lo tanto la incertidumbre crece mientras la separación entre los muestreos también lo hace.

Por tanto, este trabajo pretende, identificar la variabilidad espacial a partir de datos obtenidos en campo y pruebas de laboratorio, realizados a los materiales usados para la ejecución de la obra, aplicando métodos Geoestadísticos y presentar una metodología particular, con base en ésta metodología, para la revisión de los parámetros técnicos, en este caso el grado de compactación, que presentan un criterio de análisis de aceptación o rechazo de la calidad para cualquier capa que conforma la vía terrestre a estudiar. Además de lo anterior se presentan algunas consideraciones particulares, para aumentar las posibilidades de que el control de calidad del grado de compactación se realice de manera óptima.

## ***2.2 Justificación.***

El conocimiento de las características y propiedades de los materiales pétreos, térreos, asfálticos, es un aspecto fundamental en el diseño y construcción de los pavimentos. Generalmente lograr una calidad homogénea no es sencillo, debido a la complejidad y variabilidad espacial que presentan los materiales debidos al reacomodo de sus partículas, ya sea durante el proceso de construcción o al momento de soportar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones producidas por las cargas a las que estará sometida la estructura. La estructura del pavimento se puede considerar como un conjunto de capas de suelo artificial y éste al igual que el suelo natural, el conocimiento de su comportamiento es a través de la Geotecnia, que es la tecnificación de disciplinas relacionadas con Ingeniería (Salinas 2009), y como herramienta la Estadística, que es una ciencia derivada de las matemáticas, útil para el análisis e interpretación de resultados provenientes de pruebas de un fenómeno determinado (Hines y Montgomery, 2001), para así inferir, en la medida posible, el comportamiento del pavimento.

La rama de las matemáticas utilizada en este caso, es la Geoestadística, la cual es la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al análisis, modelación y estimación de fenómenos estructurados en el espacio y el tiempo (Auvinet et al., 2001). El problema común del análisis geoestadístico aplicado a las Ciencias de la Tierra, reside en la elección del tamaño de las unidades representativas de su variabilidad espacial que tienen que ser analizadas sin perder alguna escala importante de su patrón estructural. En Mecánica de Suelos, se reconoce que estas unidades de muestreo, deben de ser relacionadas de tal forma que contengan el máximo de información sobre las propiedades físicas en cualquier punto de muestreo y que depende del grado de variación del suelo elegido para el estudio. Por lo tanto, conforme aumenta la heterogeneidad del suelo, la precisión con que pueden conocerse sus propiedades y el comportamiento del mismo tiende a decrecer (Ulloa et al., 2003).

Los métodos Geoestadísticos fueron utilizados en un principio para el estudio de los yacimientos mineros y petrolíferos, con la finalidad de obtener más conocimiento de la estructura geológica y de los datos parciales obtenidos por extracción de testigos, perforación o durante la explotación de los yacimientos. Estos métodos se pueden aplicar a varias áreas tales como la pesca (localización de bancos de peces), la Epidemiología, la Agronomía, la Hidrogeología, la Geoquímica, la Geofísica, la Meteorología y de manera más contemporánea a la Mecánica de Suelos (Armstrong, 1997). En éste contexto, el paso de los datos puntuales a información continua en el espacio es el problema metodológico principal planteado, que la Geoestadística resuelve de forma adecuada. Por lo tanto, este método se adapta perfectamente al estudio.

### **2.3 Alcances.**

Visualizar como la separación entre los puntos de muestreo influye en los resultados obtenidos los cuales pueden representar una determinada longitud de alguna capa compactada, elemento que forma parte de la

estructura de un pavimento. En lo que respecta al parámetro del grado de compactación alcanzado, el cual su finalidad es principalmente el de evitar asentamientos y deformaciones en el cuerpo de terraplén o pavimento e incluso de cualquier vía terrestre sujeta a análisis, así como de resistir los esfuerzos inducidos por el tránsito vehicular y/o por las condiciones climáticas.

Una carretera es destinada a la circulación vehicular, su construcción se lleva a cabo acomodando capas superpuestas de distinta calidad y tipo de material como las terracerías en terraplén, las cuales, según Olivera (1986) se dividen en: cuerpo de terraplén, que es la parte inferior, y la capa subrasante, que se coloca sobre la anterior. Además de lo anterior, y a menos que el proyecto indique otra cosa o así lo apruebe la SCT, como parte final del terraplén se construirán la capa subyacente y, por último, la capa subrasante, véase la Figura 1 y 2.

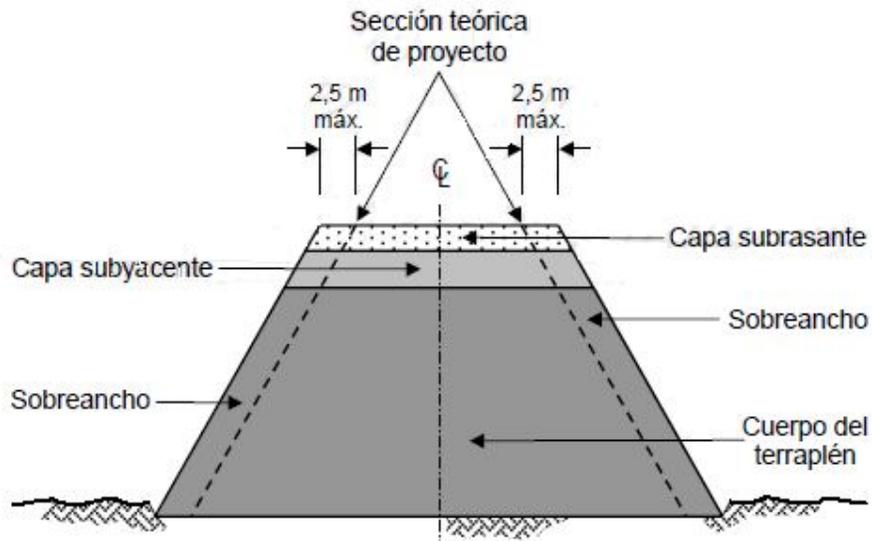
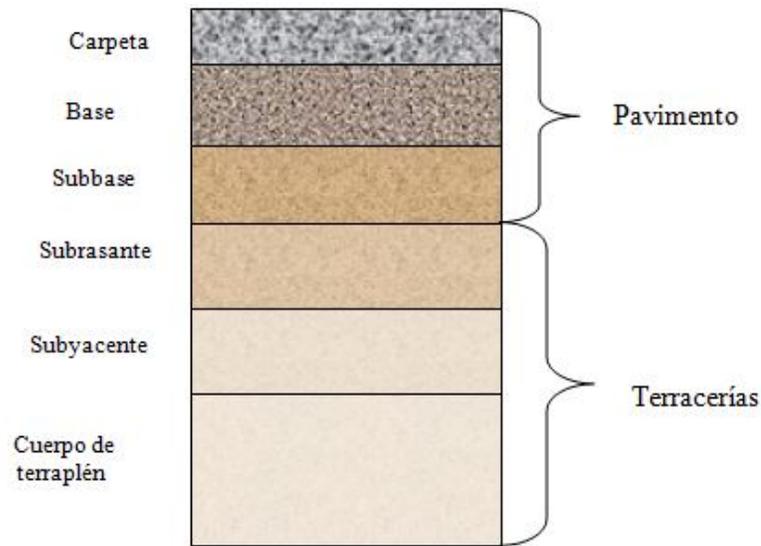
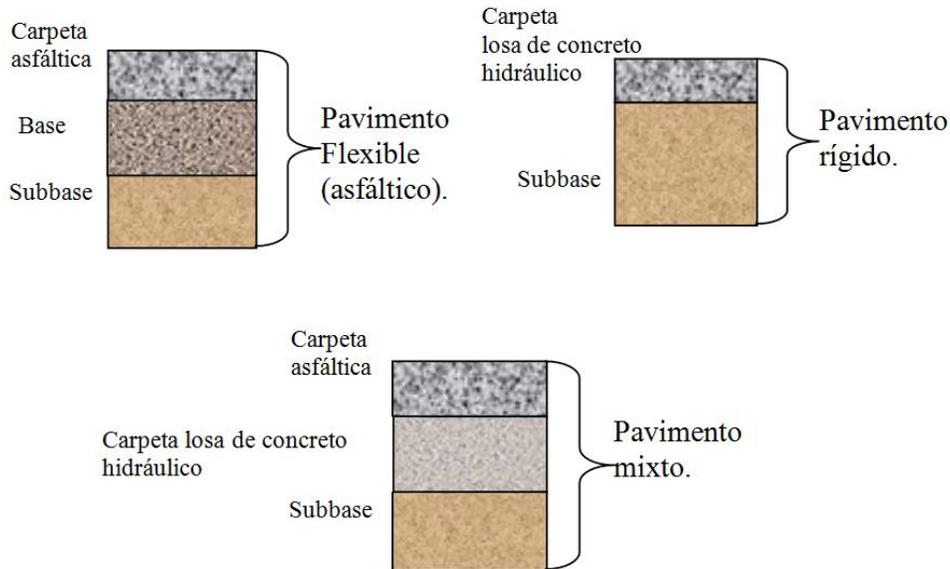


Figura 1. Sección transversal de un terraplén. Adaptado de la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) N·CTR·CAR·1·01·009/00



**Figura 2.** Nombres comunes de las capas usadas en una carretera. Las terracerías se componen del: cuerpo de terraplén, subyacente y subrasante. El pavimento se coloca sobre este conjunto de capas.

Usualmente se dice que un pavimento puede ser flexible, rígido ó mixto, la diferencia entre uno y otro, prácticamente, se basa en el tipo de material con que está construida la superficie de rodamiento, cuando se construye la capa con material asfáltico se dice que es un pavimento flexible, si es de concreto hidráulico se nombra pavimento rígido y si una capa de concreto hidráulico es cubierta con una capa de carpeta asfáltica se señala como pavimento mixto, sin embargo tienen diferencias estructurales entre uno y otro, como las observadas en la Figura 3.



**Figura 3. Nombres de las capas que conforman la estructura de pavimento flexible, rígido y mixto.**

Para cualquier vía terrestre a construir es necesario compactar cada una de las capas para lograr un acomodo y densificación del material, para así obtener una capa estable y resistente con superficie uniforme, que resista los esfuerzos y deformaciones a la que estará sujeta cada capa durante su vida útil. El principal problema de la compactación de suelos resulta ligado al control de calidad de los trabajos de campo, ya que después de realizar un proceso de compactación siempre es necesario verificar si con él se lograron los fines propuestos (Rico y Del Castillo, 1979), como es regularmente el alcanzar un grado de compactación establecido por la norma o especificación del proyecto.

Zárate (2007) menciona que en la actualidad los usuarios cada vez exigen mayor calidad en los pavimentos, lo cual hace obsoletos los estándares tradicionales y los métodos de control aplicados. Lo anterior hace necesario evolucionar el clásico control de calidad de tal forma que permita obtener resultados confiables, tanto para el mismo control, como para la verificación y el aseguramiento de calidad.

Por tanto, es necesario tomar en cuenta que la calidad es un concepto que entraña una serie de atributos que se deben satisfacer para lograr un determinado estándar de perfección prefijado de antemano en el proyecto.

Dicho estándar o patrón de calidad lo establece cada organismo mediante un conjunto de lineamientos y especificaciones que forman parte del proyecto, aunado a determinados criterios de tolerancias estadísticas, tanto en la selección de los materiales como los diversos procesos constructivos que integran la obra y el producto final.

#### **2.4 Control de calidad.**

El control de calidad es una preocupación muy importante tanto de Instituciones gubernamentales de carreteras, de contratistas y de la comunidad en general. En los pavimentos, el rendimiento y la calidad son afectados por tres factores principales: diseño adecuado, buen drenaje y buena compactación. Estos tres factores deben ser revisados de forma que se asegure la calidad del pavimento en general. Por esta razón, la compactación se considera muy importante en el desempeño de los pavimentos (Cheng et al., 1996).

Un proceso importante que interviene dentro del control de calidad es verificar que el grado de compactación, determinado por norma o especificación, sea el establecido para cada caso específico en la construcción de la estructura carretera. Para realizar el control, verificación o aseguramiento de la calidad del grado de compactación es necesario seleccionar el número y ubicación de puntos exploratorios con el objetivo de extraer muestras representativas del tramo construido, analizarlas y determinar, si la compactación cumple con los parámetros de calidad exigidos por la norma o especificación.

Actualmente, en México la selección y distribución del número de muestras que permitan conocer el grado de compactación en las capas que así lo requieren dentro de la construcción de una vía terrestre, está en función a lo que dicta la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) dentro de su Normativa para la Infraestructura del Transporte Norma N-CTR-CAR-1-04-002/03, en la cual enuncia los criterios y métodos para llevar

a cabo la medición de la compactación en el pavimento, además del control y aseguramiento de calidad, también menciona los métodos estadísticos para su calidad.

La Normativa establece que el número de muestras en las que se determinará la compactación, debe ser conforme a lo señalado en la Fracción H.3 de la Norma N·CTR·CAR·1·04·002/03, donde se sugiere que se aplique la siguiente ecuación:

$$n = \frac{L}{50} \quad (1)$$

Donde:

n= Número de muestras por realizar.

L= Longitud del tramo construido.

Los antecedentes de la formula (1) se remonta a lo que Sherman *et al.*, (1967) publica en su reporte "A Estatistical Analysis of Embankment Compaction". Sin embargo no se especifica el cómo distribuir el análisis en la superficie estudiada.

Por otro lado, Rico y Del Castillo (1979), señalan que es importante que las muestras seleccionadas sean individualmente representativas de todo el conjunto del material que se va usar en la obra. El procedimiento para seleccionar el lugar del tramo donde se deben de realizar las muestras se basa en la aplicación de los factores de las tablas de números aleatorios contenidas dentro de la Normativa, específicamente la Norma M-CAL-1-02/01.

## **2.5 Geoestadística.**

Cuador (2000), hace una reseña histórica del origen de la Geoestadística y menciona que el primer campo donde se utilizó fue para la evaluación de reservas minerales útiles, esta actividad fue fundamental para motivar, a partir de la década del 50's, el uso de la Geoestadística, la misma estudia las variables distribuidas espacialmente, partiendo de una muestra

representativa del fenómeno en estudio, utilizando como elemento fundamental el análisis de la distribución espacial de información disponible, proponiendo minimizar la varianza del error de estimación, obteniéndose el mejor estimador lineal insesgado, el Kriging, es actualmente utilizado en empresas mineras y su uso es cada vez mayor en otros campos de las Ciencias de la Tierra.

La Geoestadística es por tanto, la aplicación de la teoría de las funciones aleatorias (en este caso espaciales) y del tratamiento de las señales a la descripción de los materiales tanto cuantitativa como cualitativamente. También permite tomar en cuenta la dependencia espacial entre propiedades en puntos cercanos a través del concepto de función de autocovarianza o de variograma (Morales, 2005). En la actualidad los dominios de aplicación de la geoestadística son amplios, sin hacer referencia directamente a la minería que es el campo que le dió origen, se pueden mencionar: el petróleo, en la caracterización de reservorios, en la simulación condicional de variables petrofísicas, en el uso de la sísmica en las estimaciones. En la pesca, en la estimación de provisiones de peces, de variables condicionantes, profundidad, temperatura del agua. En la geofísica marina, en los problemas de filtrar perturbaciones temporales que mezclan el magnetismo espacial, en las características de su cartografía. La salud, en la distribución espacial de enfermedades, en la exposición de individuos a diversos ruidos. La ingeniería civil, en la construcción de obras de grandes dimensiones, que exigen del conocimiento de la variabilidad espacial de propiedades del terreno. Las finanzas, en la relación entre el análisis técnico con el análisis económico. Los materiales, en la previsión de propiedades físicas de los materiales. En la cartografía, la hidrogeología, el medio ambiente, los campos forestales, el análisis de imágenes y la elección de la red de muestreo (Cuador, 2000).

Los resultados de la aplicación de la técnica estadística de Geoestadística a las ciencias de la tierra en México, están por demás documentados y mencionados por Morales (2005), López (2007) y más recientemente por Salinas (2009), los trabajos citados demuestran que la Geoestadística puede ser empleada para resolver problemas de interpretación

geotécnica. En el presente trabajo se emplea ésta técnica estadística con el propósito de obtener una distribución espacial del número de muestras para el control, verificación y aseguramiento de calidad de la compactación en las vías terrestres mediante una metodología particular presentada más adelante, en comparación a los errores que se atribuyen a la distribución espacial del número de muestras que establece la normativa de la SCT.

En este trabajo se presentan y discuten los procesos para la obtención del número y distribución de las muestras para determinar la calidad de la compactación de las capas que conforman una carretera u obra vial, y principalmente de la obtención del grado de compactación tal y como lo establece la normativa de la SCT norma N-CTR-CAR-1-04-002/03 y M-CAL-1-02/01 además con un procedimiento propuesto; el cual establece que la localización de las muestras a realizar sea por lo menos un punto de muestreo ubicado aleatoriamente en intervalos de 50 metros de distancia y ubicado dentro de este intervalo con la ayuda de las tablas de números aleatorios que la SCT proporciona dentro de su normativa, a los dos métodos se les realiza un proceso de análisis Geoestadístico mediante el método de interpolación Kriging ordinario, con tal de simular una superficie compactada así como de visualizar la superficie representada por cada punto muestreado, así como también observar la distancia de separación más adecuada entre los puntos de muestreo, en relación a cuál de los dos métodos (Norma y propuesto en el presente trabajo) ofrece menos error en su distribución espacial, para que el muestreo pueda ser considerado representativo de la vía terrestre que se pretende controlar, verificar y asegurar en cuanto a calidad se refiere.

### 3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

#### ***Hipótesis.***

El uso de métodos Geoestadísticos permite un mejor conocimiento de la calidad de un pavimento en su carácter espacial más que en su carácter puntual, comparado con los métodos estadísticos convencionales utilizados actualmente para este fin, por lo que se puede realizar una mejor evaluación de la calidad del pavimento con respecto a los requisitos de la vía terrestre a evaluar.

#### ***Objetivos.***

##### General

Determinar la distancia máxima de separación entre los puntos de muestreo para obtener un mejor control de calidad a evaluar, en lo que respecta al grado de compactación de los materiales usados en la construcción de vías terrestres, para garantizar los requisitos del proyecto, utilizando el método Geoestadístico, tipo Kriging ordinario, con la finalidad de proponer un método estadístico alternativo de control de calidad por parte de la supervisión y establecer un criterio general para éste fin.

##### Particulares.

a) Obtener el conocimiento teórico de la confiabilidad de un análisis geoestadístico, comparado con un análisis estadístico común, realizado bajo las condiciones que se presentan en los distintos escenarios: i) Para el caso del modelo planteado en la normativa vigente; referido a la distribución y número de muestras representativas de un tramo a analizar, ii) Del modelo propuesto por el presente trabajo; en el que se realiza un análisis enfocado más a la

calidad del pavimento y menos al avance de la obra en cuestión y iii) comparativa con datos de campo representativos de ambos métodos.

b) Revisar los análisis estadísticos utilizados actualmente en el proceso de evaluación de la calidad de una vía terrestre.

c) Determinar de una manera más eficiente el control de calidad de la vía terrestre.

d) Elaborar un método simple y certero de control y aseguramiento de la calidad en una vía terrestre, en función del método Geoestadístico descrito en el presente documento, para este caso se utiliza el Kriging ordinario. Sin embargo, se puede decir que el planteamiento de métodos más actualizados respecto al análisis geoestadístico se analizará posteriormente en trabajos futuros.

## 4 MARCO TEÓRICO

### 4.1 *La compactación en las vías terrestres.*

La compactación de los suelos consiste en la densificación del material por medios mecánicos. Su objetivo es producir un material estable, resistente y cuyas propiedades mecánicas sean conocidas dentro de ciertos límites, para determinar su probable comportamiento a lo largo de su vida de servicio. Mediante el proceso de compactación, el aire contenido en el material es expelido a medida que las partículas sólidas se acomodan y orientan para formar una masa densa (Zárate, 2007).

El grado de compactación se mide en relación con lo que establezca la Normativa SCT, dependiendo si el material es utilizado para formar el cuerpo de terraplén (N·CMT·1·01/02), subyacente (N·CMT·1·02/02), subrasante (N·CMT·1·03/02), subbases o bases hidráulicas (N·CMT·4·02·001/04). Para lo cual se establece que desde el cuerpo de terraplén hasta la subrasante el grado de compactación se determine con respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO estándar. En los materiales usados para conformar el pavimento, en estos se medirá el grado de compactación con respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada. Para ambos casos, se relacionan los parámetros obtenidos de masa volumétrica seca máxima, según sea el caso, con el contenido de agua óptimo de la prueba.

Las mediciones del grado de compactación obtenidas se someten a un análisis estadístico con la intención de conocer el comportamiento de la compactación obtenida en el tramo analizado con relación a los parámetros que establece la Normativa y decidir si es o no aceptable la calidad del tramo analizado.

#### 4.1.1 Método de control y verificación de calidad vigente.

En nuestros días, la aceptación o el rechazo de un trabajo de compactación de un volumen de material dado, se basa usualmente en un muestreo estadístico, de manera general y sin importar la ubicación exacta de los puntos evaluados (López, 2007).

El establecimiento del número de muestras en relación a la norma vigente es como se mencionó en la ecuación (1).

$$n = \frac{L}{50}$$

Donde:

n= número de muestras por realizar.

L= longitud del tramo construido.

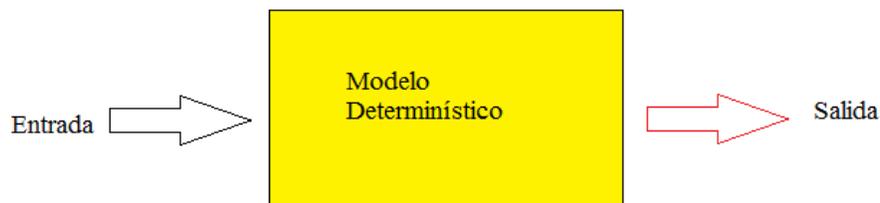
La ubicación espacial del número de muestras resultante en relación al tramo analizado, según la Normativa, M·CAL·1·02/01, está en función de lo que establecen los criterios estadísticos de muestreo.

Con el uso de los criterios estadísticos establecidos por la normativa, se pretende que la determinación de la ubicación espacial de las muestras sea de forma probabilística, es decir, que en el proceso de selección del lugar de muestreo, delimitada por la longitud total del tramo en análisis y bajo las mismas condiciones, se sitúe en más de un mismo sitio, asemejando un comportamiento Estocástico.

#### 4.1.2 Fenómeno Determinístico.

Los sistemas deterministas siempre producen la misma salida para una determinada condición de partida (Origlio, s.f.). Significa que los fenómenos aleatorios no están involucrados.

Un fenómeno determinístico es aquel en que la relación causa-efecto se conoce plena y totalmente. Por ejemplo los fenómenos físicos que se describen con las leyes de la física clásica, como puede ser el movimiento de una partícula. En el caso del presente trabajo el Fenómeno Determinístico se manifiesta en el modelo que presenta la normativa en su contenido para establecer el número de muestras mínimas a realizar en un tramo, para su posterior análisis. La Figura 4 muestra de manera esquemática el proceso de modelar un fenómeno determinístico.



**Figura 4. Fenómeno Determinístico, representado por un modelo de manera esquemática. Fuente, Silva (2009), en él se muestra que dado un valor de entrada se obtiene un único valor de salida cada vez que se corre el modelo.**

#### 4.1.3 Fenómeno Estocástico.

Estocástico es sinónimo de "azar". La palabra es de origen griego y significa "relativo al azar" (Parzen, 1962). Se utiliza para indicar que un tema en particular se ve desde el punto de vista de la aleatoriedad. Estocástico es de uso frecuente como contrapartida de la palabra "Determinista", que significa que los fenómenos aleatorios no están involucrados. Por lo tanto, los modelos estocásticos se basan en ensayos al azar, mientras que los modelos deterministas siempre producen la misma salida para una determinada condición de partida, (Origlio, s.f.). La Figura 5 muestra de manera esquemática el proceso de modelar un fenómeno estocástico.

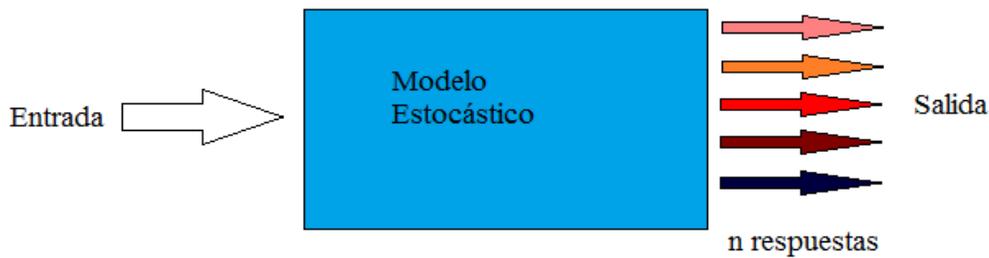


Figura 5. Fenómeno estocástico representado por un modelo de manera esquemática Silva (2009), en él se muestra que dado un valor de entrada se obtiene una respuesta diferente cada vez que se corre el modelo.

La Universidad Técnica Federico Santa María (2008) define al proceso estocástico como un grupo de variables aleatorias  $X_i$ , donde  $i$  pertenece a un espacio muestral  $S$ , parametrizadas por una variable  $t$  que toma valores de un conjunto  $T$ . Esta variable es el tiempo;  $X_i(t) \quad i \in S; t \in T$ .

Debe tomarse en cuenta que las vías terrestres se construyen con materiales de características variables a lo largo del proyecto (Zárate, 2007). Por lo tanto el comportamiento de los materiales compactados es variable por la misma naturaleza del origen de los materiales usados, además de que el proceso mecánico al que se someten para obtener un grado de compactación no es uniforme, es decir, es distinto en cualquier punto que integra la superficie construida, por lo que el comportamiento estocástico es intrínseco del proceso de compactación.

#### 4.1.4 Elementos de estadística.

El conjunto de datos que se obtiene por la repetida medición del grado de compactación, que se hace en cada muestra analizada, se consigue lo que comúnmente se llama "muestra de datos", los cuales pueden clasificarse y procesarse con estimadores estadísticos como la media, desviación estándar, varianza, etcétera, para conocer las medidas de tendencia central y medidas de dispersión o variación, en este trabajo se presentan las que se consideran de mayor importancia.

## a) Medidas de tendencia central.

Media.

Dado un conjunto de  $n$  mediciones u observaciones,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , existe una forma de describir su valor medio o media aritmética.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

En general la media de la población  $x$  representa el valor promedio de todas las observaciones de la muestra, frecuentemente se interpreta como un valor representativo de la muestra (Salinas, 2009).

Mediana.

La mediana de  $n$  observaciones,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , puede definirse aproximadamente como el valor “más cercano a la mitad” una vez ordenados los datos.

$$x = x_{([n+1]/2)} \quad \mathbf{n \text{ impar.}} \quad (3)$$

$$x = \frac{x_{(n/2)} + x_{([n+2]/2)}}{2} \quad \mathbf{n \text{ par.}} \quad (4)$$

La mediana tiene la ventaja que no es afectada de manera considerable por los valores extremos (Salinas, 2009).

Moda.

La moda es uno de los valores típicos, el que se presenta con la mayor frecuencia e implica que la distribución de frecuencias presenta un máximo. A menudo es difícil determinar el valor numérico (Salinas, 2009).

b) Medidas de dispersión.

Varianza.

Dado un conjunto de datos medidos, también es deseable poder representar su variabilidad mediante un solo número. Una medida de dispersión de la muestra es la varianza. La varianza de una muestra  $s^2$  se define como:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5)$$

Éste valor es análogo al momento de inercia dado que consiste en una suma de cuadrados de distancias respecto a un centro de gravedad que es la media.

La varianza da una idea de la dispersión de los datos. El valor mínimo que puede tomar es cero, y esto sucede cuando la población toma un único valor: esto es, si los valores,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , son iguales. A medida que la varianza es mayor así lo es la dispersión de los datos.

Desviación estándar.

Medida de variación de los valores con respecto a la media. Es un tipo de desviación promedio de los valores, con respecto a la media.

$$s = \sqrt{S^2} \quad (6)$$

Así a menor desviación estándar corresponde un menor nivel de dispersión de datos.

Coefficiente de Variación

La desviación estándar, referida a la media, da el coeficiente de variación.

$$CV = \frac{s}{x} \quad (7)$$

Este coeficiente es una medida adimensional de la dispersión.

Los parámetros anteriores pueden ser estimados para una muestra de datos obtenidos de la medición del grado de compactación alcanzado en los materiales térreos usados para la construcción de una vía terrestre.

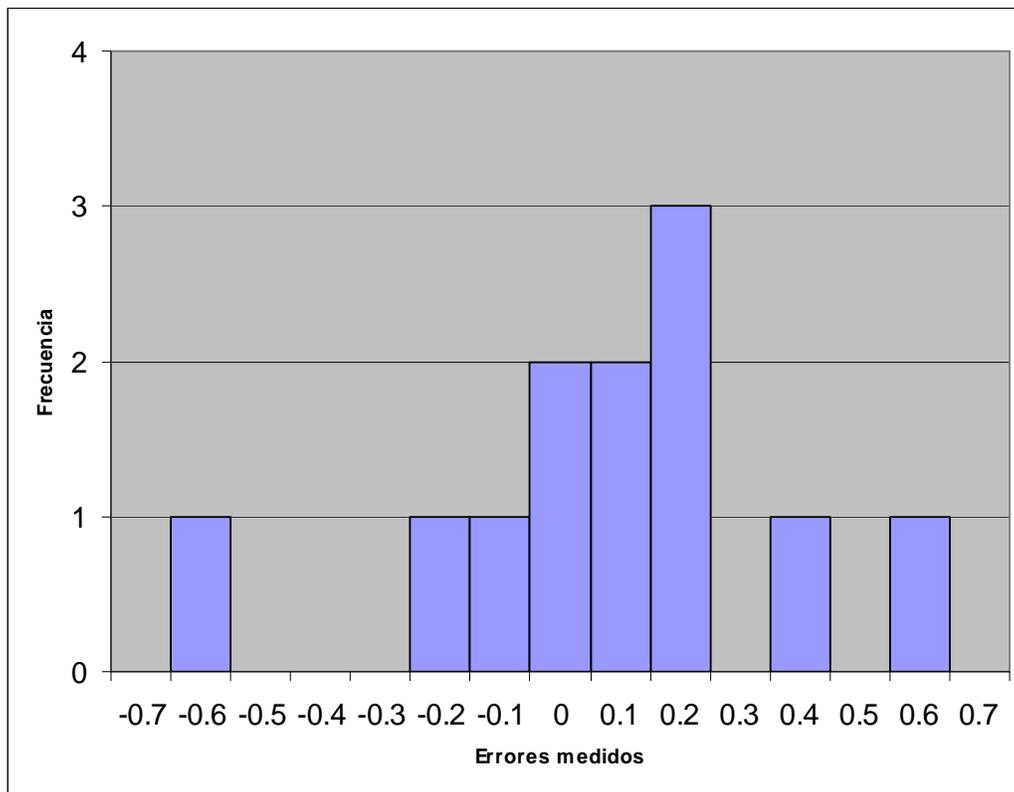
*Análisis gráfico de la variabilidad de los datos por medio del polígono de frecuencias.*

Las características del suelo también pueden ser analizadas a través de métodos gráficos estadísticos, siendo el utilizado en este estudio el polígono de frecuencias. Para realizar cualquiera de estas gráficas es necesario,

previamente, realizar una ordenación tabular de los valores de los puntos de los datos, en orden creciente o decreciente de magnitud, y estimar el rango que es la diferencia entre el valor máximo y mínimo. Una vez determinado el rango es necesario establecer la frecuencia de clase que se define como el número de valores perteneciente a cada una de las clases (Salinas, 2009).

### *Polígono de frecuencias.*

Un polígono de frecuencias es un gráfico de línea trazado con las marcas de clase y las frecuencias, véase Figura 6.



**Figura 6.** Ejemplo de la representación gráfica de la frecuencia de datos de un error medido (Salinas, 2009).

Se puede decir que utilizando los elementos estadísticos se obtiene más que nada un ordenamiento de la muestra de datos obtenida de las repetidas mediciones del fenómeno en estudio, con lo cual se pretende determinar la uniformidad de la muestra, es el caso del uso de la media, pero con cierta dispersión respecto a si misma, se puede conocer el parámetro de dispersión

con el uso de la desviación estándar y varianza. Con la ayuda de gráficas de frecuencia se logra una interpretación visual del comportamiento de los datos dentro del mismo espacio muestreado.

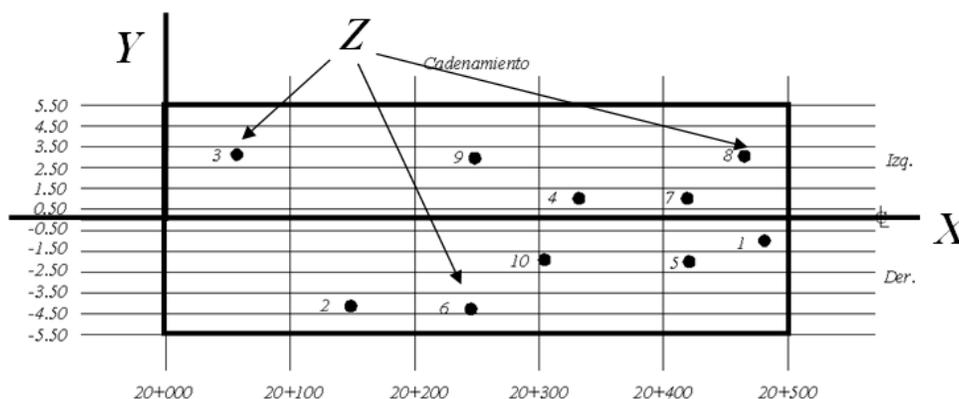
#### **4.1.5 Técnicas Geoestadísticas.**

En resumen, la Geoestadística se ha manejado por largo tiempo, como estadística aplicada a los problemas de las ciencias de la tierra (Myers, 1991), o de manera más específica como una colección de métodos estadísticos que se han utilizado tradicionalmente en geociencias. Sin embargo, a partir de los años 60 y hasta la fecha el concepto de geoestadística está afiliado con el trabajo clásico de Matheron (1987), cuya publicación se considera el inicio de la era de la geoestadística como una disciplina independiente (Salinas, 2009).

La palabra Geoestadística, denota el estudio estadístico de fenómenos naturales, tiene varias interpretaciones como la de Matheron, que la define como: “la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (Journel y Huijbregts, 1978; González, 2002). En este sentido González (2002) comenta otros significados del término geoestadística con el fin de evitar interpretaciones incorrectas; “estadísticas en la geología” y la más reciente y orientado al SIG como: “las estadísticas involucradas con datos geográficos”, también llamada “estadísticas espaciales”, en este contexto, según Salinas (2009), la función aleatoria puede ser vista desde dos diferentes enfoques:

- a) Puede ser concebida como la colección de variables aleatorias dependientes con una sola localización posible para cada muestra.
- b) Como una variable aleatoria, cuyos valores son funciones más que números.

De un modo simplista se podría ver a la Geoestadística como una metodología de interpolación de los datos sobre un patrón espacial irregular (Myers, 1991). A cada dato se le asocia una localidad en el espacio (se definen sus coordenadas) lo que implica una conexión entre el valor de la variable y su posición dentro del espacio muestreado (Salinas, 2009). Salinas (2009) enuncia que la localización de la variable puede significar por lo menos dos cosas: la primera es la ubicación de sus coordenadas cartesianas, la cual se puede determinar fácilmente para el trabajo de investigación propuesto utilizando la tabla de números aleatorios, proporcionadas por la Normativa SCT, norma M-CAL-1-02/01. La segunda se maneja como la asociación entre los datos de entrada con el área o volumen conocidos del espacio muestreado. Por ejemplo, Myers (1991) utiliza un valor asociado al área que puede ser la medida de la variable observada, tomada ésta a partir de un volumen conocido de datos distribuidos en el espacio. En este sentido la utilidad de la Geoestadística dentro del presente trabajo es aplicable ya que cuando se realiza una distribución del número de pruebas en un tramo de algún elemento que constituya la estructura de la carretera, con el fin de controlar, verificar y asegurar la calidad del mismo, se tiene una distribución espacial con coordenadas  $(X, Y)$ , que son los puntos de ubicación donde se realizará la prueba de análisis, y una variable, para este caso el grado de compactación obtenido una vez realizado el análisis, que se denomina atributo ( $Z$ ), dentro del tramo que se pretende analizar, véase la Figura 7.



**Figura 7.** Representación esquemática de la ubicación espacial de los puntos donde previo un análisis se conoce el atributo, dentro del espacio de un tramo analizado, los números al lado de los puntos oscuros ( $Z$ ) solamente indican el número correspondiente de la prueba de la cual se obtuvo el grado de compactación.

Con el análisis Geoestadístico se pretende conocer la conexión del valor del atributo (Z) y su posición dentro del tramo muestreado, suponiendo que toda la superficie está sometida a las mismas condiciones, además de que la cuantía del error de estimación inherente a la ubicación espacial de los puntos de muestreo con relación al valor del atributo, en este caso, el grado de compactación. Al mismo tiempo, es ampliamente divulgado que el error de estimación es la diferencia entre el resultado estimado y el resultado exacto.

Según Cirión (2003), los pasos principales de un estudio Geoestadístico son:

- a) Análisis de los datos exploratorios.
- b) Análisis estructural (Cálculo y modelación de los Variogramas).
- c) Estimaciones (Kriging o simulaciones).

El análisis de los datos exploratorios en la Geoestadística, según González (2002), consiste en realizar una exploración de los datos correlacionados en el espacio; es decir, un “análisis de datos espaciales”. La Geoestadística en algunas ocasiones se refiere como un conjunto de técnicas para el análisis espacial de la “Data Geoestadística”, o datos con continua relación espacial. Incluidos en la familia de tipos de datos espaciales están las líneas por ejemplo de la distribución de mortalidad infantil en diferentes países o pueblos y los patrones de datos de puntos espaciales ejemplo el desarrollo de cuerpos sedimentarios en el espacio (Cirión, 2003).

En este contexto se puede decir que el análisis de los datos exploratorios permite tener una visualización previa al análisis definitivo de los datos en estudio, por mencionar algunas: evaluar la calidad y consistencia de los datos, determinar la distribución de las variables en estudio, comprobar supuestos, categorizar variables, entre otros, todo en correlación del espacio de donde fueron abstraídos. Por ejemplo, para el caso de esta investigación, una realización de pruebas en el espacio de un tramo compactado. Para llevar a cabo el análisis exploratorio de datos se puede recurrir a los elementos estadísticos ya expuestos anteriormente.

El análisis estructural o cálculo y modelación de los variogramas, representan una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada (Rondón, s.f.). En pocas palabras se puede decir que el análisis estructural consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad. Esto quiere decir, que la dependencia de las características de estacionaridad del fenómeno modelarán la función de covarianzas o la de semivarianzas (Díaz, 2002).

Por su importancia y generalidad se estudiará el proceso de estimación y modelación de la función de semivarianzas o semivariogramas.

La función básica que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés se conoce como semivariograma (Gallardo, 2006). Usualmente al Variograma también se lo conoce como semivariograma (González, 2002).

En la realización de un muestreo, Gallardo (2006), expresa que la representación gráfica de las varianzas en función de la distancia que separa a las muestras es el semivariograma (o variograma), y el cálculo de la varianza entre pares separados por intervalos de distancia se conoce como semivarianza ( $\gamma$ ), estimada como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

Donde,  $\gamma(h)$  es la semivarianza para todas las muestras localizadas en el espacio separado por el intervalo de distancia  $h$ .  $N(h)$ , es el número total de pares de muestras separados por un intervalo de distancia  $h$ .  $Z(x)$  es el valor de la muestra en una localización  $x$ .  $Z(x+h)$  es el valor de la muestra a la distancia de intervalo  $h$  desde  $x$  (Gallardo, 2006).

Los parámetros del semivariograma caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen (Efecto Pepita), el valor máximo de variabilidad (Meseta), y el área de influencia de la correlación (Alcance), (Figura 8). Como los presenta Cuador *et al.* (1997) y se describen a continuación.

#### El Efecto Pepita: (Nugget)

El semivariograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se le llama efecto pepita, en inglés (Nugget effect) y puede ser obtenido trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extender este hasta que se intercepte con el eje Y. Si esta intercepción ocurre por debajo de cero, el valor asumido por este efecto es cero, pues valores negativos de  $\gamma(0)$  no tiene significado y no es común. El Efecto Pepita se representa como  $C_0$ .

#### La Meseta: (Sill)

Es el valor de  $\gamma(h)$  para el cual con el aumento de  $h$  su valor permanece constante, se representa como  $(C_T = C + C_0)$  y se denomina meseta. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma, y su valor se puede leer en la intercepción de esta línea con la ordenada.

#### El Alcance: (Range)

La distancia  $h$  para la cual las variables  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  son independientes, se denomina Alcance y se representa por  $(a)$ , es decir las distancias para la cual la variable no está más correlacionada, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su meseta. El alcance siempre tiene valor positivo, y puede ser obtenido a partir de la intercepción de las líneas descritas en los puntos anteriores, ese punto leído en

la abscisa es una fracción del propio alcance, fracción que se detallará posteriormente en la explicación de los modelos teóricos Figura 8. Parámetros del semivariograma.

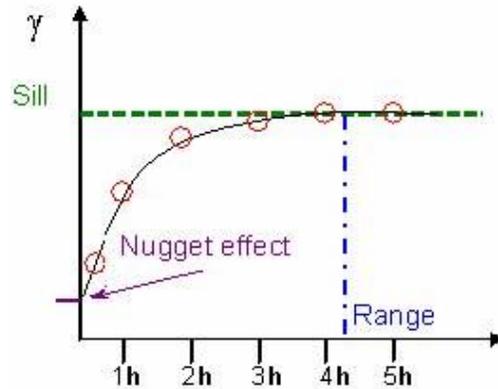


Figura 8. Parámetros del semivariograma o Variograma.

Para conocer estudios más detallados de la geoestadística se pueden consultar los trabajos realizados por: Matheron y Kleingeld 1987; Lantuejoul (1995); Cuador *et al.* (1997); Deutsch y Journel (1998); Díaz (2002); González (2002); entre otros.

Estimaciones (Kriging o simulaciones). Kriging es una técnica de estimación Geoestadística. Utiliza una combinación lineal de los valores de las muestras alrededor para hacer las estimaciones. Para hacer las estimaciones, se necesitan conocer los pesos aplicados para cada muestra alrededor. Kriging permite derivar los pesos que resultan estimados como óptimos e imparciales. Dentro de un trabajo probabilístico, Kriging tiende a: (a) minimizar la varianza del error; y (b) sistemáticamente lleva la media del error de las predicciones a 0, para que no haya ni sobre ni sub estimaciones. Kriging es expresado como “Sistema de Krigeado” (Ciri3n, 2003).

El Krigeaje consiste en efectuar una ponderaci3n, es decir, atribuir un peso a cada valor observado, los pesos son calculados de manera que minimice la varianza de estimaci3n resultante, teniendo en cuenta las características geométricas del problema (Matheron, 1970). Al minimizar la

varianza de estimación se garantiza el uso óptimo de la información disponible (Zhang *et al.*, 1995).

El resultado final del Kriging es un mapa con los valores interpolados de la variable. Sin embargo, a diferencia de otras técnicas, la geoestadística permite que cada interpolación lleve asociado un grado de incertidumbre que puede también ser representado en el espacio (en forma de varianza o desviación estándar). Por tanto a cada punto del espacio interpolado se le puede asociar una distribución teórica, lo que además permite la posibilidad de realizar simulaciones probabilísticas, representando el resultado del Kriging como la probabilidad de que la variable alcance un determinado valor (Gallardo, 2006). Gallardo (2006) menciona que la simulación no proporciona el mejor valor a obtener en una localización, pero sí muestra lo que podría ser el fenómeno real de forma general.

En este contexto (Cuador *et al.*, s.f.) enuncia, que no se debe distinguir entre Simulación o Estimación como dos procedimientos que se contradicen, sus objetivos son diferentes, pero dependiendo de los intereses particulares en una aplicación o investigación se deben usar, como dos alternativas que complementan un estudio, la simulación para obtener una representación del fenómeno de forma general y la estimación para obtener el mejor valor estimado en cualquier localización puntual o de bloque.

Los métodos Kriging se aplican con frecuencia con el propósito de predicción, sin embargo estas metodologías tienen diversas aplicaciones, dentro de las cuales se destacan la simulación y el diseño de redes óptimas de muestreo (Giraldo, s.f.).

Se hace mención del artículo publicado por Wikipedia (s.f.) en relación al Krigeaje ya que este define tres tipos de Kriging que son:

- Kriging Simple.

Asume que las medias locales son relativamente constantes y de valor muy semejante a la media de la población que es conocida. La media de la población es utilizada para cada estimación local, en conjunto con los puntos vecinos establecidos como necesarios para la estimación.

- Kriging Ordinario.

Las medias locales no son necesariamente próximas de la media de la población, usándose apenas los puntos vecinos para la estimación.

- Cokriging.

Es una extensión de las situaciones anteriores en las que dos o más variables tienen una dependencia espacial y esa variable se estima que no se muestra con la intensidad con la que otros son variables dependientes, con estos valores y sus dependencias para estimar la variable.

El Kriging Ordinario es el usado para llevar a cabo este trabajo ya que se apega a la información requerida y obtenida por la elección de puntos de muestreo para controlar, verificar y asegurar la calidad en la construcción de obras viales.

Para el caso del Kriging Ordinario el valor  $z'_0$  en una localidad 0 no muestreada se estima como un promedio ponderado  $w_i$  de los valores de muestras  $z_i$  distribuidas en las localidades  $i$  alrededor del punto de interés (Sharov, 1996):

$$z'_0 = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (9)$$

Donde:

$z'_0$  = Estimación

$w_i$  = ponderación

$z_i$  = valores de las muestras

Los coeficientes de ponderación  $w_i$  (los pesos) dependen del grado de correlación entre los puntos muestreados y el punto para el cual se busca un valor estimado. El rasgo específico del kriging ordinario consiste en que la suma de los coeficientes de ponderación siempre será igual a 1:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (10)$$

Por consiguiente, debe normalizarse la media de los pesos. Consecuentemente, se tiene un resultado más preciso del Kriging Simple. El uso será de las siguientes ecuaciones para determinar los valores de los pesos en el p-ésimo punto:

$$\begin{cases} \omega_1 S(d_{11}) + \omega_2 S(d_{12}) + \dots + \omega_n S(d_{1n}) + \lambda = S(d_{1p}) \\ \omega_1 S(d_{21}) + \omega_2 S(d_{22}) + \dots + \omega_n S(d_{2n}) + \lambda = S(d_{2p}) \\ \vdots \\ \omega_1 S(d_{n1}) + \omega_2 S(d_{n2}) + \dots + \omega_n S(d_{nn}) + \lambda = S(d_{np}) \\ \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1 \end{cases} \quad (11)$$

Donde:

$\omega_j$  : Peso del j-ésimo punto

$S(d_{ij})$ : Valor de la semivariación de  $d_{ij}$

$\lambda$  : Variable temporaria

En este trabajo se utiliza el Kriging ordinario, en términos del Semivariograma para estimar y modelar el fenómeno estocástico, presente durante la compactación de los materiales usados para conformar una carretera, a fin de conocer el error de estimación en relación a la distribución espacial del número de muestras de compactación requeridas en un tramo analizado para verificar el grado de compactación alcanzado.

Lo anterior, se realizará con la ayuda del programa ArcGis 9 buscando con este la caracterización más precisa de la estimación y modelados Geoestadísticos, se busca por tanto, en este estudio conocer la eficiencia de la distribución espacial del número de muestras para verificar la calidad del grado de compactación en los elementos estructurales que conforman una carretera.

## 5 METODOLOGÍA

Con el fin de conseguir el objetivo central de conocer el error de estimación inherente a la ubicación espacial de los puntos de muestreo con relación al grado de compactación, es necesario abordar el análisis de los datos, aplicando el criterio establecido por la Normativa SCT para llevar a cabo un control y aseguramiento de calidad del proceso de compactación. Posteriormente redistribuir el mismo número de muestras, utilizando un método propuesto en la presente investigación, para conocer en ambos casos el error de estimación en relación a la ubicación espacial del muestreo, exponiendo seguidamente los instrumentos conceptuales y metodológicos utilizados para el tratamiento de los datos y la obtención de resultados. La metodología que se siguió en la presente investigación queda resumida en los siguientes incisos:

- Recopilación bibliográfica y fundamentación teórica: consulta, análisis y síntesis en biblioteca y sistema electrónico, de documentos relacionados con Geoestadística.
- Recopilación de datos y parámetros establecidos por la Normativa SCT; para generar una base de datos y una plataforma de análisis.
- Revisión de procedimientos y métodos estadísticos aplicables al control, verificación y aseguramiento de la calidad del grado de compactación en una carretera: Estudio de las técnicas Geoestadísticas que se emplearán a la base de datos.
- Análisis de las series de datos de la compactación: compilación, proceso e interpretación de la propiedad y parámetros que se emplearán en este estudio.

- Evaluación estadística de las series de datos: aplicación de las técnicas Geoestadísticas a la series de datos, al método establecido por la normativa SCT y al método propuesto, para obtener el resultado óptimo de la calidad.
- Comparación de resultados: La comparación se hará valorando eficazmente las normas establecidas para el control, verificación y aseguramiento de la calidad de la compactación y los resultados obtenidos con el procedimiento planteado y utilizado.

La metodología propuesta en el presente trabajo aplicada a los parámetros provenientes de la Normativa SCT, para el número de muestras de los Criterios Estadísticos de Muestreo, en complemento a la fracción H.3. de la Norma N-CTR-CAR-1-01-009/00, Subbases y Bases, así como de la N-CTR-CAR-1-04-002/03, Terracerías, de la misma Normativa, en donde se establece que el número de muestras se determine a partir de la fórmula (1). La longitud establecida para la presente investigación es de 600 metros por cada análisis de distribución espacial, por lo cual da un resultado de:

$$n = \frac{L}{50} = \frac{600}{50} = 12 \text{ Muestras por la longitud del tramo establecido.}$$

Se acepta el hecho de que con 12 muestras distribuidas en una longitud (L) de 600 metros y 11 metros de ancho (A) es suficiente para el estudio, ya que como mínimo requerido por el programa ArcGis 9 requiere de 10 datos, como mínimo, para poder realizar un estudio geoestadístico, trabajando con la longitud establecida de 600 metros, ésta proporciona 12 datos de muestreo.

Para la distribución espacial de las 12 muestras para cada análisis desarrollado se hace con base en las tablas de números aleatorios ofrecidas dentro del contenido de los Criterios Estadísticos de Muestreo, cuyos datos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 1. Tabla de números aleatorios, columnas 01 a 14 de 28. Fuente Normativa SCT (2010 Norma M-CAL-1-02/01).

COLUMNA 01			COLUMNA 02			COLUMNA 03			COLUMNA 04			COLUMNA 05			COLUMNA 06			COLUMNA 07		
N°	A	B																		
15	,045	,075	17	,014	,363	21	,051	,071	18	,029	,521	17	,030	,879	30	,027	,987	20	,032	,686
21	,080	,571	05	,042	,032	10	,064	,893	24	,062	,552	26	,059	,420	21	,086	,396	12	,061	,039
30	,121	,381	18	,043	,113	30	,089	,939	14	,074	,309	24	,075	,300	10	,131	,876	22	,128	,300
23	,134	,990	28	,107	,079	25	,153	,689	10	,096	,256	07	,128	,157	29	,139	,945	18	,141	,403
24	,138	,122	06	,145	,163	29	,187	,358	28	,127	,075	28	,147	,614	20	,168	,455	03	,143	,812
08	,139	,262	26	,169	,851	18	,200	,470	19	,187	,628	03	,165	,658	01	,175	,097	13	,209	,158
19	,214	,295	02	,211	,386	24	,224	,184	01	,204	,571	29	,221	,677	24	,178	,016	29	,215	,311
11	,219	,421	04	,214	,572	14	,275	,023	13	,261	,288	06	,240	,323	06	,245	,925	16	,244	,056
29	,233	,873	03	,264	,074	01	,316	,941	30	,266	,681	11	,259	,182	02	,260	,898	28	,248	,674
16	,326	,953	07	,277	,536	06	,361	,043	22	,269	,838	15	,261	,827	14	,334	,475	11	,287	,372
17	,348	,308	30	,310	,155	26	,381	,157	05	,278	,789	22	,271	,526	05	,362	,655	02	,296	,104
06	,378	,989	21	,318	,787	23	,390	,475	08	,283	,305	14	,379	,051	09	,379	,118	24	,316	,693
07	,385	,831	11	,409	,075	11	,417	,088	02	,337	,182	13	,421	,478	13	,409	,205	14	,376	,640
02	,397	,001	15	,410	,710	07	,436	,316	06	,346	,715	21	,460	,736	26	,422	,088	15	,438	,363
13	,411	,557	29	,461	,302	13	,461	,406	15	,401	,484	12	,467	,780	25	,444	,535	19	,487	,064
25	,426	,783	14	,483	,678	20	,471	,745	25	,440	,139	30	,499	,321	17	,471	,811	09	,507	,768
01	,473	,738	19	,560	,953	03	,494	,648	27	,585	,090	01	,510	,357	04	,475	,603	06	,507	,104
18	,531	,993	27	,603	,530	27	,499	,271	09	,603	,634	18	,518	,397	23	,564	,993	27	,575	,741
20	,560	,406	09	,620	,583	12	,562	,095	21	,607	,859	05	,540	,893	15	,678	,821	10	,619	,306
27	,674	,054	13	,623	,892	08	,652	,329	17	,697	,867	23	,587	,298	28	,697	,394	23	,623	,508
22	,737	,928	08	,640	,508	17	,661	,747	23	,698	,770	08	,610	,290	11	,793	,904	30	,637	,851
12	,744	,014	10	,641	,929	16	,691	,081	11	,710	,171	02	,797	,890	03	,816	,872	21	,644	,810
04	,745	,967	20	,641	,611	02	,731	,294	07	,745	,012	10	,809	,534	27	,819	,599	26	,665	,836
09	,802	,491	23	,836	,814	19	,813	,298	26	,747	,511	25	,826	,366	07	,835	,255	04	,672	,603
10	,815	,874	12	,845	,726	04	,841	,470	03	,834	,346	16	,863	,812	16	,846	,504	07	,854	,627
05	,846	,823	24	,855	,491	22	,842	,142	20	,848	,757	19	,863	,140	18	,859	,560	05	,855	,344
14	,851	,546	16	,930	,264	15	,848	,601	12	,902	,873	27	,871	,742	19	,861	,552	17	,861	,166
28	,870	,220	01	,960	,204	09	,911	,504	04	,914	,367	04	,880	,327	08	,872	,932	01	,954	,376
26	,900	,999	22	,961	,215	28	,929	,365	29	,915	,190	09	,919	,002	12	,914	,582	25	,969	,947
03	,983	,753	25	,984	,082	05	,973	,252	16	,992	,398	20	,958	,884	22	,264	,359	08	,978	,799
COLUMNA 08			COLUMNA 09			COLUMNA 10			COLUMNA 11			COLUMNA 12			COLUMNA 13			COLUMNA 14		
N°	A	B																		
15	,033	,102	25	,036	,994	13	,042	,220	25	,013	,901	12	,048	,175	20	,051	,091	01	,035	,290
01	,090	,465	19	,089	,055	12	,073	,612	06	,074	,032	30	,101	,391	28	,066	,568	10	,047	,878
11	,105	,599	09	,102	,159	18	,085	,156	07	,126	,954	02	,114	,741	12	,068	,056	09	,096	,295
16	,123	,709	28	,138	,616	26	,088	,916	26	,129	,925	28	,115	,076	22	,149	,524	06	,133	,230
06	,123	,187	18	,158	,371	05	,114	,576	22	,136	,271	26	,126	,469	29	,225	,615	15	,180	,640
07	,141	,400	14	,166	,988	30	,153	,841	23	,161	,533	18	,138	,400	04	,227	,034	16	,193	,564
09	,179	,901	12	,197	,101	21	,166	,189	18	,164	,447	27	,154	,919	03	,254	,430	20	,268	,073
20	,190	,366	05	,205	,767	25	,202	,115	08	,194	,610	20	,187	,633	19	,259	,277	02	,304	,938
25	,247	,063	11	,230	,715	23	,285	,030	20	,205	,117	22	,192	,557	01	,297	,689	18	,348	,080
14	,340	,291	15	,234	,120	01	,380	,270	15	,237	,520	16	,253	,576	18	,328	,066	26	,352	,315
22	,411	,696	13	,283	,645	15	,389	,787	14	,320	,292	15	,353	,156	07	,374	,773	07	,369	,284
18	,423	,754	10	,328	,457	24	,395	,651	04	,359	,734	21	,432	,958	17	,403	,490	30	,369	,641
30	,425	,276	01	,387	,216	10	,416	,543	09	,476	,991	04	,447	,014	23	,411	,925	13	,372	,706
13	,432	,242	24	,481	,712	04	,485	,321	16	,478	,352	13	,487	,992	24	,439	,484	19	,399	,961
17	,511	,880	20	,508	,266	29	,515	,511	11	,503	,990	01	,489	,291	06	,450	,653	24	,410	,761
10	,532	,885	30	,518	,484	27	,542	,930	01	,552	,077	10	,517	,841	10	,486	,495	21	,445	,360
28	,550	,834	23	,561	,798	08	,546	,468	12	,556	,179	25	,557	,073	13	,511	,253	11	,492	,190
06	,563	,502	08	,564	,089	22	,566	,620	10	,559	,197	19	,593	,474	26	,519	,222	12	,531	,959
03	,576	,396	03	,629	,112	19	,597	,298	28	,621	,917	11	,604	,980	09	,543	,339	03	,561	,999
19	,675	,770	04	,650	,519	14	,635	,198	30	,692	,459	29	,665	,740	15	,601	,894	22	,629	,428
21	,679	,140	02	,705	,049	06	,650	,038	19	,714	,762	14	,680	,281	30	,668	,138	05	,651	,748
24	,681	,502	29	,719	,073	16	,661	,853	02	,739	,273	07	,712	,392	11	,692	,386	23	,727	,674
05	,711	,934	21	,749	,253	20	,753	,382	13	,780	,739	08	,739	,298	25	,708	,597	29	,790	,444
27	,765	,695	06	,806	,299	25	,758	,508	24	,792	,183	06	,778	,371	14	,807	,093	17	,803	,130
08	,806	,199	22	,829	,730	17	,781	,187	27	,804	,608	23	,780	,602	16	,843	,548	04	,810	,307
12	,830	,837	16	,837	,464	11	,838	,675	05	,818	,906	24	,843	,888	05	,862	,891	14	,823	,319
23	,858	,330	17	,861	,173	09	,843	,497	17	,884	,133	17	,878	,692	08	,870	,662	26	,874	,935
29	,904	,384	26	,926	,264	02	,912	,582	03	,912	,635	03	,903	,223	21	,892	,206	08	,924	,490
04	,920	,142	27	,935	,367	03	,939	,162	29	,939	,327	09	,945	,099	02	,937	,752	27	,959	,463
02	,978	,990	07	,977	,962	07	,976	,046	21	,974	,114	05	,969	,135	27	,946	,797	25	,970	,483

Tabla 2. Tabla de números aleatorios (continuación), columnas 15 a 28 de 28. Fuente Normativa SCT (2010 2010 Norma M-CAL-1-02/01).

COLUMNA 15			COLUMNA 16			COLUMNA 17			COLUMNA 18			COLUMNA 19			COLUMNA 20			COLUMNA 21		
N°	A	B																		
09	,024	,863	02	,033	,198	26	,010	,881	27	,062	,946	16	,023	,779	03	,036	,004	26	,033	,187
02	,052	,746	14	,050	,386	30	,034	,493	20	,105	,481	06	,087	,867	07	,065	,218	17	,078	,980
17	,102	,330	03	,068	,639	09	,105	,661	24	,114	,341	17	,100	,228	12	,093	,656	28	,095	,360
05	,105	,257	18	,110	,507	27	,120	,026	06	,118	,291	23	,112	,371	28	,143	,172	10	,098	,681
03	,177	,397	25	,121	,844	05	,146	,864	10	,133	,176	10	,132	,012	26	,150	,062	13	,158	,834
28	,210	,054	16	,124	,840	12	,158	,520	15	,194	,337	04	,167	,899	02	,156	,037	08	,227	,327
08	,215	,363	10	,144	,799	13	,185	,311	01	,208	,356	12	,188	,317	25	,224	,402	29	,252	,799
01	,216	,565	24	,264	,012	21	,235	,217	04	,211	,195	25	,208	,157	01	,249	,070	14	,277	,589
14	,243	,001	09	,320	,477	16	,255	,087	17	,285	,365	02	,301	,488	06	,270	,159	24	,291	,767
20	,248	,171	11	,337	,844	17	,275	,994	26	,333	,212	01	,305	,407	30	,272	,166	18	,304	,223
23	,274	,107	20	,350	,357	02	,302	,180	22	,363	,883	28	,352	,893	24	,311	,710	02	,311	,289
18	,286	,318	01	,364	,928	08	,302	,916	29	,372	,405	15	,382	,824	13	,324	,237	06	,323	,392
04	,338	,412	20	,446	,280	23	,394	,282	11	,377	,643	13	,405	,577	23	,336	,111	20	,331	,607
15	,392	,694	22	,479	,792	20	,451	,981	14	,387	,841	19	,423	,676	16	,430	,776	27	,388	,921
16	,524	,998	13	,487	,440	10	,461	,903	28	,421	,374	29	,441	,141	10	,453	,583	30	,409	,779
12	,562	,403	29	,491	,462	22	,494	,238	05	,469	,672	03	,461	,275	27	,497	,792	03	,466	,882
22	,572	,306	19	,503	,085	01	,512	,943	09	,481	,225	18	,632	,622	21	,509	,486	25	,474	,271
07	,574	,599	04	,548	,862	11	,539	,651	21	,527	,329	07	,650	,804	17	,575	,769	22	,525	,536
11	,601	,417	27	,632	,524	07	,539	,595	18	,664	,620	08	,688	,809	08	,623	,401	16	,620	,675
13	,634	,908	08	,634	,758	03	,587	,207	02	,707	,927	05	,695	,318	05	,625	,428	21	,631	,689
21	,672	,320	06	,636	,078	24	,604	,487	25	,728	,972	11	,701	,076	18	,668	,679	05	,689	,387
19	,709	,717	05	,728	,205	29	,617	,827	19	,733	,041	24	,715	,107	20	,674	,385	15	,711	,520
26	,735	,040	17	,748	,647	14	,801	,584	16	,749	,832	21	,726	,232	19	,680	,948	12	,759	,089
30	,756	,919	15	,753	,687	15	,835	,529	30	,770	,294	27	,780	,790	15	,714	,161	11	,777	,732
29	,834	,647	07	,816	,866	25	,838	,568	03	,845	,145	26	,837	,920	11	,756	,366	19	,780	,435
10	,841	,414	28	,828	,783	06	,878	,828	13	,849	,215	20	,850	,881	09	,867	,443	04	,782	,983
24	,854	,818	23	,895	,420	18	,931	,809	07	,859	,555	14	,867	,832	14	,874	,109	07	,872	,009
25	,865	,377	21	,931	,538	04	,952	,539	08	,863	,659	22	,925	,020	22	,884	,186	01	,921	,714
27	,951	,601	26	,948	,020	19	,961	,147	23	,977	,980	09	,951	,722	29	,963	,612	09	,932	,817
06	,970	,582	12	,993	,399	28	,971	,177	12	,981	,369	30	,958	,056	04	,982	,624	23	,947	,065

COLUMNA 22			COLUMNA 23			COLUMNA 24			COLUMNA 25			COLUMNA 26			COLUMNA 27			COLUMNA 28		
N°	A	B																		
12	,039	,952	26	,030	,935	16	,066	,465	02	,073	,716	16	,052	,023	21	,026	,979	29	,015	,576
11	,068	,886	03	,060	,411	08	,074	,588	26	,073	,191	01	,057	,097	17	,061	,284	07	,053	,293
30	,087	,744	13	,061	,073	11	,094	,848	16	,084	,853	04	,126	,221	06	,100	,271	10	,076	,649
01	,091	,565	29	,111	,346	18	,151	,776	11	,122	,434	22	,136	,180	05	,102	,512	25	,089	,624
17	,100	,054	24	,179	,957	17	,154	,899	14	,158	,228	13	,145	,937	10	,118	,161	20	,233	,131
10	,244	,316	18	,202	,827	21	,162	,388	05	,185	,013	07	,196	,890	16	,127	,482	23	,236	,208
23	,245	,068	09	,222	,757	01	,171	,577	28	,220	,077	20	,209	,818	07	,262	,867	09	,238	,602
21	,283	,212	06	,233	,348	03	,227	,223	10	,273	,248	05	,232	,440	25	,297	,273	13	,264	,529
22	,290	,911	11	,234	,433	10	,252	,633	15	,280	,688	30	,248	,992	13	,317	,603	03	,284	,159
02	,305	,651	22	,255	,199	12	,274	,798	07	,285	,144	06	,262	,144	08	,319	,418	26	,352	,556
19	,371	,760	08	,267	,539	26	,299	,849	06	,290	,480	10	,282	,849	02	,363	,012	02	,358	,074
16	,412	,546	20	,317	,497	25	,351	,025	18	,306	,040	02	,405	,846	27	,429	,830	30	,404	,864
27	,415	,342	21	,331	,700	20	,351	,648	22	,370	,717	19	,420	,814	14	,437	,979	17	,417	,540
03	,467	,080	07	,356	,936	05	,393	,807	21	,371	,993	12	,453	,635	20	,448	,336	27	,432	,112
15	,472	,598	27	,408	,653	06	,438	,003	24	,437	,365	09	,465	,333	26	,478	,089	05	,455	,025
28	,488	,366	28	,542	,693	27	,472	,786	17	,467	,216	18	,473	,585	28	,496	,811	14	,472	,038
06	,498	,203	17	,566	,354	24	,503	,865	27	,488	,357	08	,511	,396	12	,508	,117	21	,515	,091
09	,523	,191	16	,594	,375	09	,583	,838	30	,587	,837	15	,515	,748	29	,516	,111	12	,520	,313
13	,567	,206	30	,613	,374	07	,591	,838	19	,594	,774	03	,557	,654	23	,573	,572	04	,591	,563
29	,604	,413	04	,687	,895	13	,624	,101	09	,610	,154	26	,571	,777	18	,618	,927	28	,612	,659
14	,673	,683	02	,696	,291	04	,651	,107	03	,670	,759	14	,725	,884	19	,654	,978	06	,625	,841
26	,699	,425	05	,709	,106	22	,703	,498	12	,715	,441	25	,767	,364	04	,702	,179	16	,709	,114
18	,714	,148	19	,741	,156	19	,717	,097	08	,739	,445	29	,802	,856	01	,720	,585	22	,736	,629
04	,763	,614	14	,798	,892	02	,730	,916	20	,771	,106	24	,840	,712	22	,738	,605	08	,779	,508
20	,787	,802	15	,820	,982	23	,752	,333	25	,774	,162	11	,863	,004	11	,804	,285	15	,833	,849
25	,858	,631	12	,867	,827	29	,760	,128	23	,776	,324	28	,870	,625	03	,818	,633	19	,844	,384
05	,896	,523	10	,882	,524	28	,881	,976	01	,847	,353	27	,874	,928	30	,916	,047	01	,891	,134
08	,917	,263	23	,909	,462	14	,886	,964	29	,929	,952	23	,885	,718	09	,929	,856	18	,906	,116
07	,945	,989	01	,918	,194	30	,929	,356	04	,935	,700	21	,906	,887	24	,956	,482	11	,943	,163
24	,948	,610	25	,975	,811	15	,988	,172	13	,937	,494	17	,950	,183	15	,958	,584	24	,974	,633

Conocida la ubicación espacial del número de muestras dentro de la superficie de longitud establecida se tiene como principal finalidad conocer el error de estimación con relación a la distribución dentro de la superficie compactada, considerando los aspectos como el requisito de calidad del grado de compactación (según Normativa) de los materiales para cuerpo de terraplén, subyacente, subrasante o pavimento, según sea el caso.

Se muestra una aplicación de las tablas de números aleatorios y de la fórmula, integradas dentro de la Norma, como también para la nueva distribución propuesta, con la finalidad de determinar que ubicación espacial del número de muestras ofrece menor error de estimación y suponiendo que se desea conocer el número y la ubicación de muestras en un tramo compactado de base hidráulica con la longitud antes mencionada de 600 metros (L), ya obtenido el número de muestras que fue de un total de 12, un ancho de 11 metros (A), el procedimiento para el caso que se requiera ya sea en el cuerpo de terraplén, subyacente o pavimento es el mismo razón por lo cual no se detalla para cada uno. Se toma como tramo de prueba un intervalo de datos con valores de entre 100 y 105.5 % (valores propuestos), tomando en consideración que el tramo de prueba está bien compactado y que entre cada punto de muestreo seleccionado se tenga solamente una variación de 0.5 del grado de compactación. Posteriormente se analiza también la metodología con datos reales obtenidos del proceso de verificación de compactación. Como se puede apreciar, esta metodología se puede aplicar para estudiar y analizar cualquier parámetro físico y su cambio en el espacio, es por esta razón que los valores que aquí se utilizan sólo son propuestos como mera referencia de análisis.

### ***5.1 Aplicando la Normativa.***

Al conocer que para la longitud en estudio se requiere de 12 muestras, posteriormente se selecciona al azar una columna de las presentadas en las tablas de números aleatorios, en este caso se escoge la columna número uno.

**Tabla 3. Tabla de números aleatorios seleccionada de la Normativa para determinar los valores A y B.**

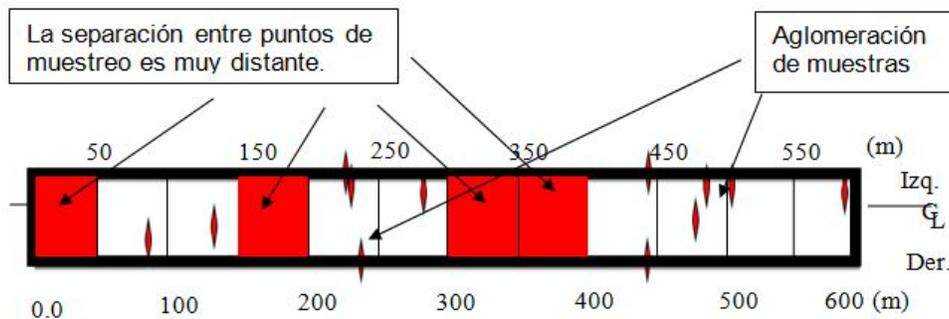
Columna 1		
N°	A	B
1	0.473	0.738
2	0.397	0.001
3	0.983	0.753
4	0.745	0.967
5	0.846	0.823
6	0.378	0.989
7	0.385	0.831
8	0.139	0.262
9	0.802	0.491
10	0.815	0.814
11	0.219	0.421
12	0.744	0.014
13	0.411	0.557
14	0.851	0.546
15	0.045	0.075
16	0.326	0.953
17	0.348	0.308
18	0.531	0.993
19	0.214	0.295
20	0.56	0.406
21	0.08	0.571
22	0.737	0.928
23	0.134	0.99
24	0.138	0.122
25	0.426	0.783
26	0.9	0.999
27	0.674	0.054
28	0.87	0.22
29	0.233	0.873
30	0.121	0.381

Selección del número de muestras dentro de la columna de números aleatorios

Se ubica entonces en la subcolumna "N", de la tabla anterior, los números menores o iguales a 12 (n) los cuales indican los valores correspondientes A y B que determinaran la distancia longitudinal y transversal al eje del tramo, quedando la ubicación del número de muestras tal como se observa en la Tabla 4. y la Figura 9.

**Tabla 4. Selección del número y ubicación de las muestras.**Columna de números aleatorios compuesta para compactación: 1 N° de pruebas: 12 Fecha: \_\_\_\_\_Cadenamiento del origen del tramo Km1: 0+000 Cadenamiento al término del tramo Km2: 0+600 Longitud del tramo: L = 600.00 Ancho del tramo A = 11

N°	A	B	Distancia longitudinal (m), $dL$	Distancia transversal (m), $dA$	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km)	Distancia transversal al eje (m), $dA'$	Lado
	(a)	(b)	(a x L)	(b x A)	(Km1 + $dL$ )	( $dA - A/2$ )	
1	0.473	0.738	283.8	8.118	0+283.80	2.618	Izq.
2	0.397	0.001	238.2	0.011	0+238.20	-5.489	Der.
3	0.983	0.753	589.8	8.283	0+589.80	2.783	Izq.
4	0.745	0.967	447	10.637	0+447.00	5.137	Izq.
5	0.846	0.823	507.6	9.053	0+507.60	3.553	Izq.
6	0.378	0.989	226.8	10.879	0+226.80	5.379	Izq.
7	0.385	0.831	231	9.141	0+231.00	3.641	Izq.
8	0.139	0.262	83.4	2.882	0+083.40	-2.618	Der.
9	0.802	0.491	481.2	5.401	0+481.20	-0.099	Der.
10	0.815	0.814	489	8.954	0+489.00	3.454	Izq.
11	0.219	0.421	131.4	4.631	0+131.40	-0.869	Der.
12	0.744	0.014	446.4	0.154	0+446.40	-5.346	Der.

**Figura 9. Representación gráfica del tramo y la ubicación de los sitios donde se realizarán las muestras, según la Normativa.**

En la aplicación realizada se presentan los resultados obtenidos del proceso de determinación del número de muestras y esta arroja un conjunto de datos muy disperso con relación a su ubicación espacial, como puede observarse en la Figura 9, en ciertas partes se aglomeran y en otras existe una separación considerable.

## 5. 2 Muestreo propuesto.

Ahora bien, se hace la propuesta siguiente con el fin de que se logre una distribución más uniforme del muestreo, utilizando el mismo número de muestras que el ejemplo anterior, como también usando la misma columna de

las tablas de números aleatorios, dando como resultado la ubicación del número de muestras como se puede apreciar en el Tabla 5 y la Figura 10.

**Tabla 5. Propuesta de selección del número y ubicación de las muestras.**

Columna de números aleatorios compuesta para compactación: 1 N° de pruebas: 12 Fecha: \_\_\_\_\_  
 Cadenamiento del origen del tramo Km1: 0+000 Cadenamiento o al término del tramo Km2: 0+600 Longitud del tramo: L= 600.00 Ancho del tramo A= 11

Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba	A	B	Factor distancia longitudinal	Distancia transversal (m), dA	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km)	Distancia transversal al eje (m), dA'	Lado
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)	(a x s)	(b x A)	( Km <sub>n</sub> + dL)	(dA-A/2)	
0	0+000								
1	0+050	50	0.473	0.738	23.65	8.118	0+023.65	2.618	Izq
2	0+100	50	0.397	0.001	19.85	0.011	0+069.85	-5.489	Der
3	0+150	50	0.983	0.753	49.15	8.283	0+149.15	2.783	Izq
4	0+200	50	0.745	0.967	37.25	10.637	0+187.25	5.137	Izq
5	0+250	50	0.846	0.823	42.3	9.053	0+242.30	3.553	Izq
6	0+300	50	0.378	0.989	18.9	10.879	0+268.90	5.379	Izq
7	0+350	50	0.385	0.831	19.25	9.141	0+319.25	3.641	Izq
8	0+400	50	0.139	0.262	6.95	2.882	0+356.95	-2.618	Der
9	0+450	50	0.802	0.491	40.1	5.401	0+440.10	-0.099	Der
10	0+500	50	0.815	0.814	40.75	8.954	0+490.75	3.454	Izq
11	0+550	50	0.219	0.421	10.95	4.631	0+510.95	-0.869	Der
12	0+600	50	0.744	0.014	37.2	0.154	0+587.20	-5.346	Der

Columna: N°.- Número de prueba.

s.-Sección de prueba, división de la longitud total a en subtramos de 50 m. A y B.- Factores determinados por la tabla de números aleatorios seleccionada.

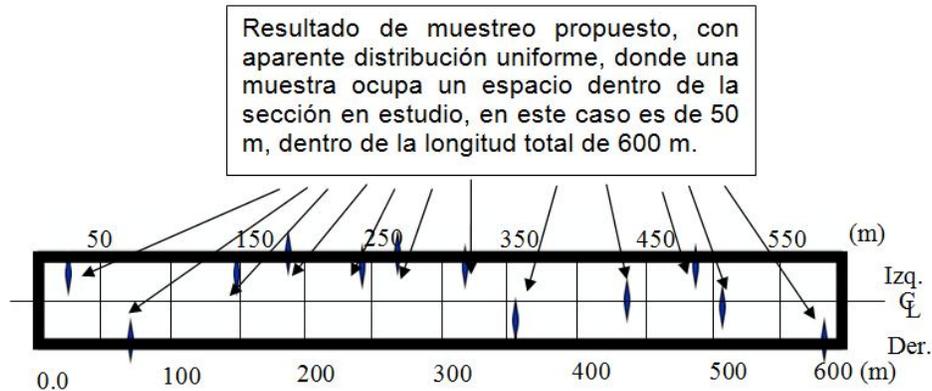
dL.- Factor de distancia longitudinal es el producto de la sección de prueba por el factor A.

Distancia transversal.- Producto del factor B, correspondiente al número de prueba, por el valor del ancho del tramo.

Distancia longitudinal (ubicación en el sitio).- Producto de la sumatoria del cadenamiento acumulado más factor dL, correspondiente al número de prueba.

Distancia transversal al eje.- Distancia transversal, tomando el centro del tramo como eje que separa distancias positivas o negativas.

Lado.- determinación del lado a realizar la muestra, si es negativa es el lado derecho y si es positiva será al lado izquierdo.



**Figura 10.** Representación gráfica del tramo y la ubicación de los sitios donde se realizarán las muestras, según la propuesta.

Las Figuras 9 y 10 muestran los sondeos y la distribución espacial sujeta a análisis.

La selección de la distancia de 50 m de longitud para desarrollar el análisis es por el hecho de que si se tiene lo que establece la ecuación 1:

$$n = \frac{L}{50}$$

Se deduce entonces que para una longitud de 50 m se debería seleccionar una prueba, ya que:

$$n = \frac{50}{50} = 1$$

Por lo que se parte del supuesto que una sola prueba es capaz de representar 50 metros de longitud del tramo propuesto para el estudio. Limitando que esta condición se repita en cada incremento de 50 m, es decir se propone que un punto de muestreo sea ubicado aleatoriamente dentro de cada 50 m de longitud del tramo de carretera en análisis. Cumpliendo así lo que menciona en el libro *Military Soils Engineering (1998), CHAPTER 8 Soil Compaction Section I. "Soil Properties. Affected by Compaction"* en la Sección IV. Control de Calidad (*Section IV. Quality Control*), en el tema de muestreo aleatorio (*Random Sampling*), donde se menciona que una forma de realizar un muestreo aleatorio es el de dividir la longitud analizada en subtramos del mismo tamaño y ubicar al azar un punto de muestreo dentro del subtramo.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6. 1 Superficie Geoestadística.

En la distribución del muestreo considerado para este análisis; se orientaron respecto a los ejes “X” y “Y”; se requiere de parámetros medibles a los cuales se les llama “atributos” y se designó la variable “Z” se les atribuye valores de compactación, estos son propuestos dentro de los parámetros que establece la Normativa para cuerpo de terraplén, subyacente, subrasante y pavimento, según sea el caso, que para el estudio se eligió el de la capa de subbase.

Se realiza un análisis por el método de Kriging Ordinario; el orden y la orientación establecidos para el análisis de las superficies que se muestran en la Figura 11. La razón para desarrollar el análisis es para conocer el comportamiento de la superficie en estudio a partir de los parámetros de la conjeturada compactación y de cómo afecta la distancia entre los puntos del muestreo.

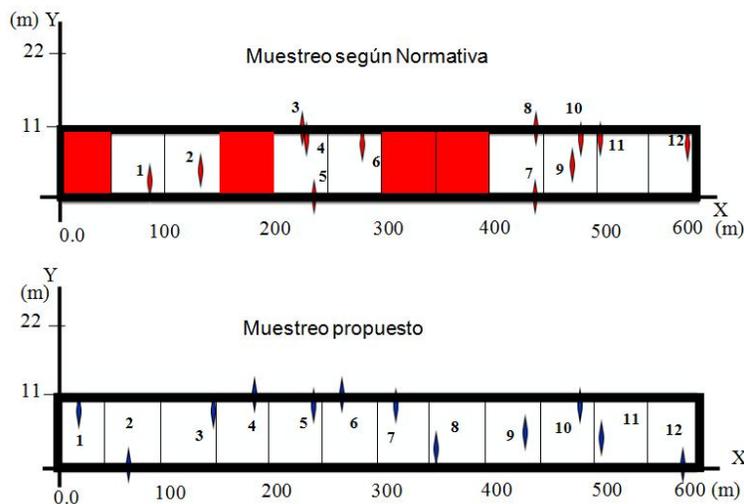


Figura 11. Orientación de las superficies analizadas.

## 6.2 Parámetros de medición.

En las vías terrestres, el conocimiento del grado de compactación es frecuentemente empleado para inferir el comportamiento de la carretera bajo la influencia de las cargas a que será sometida durante su vida útil. Existen parámetros que se tienen que cumplir, para garantizar que la vía será resistente, por lo que se adoptan las medidas que sugiere la Normativa SCT, Características de los Materiales (CMT) donde se especifican los grados de compactación, en relación a la parte estructural de la carretera que se esté analizando, recalcando para el caso, es la subbase, tal como se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 6. Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos. Fuente SCT (2010 Norma N-CMT-4-02-001/04).**

Características	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^{6[1]}$	$\Sigma L > 10^{6[1]}$
Límite líquido <sup>[2]</sup> , máximo	30	25
Índice plástico <sup>[2]</sup> , máximo	10	6
Valor de Soporte de California (CBR) <sup>[2,3]</sup> , mínimo	50	60
Equivalente de arena <sup>[2]</sup> mínimo	30	40
Desgaste Los Ángeles <sup>[2]</sup> , máximo	50	40
Grado de compactación <sup>[2,4]</sup> , mínimo	100	100

[1]  $\Sigma L$ = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los manuales que se señalan en la Cláusula C. De esta Norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Establecido el grado de compactación mínimo, se determinan las propiedades que tienen los puntos de muestreo de la superficie en estudio, es importante señalar que es necesario usar el mismo número y parámetros del atributo, dando como resultado las siguientes tablas:

**Tabla 7. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa.**

N°	X (metros)	Y (metros)	Z (% de compactación)
1	83.4	2.882	100.0
2	131.4	4.631	100.5
3	226.8	10.879	101.0
4	231.00	9.14	101.5
5	238.20	0.01	102.0
6	283.8	8.118	102.5
7	446.4	0.154	103.0
8	447	10.637	103.5
9	481.2	5.401	104.0
10	489	8.954	104.5
11	507.6	9.053	105.0
12	589.8	8.283	105.5

**Tabla 8. Distribución del muestreo establecido al aplicar el método propuesto.**

N°	X (metros)	Y (metros)	Z (% de compactación)
1	23.65	8.118	100.0
2	69.85	0.011	100.5
3	149.15	8.283	101.0
4	187.25	10.637	101.5
5	242.3	9.053	102.0
6	268.9	10.879	102.5
7	319.25	9.141	103.0
8	356.95	2.882	103.5
9	440.1	5.401	104.0
10	490.75	8.954	104.5
11	510.95	4.631	105.0
12	587.2	0.154	105.5

En ambos casos X es la distancia longitudinal, Y la distancia transversal y Z es el atributo que en este proceso es el grado de compactación supuestamente alcanzado.

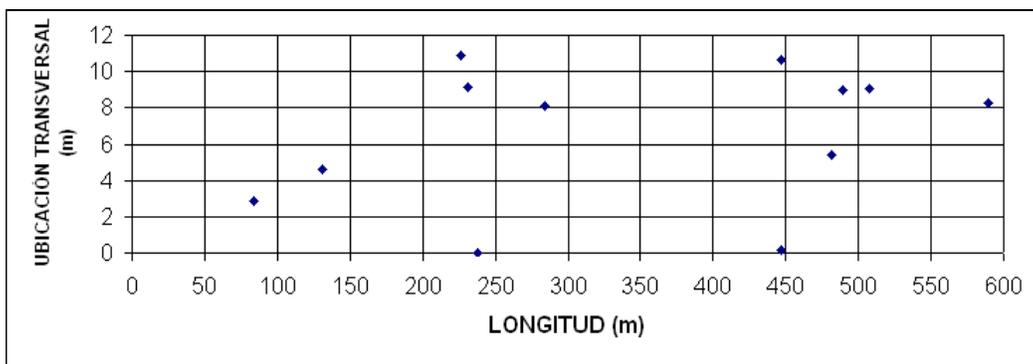
### **6.3 Análisis estadístico.**

Por otra parte, es posible estimar los principales parámetros estadísticos (media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación) del grado de compactación alcanzada en los puntos determinados para llevar a cabo el

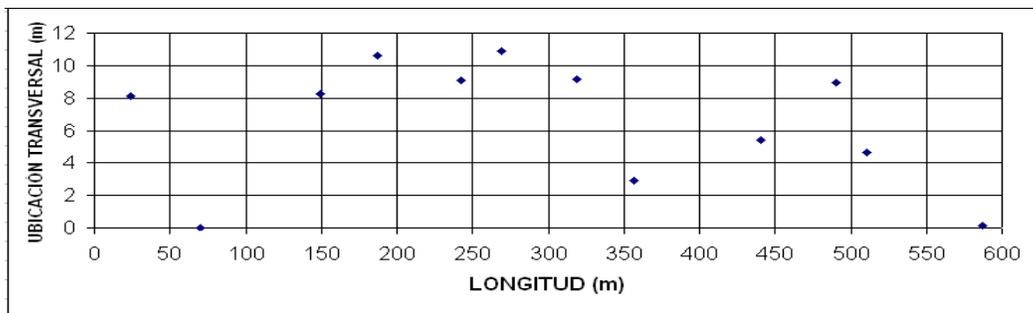
muestreo y realizar un análisis gráfico de la variabilidad (gráfica de dispersión y polígono de frecuencias).

**6.3.1 Grado de compactación.**

El análisis estadístico del grado de compactación del muestreo analizado arroja lo siguiente.



**Figura 12.** Gráfica donde se muestra la dispersión de los puntos de muestreo dentro de un tramo (superficie) de 600 metros de longitud y 11 metros de ancho, según la Normativa SCT.



**Figura 13.** Gráfica donde se muestra la dispersión de los puntos de muestreo dentro de un tramo (superficie) de 600 metros de longitud y 11 metros de ancho, según método propuesto.

En los puntos de muestreo se suponen valores de grado del atributo (grado de compactación), que van desde 100 hasta llegar a 105.5 %, en incrementos de 0.50 entre cada dato, que para el caso en estudio son los grados de compactación supuestamente alcanzados en el sitio de los puntos

de muestreo. Los resultados de los principales parámetros estadísticos para el atributo establecido, para cada caso, es el mismo y a continuación se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9. Parámetros estadísticos del atributo.**

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL ATRIBUTO EN AMBOS CASOS	
Nº de Datos	12
Valor mínimo	100
Valor máximo	105.5
Rango	5.5
Media	102.750
Mediana	102.750
Moda	-----
Desviación estándar	1.80278
Varianza	3.25
Coefficiente de variación	0.01755

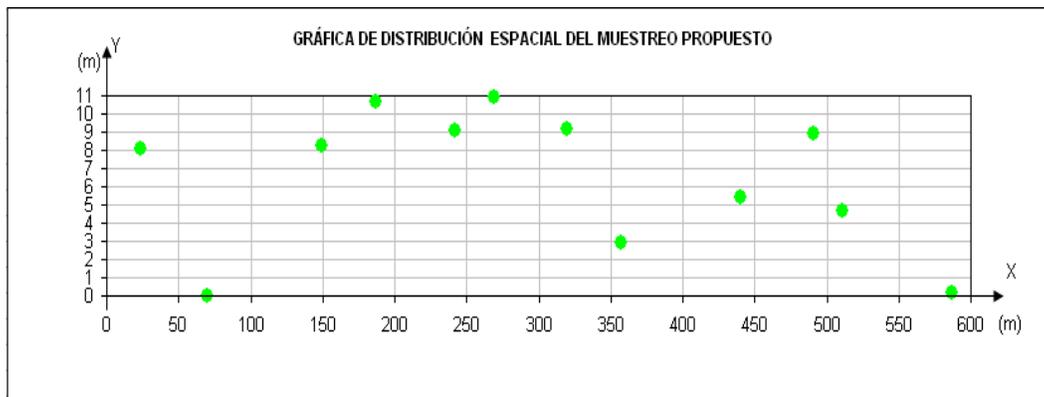
Con esto se acepta el hecho de que se está estudiando una superficie con calidad promedio, similar, para ambos casos, con atributos iguales, sólo que están distribuidos dentro de la superficie de forma distinta.

El análisis estadístico muestra que para determinar el grado de compactación no se toma en cuenta la dispersión del muestreo en el espacio, obteniendo como resultado un valor medio del grado de compactación 102.75 %, en ambos casos, valor que es aceptable según la Normativa SCT. Queda entendido el hecho que si se analiza solamente los valores del atributo (grado de compactación) no pasa nada, el resultado finalmente buscado no se altera y se acepta el valor que al final arroja el análisis estadístico realizado a este, por lo que entonces se estudian las afectaciones que sufre el valor finalmente establecido por los resultados del muestreo, en relación a las distancias que existen entre cada punto muestreado para así tener el conocimiento de obtener una distancia de los puntos de muestreo que ofrezca una mayor representación de la superficie analizada, de esta manera se obtendrán resultados confiables y característicos del tramo de construcción de alguna vía terrestre que se pretende controlar, verificar y asegurar su calidad.

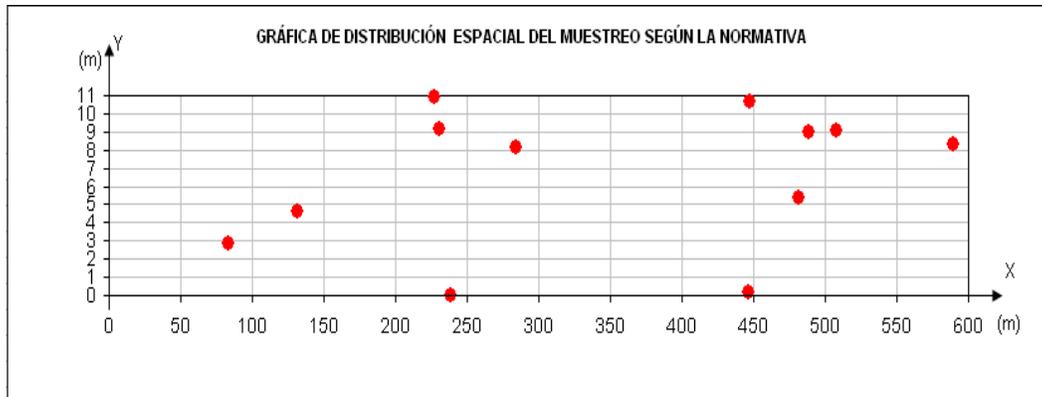
La manera de distribuir el muestreo actualmente (normatividad vigente) es de manera heterogénea y el muestreo propuesto tiene una distribución homogénea, razón por lo cual se utiliza un análisis geoestadístico a ambas superficies en estudio para determinar que tanto influye la distribución espacial en la determinación del atributo, grado de compactación, ya que la técnica Geoestadística permite relacionar la ubicación espacial de las muestras con el valor del atributo en cada punto muestreado.

#### 6.4 Análisis Geoestadístico de las superficies.

Dado que el análisis estadístico no es suficiente para determinar una distancia óptima de muestreo, es necesario analizar geoestadísticamente, aplicando el método de Kriging ordinario ya mencionado en el marco teórico, a los muestreos: propuesto y según Normativa SCT. Figura 14 y Figura 15.



**Figura 14.** Representación gráfica de la ubicación de los puntos de muestreo dentro de la superficie por analizar con geoestadística. Para el caso del muestreo propuesto.



**Figura 15.** Representación gráfica de la ubicación de los puntos de muestreo dentro de la superficie por analizar con geoestadística. Para el caso de la Normativa SCT.

Una vez identificado los puntos de muestreo dentro de la superficie analizada, para cada caso correspondiente, se determina el grado de compactación, con lo que se observa dentro del desarrollo ya descrito que, ambos parámetros del grado de compactación se plantearon tratando de cumplir las condiciones mínimas, solicitadas por la Normativa SCT, para cuando se construye una capa de subbase, tomando en cuenta las condiciones siguientes:

#### **6.4.1** *Condiciones del análisis.*

1.- La primera condición que tiene que ser satisfecha es tener un valor asignado (atributo) para cada punto de muestreo. Para este trabajo se utiliza lo que establece la Normativa SCT para el grado de compactación de la subbase que requiere de 100 % mínimo.

2.- La segunda condición es muy importante que se cumpla dado que la omisión repercute para que se pueda llevar a cabo el presente análisis geoestadístico del muestreo realizado y es de que sean por lo menos 10 (diez) puntos de muestreo.

3.- La tercera condición es que se conozca la ubicación longitudinal y transversal, dentro de la superficie, del punto muestreado.

El análisis del muestreo realizado a las superficies admite que se cumple con lo establecido en la Normativa SCT, para el caso del grado de compactación, en cuanto a todo lo especificado para alcanzar como mínimo un grado de compactación de 100 %, para cada punto muestreado, además de contar con 12 (doce) puntos de muestreo, de igual manera se tiene identificado la ubicación espacial de cada punto. Por lo que utilizando ArcGis 9, se puede obtener un diagrama del posible comportamiento del grado de compactación dentro de cada superficie en estudio, esto aplicando el método del Kriging ordinario a los puntos de muestreo, obteniendo así para el primer caso de análisis lo que se muestra en las Figuras 16 y 17.

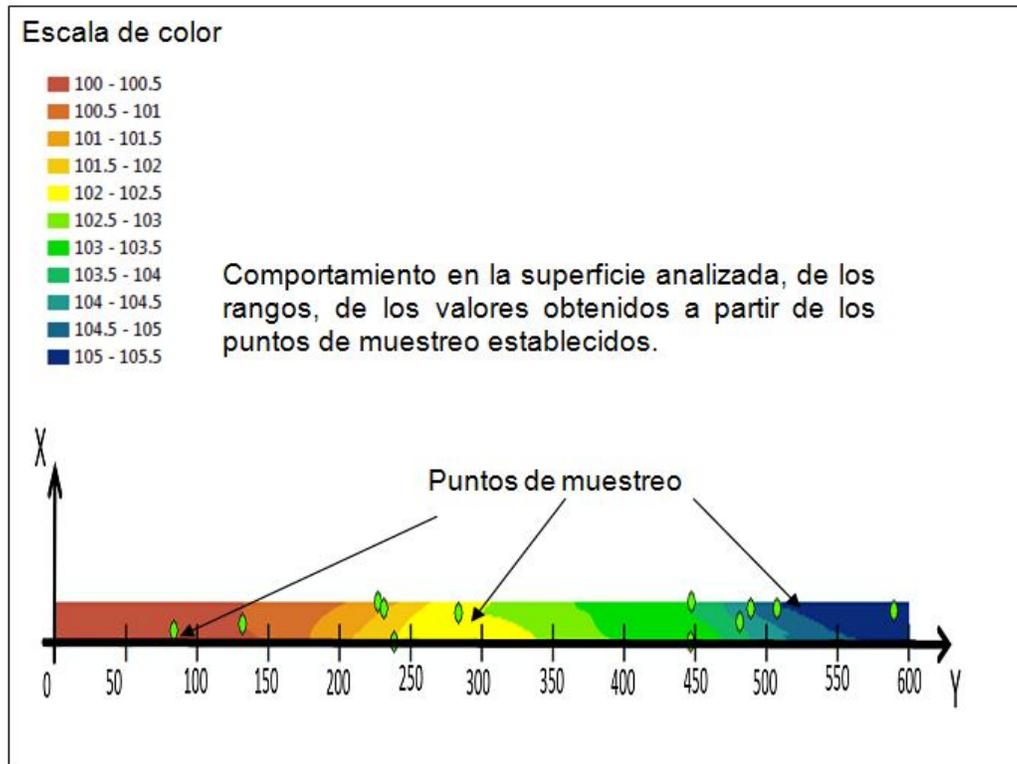
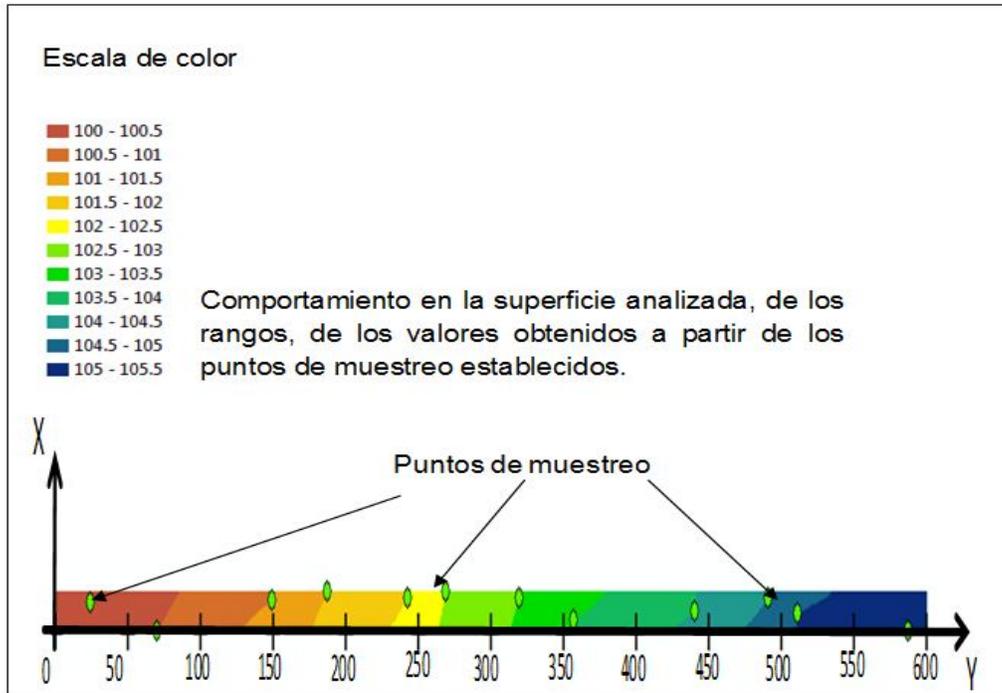


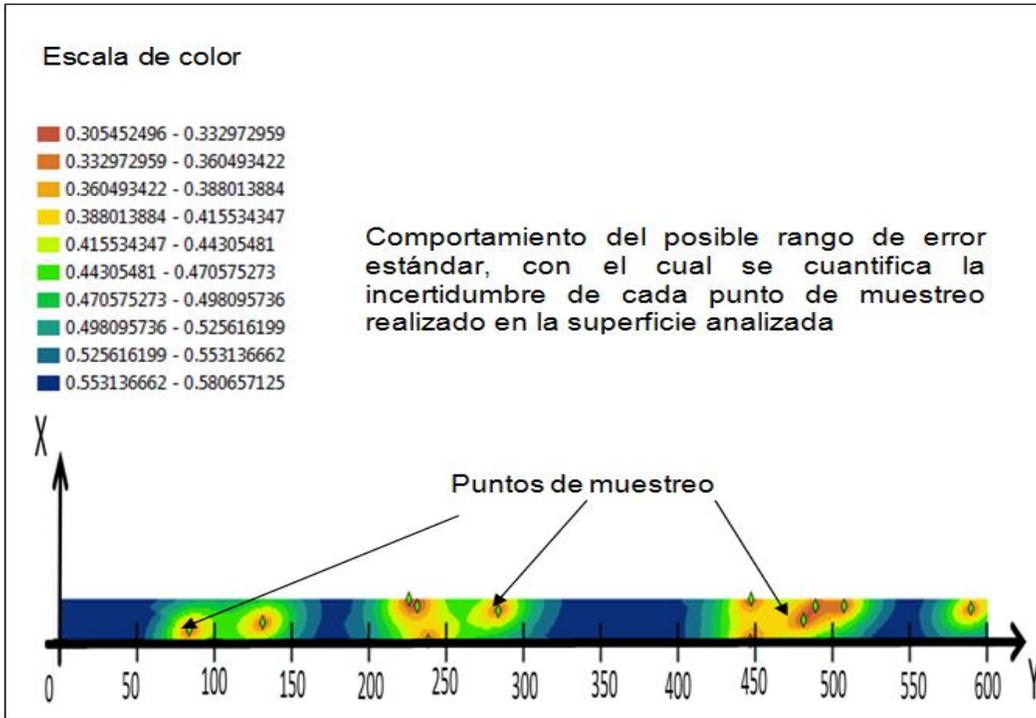
Figura 16. Mapa de la superficie del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geostatística.



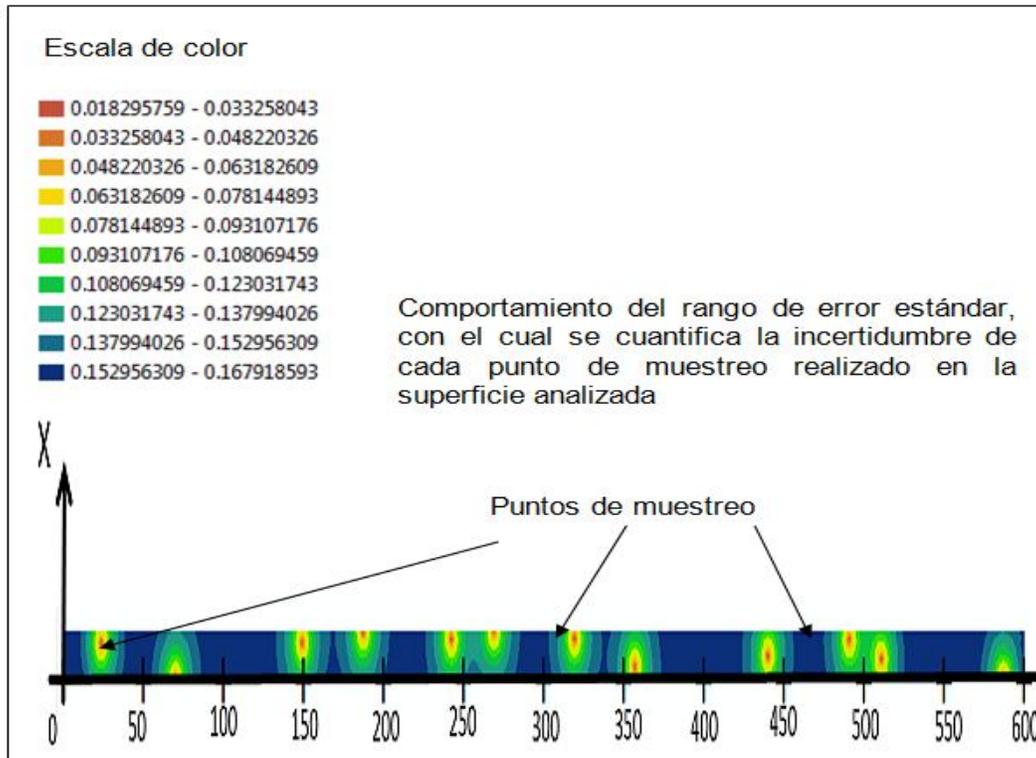
**Figura 17.** Mapa de la superficie del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

A primera vista la Figura 16 detalla de manera esquemática que las áreas de la superficie representadas por cada punto muestreado son más irregulares en comparación con lo que se puede observar en la Figura 17.

Una vez obtenidos los mapas de cada superficie en análisis, geoestadísticamente con el método Kriging Ordinario, y con el mismo método se genera un mapa que indique los posibles rangos de error con relación al valor de medición del punto muestreado, obteniendo como resultado lo que se muestra en las Figuras 18 y 19.



**Figura 18.** Mapa del error estándar, de la superficie del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geostatística.



**Figura 19.** Mapa del error estándar, de la superficie del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

Se puede observar que el error estándar, comparando las Figuras 18 y 19, disminuye de manera considerable en la distribución propuesta tal como lo indican los rangos de error para cada caso expuestos en las mismas figuras, haciendo notar que efectivamente las distancias entre los puntos de muestreo influye en la representación de la superficie analizada.

El análisis realizado a las correspondientes superficies, permite conocer también el rango de la distancia de correlación de los datos que es el valor donde se estabiliza el Variograma, como puede observarse en las Figuras 20, 21 y 22. Por lo tanto para la superficie de la capa en estudio indica la correlación de datos, muestra cómo se distribuye la representación a partir de la distribución y obtención de datos de los puntos muestreados.

Se puede observar que con la distribución que establece la Normativa SCT la representación es de forma elíptica con una distancia aproximada de 110 m en sentido longitudinal y de 26 m en sentido transversal de la superficie analizada. Con la distribución propuesta se tiene una correlación de datos de forma circular con un radio de 26.72 m. Aparentemente con la distribución establecida por la SCT, para este caso, cada punto de muestreo representa una mayor superficie comparada con la distribución de muestreo propuesta, solo que no hay que dejar de ver que al distribuir de manera más homogénea el muestreo, tal es el caso de lo propuesto, la representación no solo es más uniforme al pasar de una representación elíptica a una circular con un radio más pequeño pero este último con menos parámetro de error, además de que el diámetro (53.44 m) de representación sobrepasa un poco la distancia propuesta de que un solo punto representa una sección de 50 m dentro de la superficie en estudio.

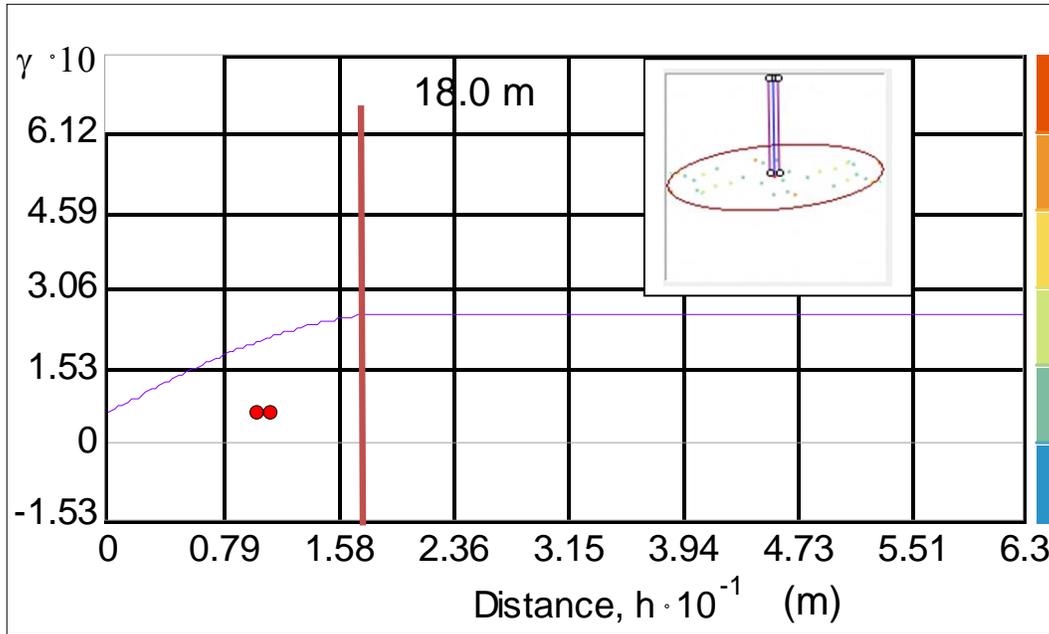


Figura 20. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en el recuadro se puede observar la distancia transversal dentro de la elipse de representación.

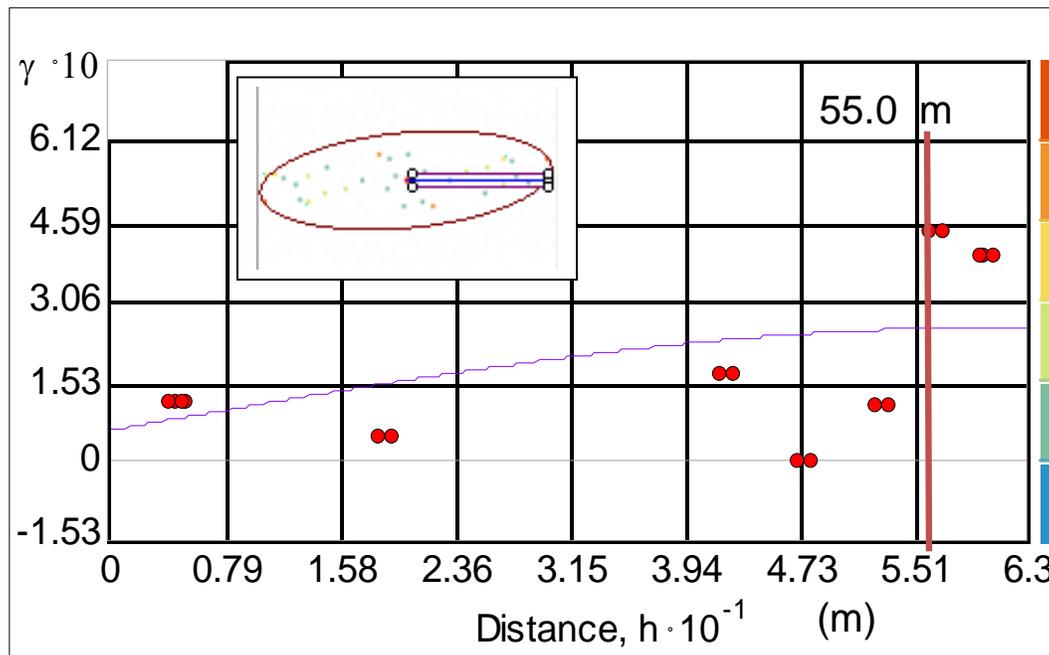


Figura 21. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en el recuadro se puede observar la distancia longitudinal dentro de la elipse de representación.

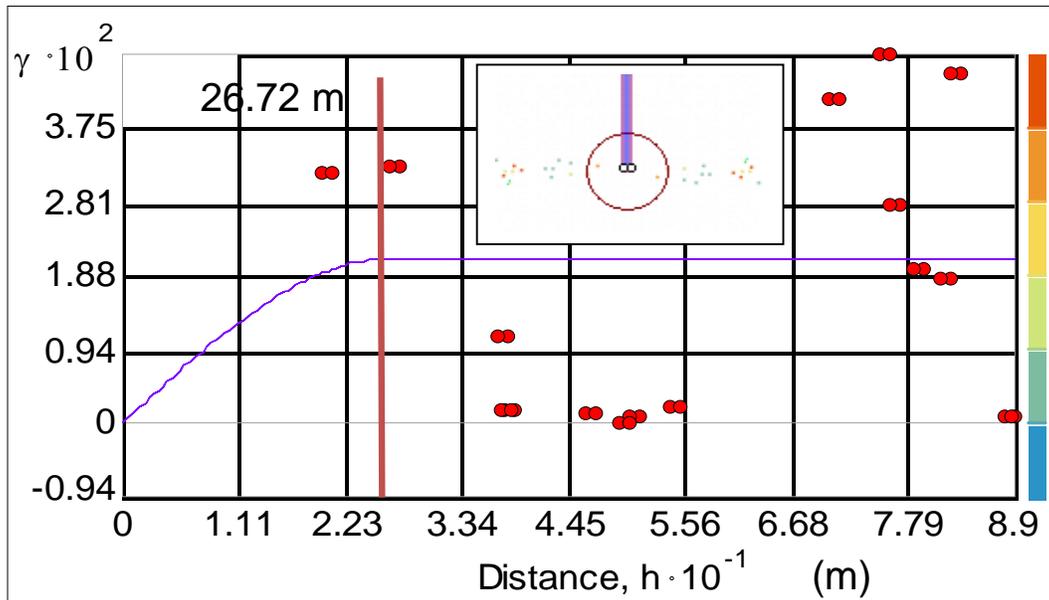


Figura 22. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en el recuadro se puede observar el radio de representación.

Como se muestra en la Tabla 10. Se desarrollaron en total 10 casos de análisis, con los resultados obtenidos de la distancia de correlación, que es la distancia de representación de cada punto de muestreo, obtenida para cada caso, se realizó un análisis estadístico para encontrar una distancia media de correlación (representación) ajustando el resultado final a que la correlación fuese en dirección circular, obteniendo para la distribución según Normativa un radio de representación de aproximadamente 46.26 m, para la distribución propuesta se obtuvo un radio de 23.49 m, por lo que al distribuir los puntos de muestreo como se propone, es posible, que un punto de muestreo puede representar secciones de 50X50 m, ya que un diámetro de representación de 46.98 m alcanzado por lo propuesto es una sección similar. Con lo realizado aplicando la Normativa aparentemente se tiene un diámetro de representación de 93.96 m pero como es una sección de mayor dimensión, el error de estimación también es de mayor valor, en comparación con ese mismo resultado para el caso del muestreo propuesto.

Tabla 10. Parámetros estadísticos de las distancias de correlación.

<i>RESULTADOS DISTANCIAS DE CORRELACIÓN (SUPERFICIE REPRESENTADA)</i>				
CASO	NORMATIVA		PROPUESTA	
	LONG. (m)	TRANS. (m)	LONG. (m)	TRANS. (m)
1	18.00	55.00	26.72	26.72
2	29.00	8.30	19.19	19.19
3	30.00	176.00	9.25	9.25
4	8.50	46.30	20.59	20.59
5	15.70	20.00	21.03	21.03
6	23.00	38.50	80.00	32.00
7	7.75	20.70	18.12	18.12
8	15.10	23.50	22.00	25.30
9	17.60	87.50	27.00	27.00
10	119.00	165.80	13.36	13.36
RPROMEDIO	28.37	64.16	25.73	21.26
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	32.70	60.61	19.82	6.79
<b>PROMEDIO AMBOS SENTIDOS</b>	<b>46.26</b>		<b>23.49</b>	

Los resultados de las medias de error de predicción y su correspondiente media son mostrados en la Tabla 11. Obteniendo la media y la distribución estándar de parámetro menor con la distribución propuesta en comparación con la media de la Normativa. En la Figura 23 se puede observar gráficamente la comparativa de las medias de predicción para los diez casos evaluados.

Tabla 11. Parámetros estadísticos de la media de predicción de error.

<i>VALORES ABSOLUTOS DE LAS MEDIAS DE ERROR DE PREDICCIÓN</i>		
CASO	NORMA	PROPUESTA
1	0.008911	0.002576
2	0.01723	0.01045
3	0.0393	0.01994
4	0.004594	0.009539
5	0.01222	0.001385
6	0.03013	0.002012
7	0.03239	0.003204
8	0.01015	0.002188
9	0.1075	0.00195
10	0.009354	0.009753
PROMEDIO	0.0271779	0.0062997
DESVIACIÓN	0.03056	0.00603

ESTÁNDAR

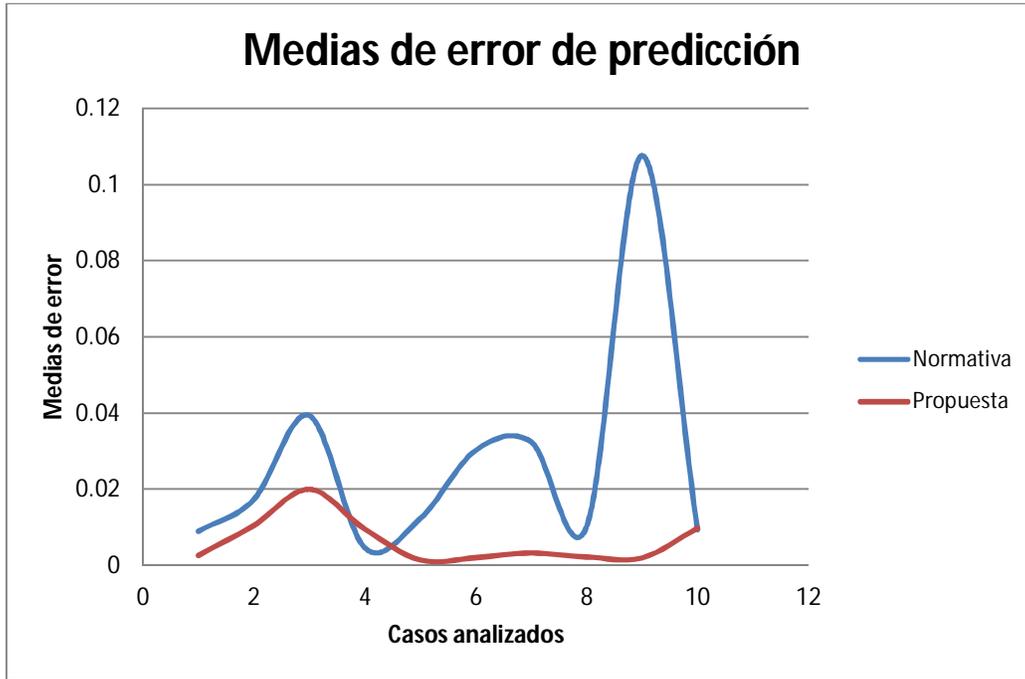


Figura 23. Comparación del Error de predicción de la Normativa y la Propuesta (atributos propuestos).

En la Tabla 12. Se desarrollaron otros 5 casos de análisis, en este caso se presentan atributos reales obtenidos de campo, y al igual que en el caso mostrado anteriormente, los resultados obtenidos presentan la distancia de correlación obtenida para cada caso, obteniendo para la Normativa un radio de representación de aproximadamente 6.07 m, para el muestreo propuesto se obtuvo un radio de 24.72 m, apreciándose para este último, un resultado similar al anteriormente explicado, en cuanto a que se puede establecer una distancia de correlación de hasta 50 m aproximadamente.

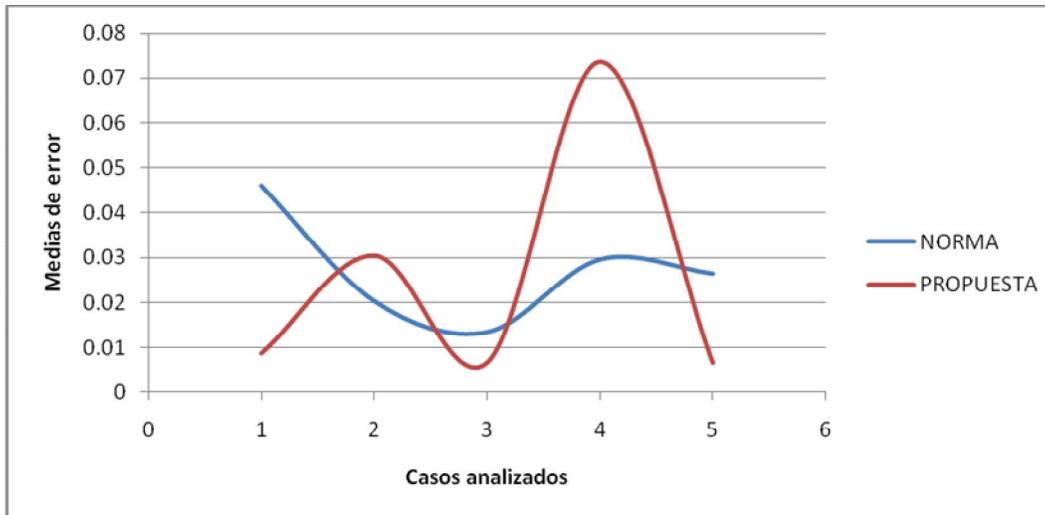
**Tabla 12. Parámetros estadísticos de la distancia de correlación (atributos reales).**

<i>RESULTADOS DISTANCIAS DE CORRELACIÓN (ATRIBUTOS REALES)</i>				
CASO	NORMATIVA		PROPUESTA	
	LONG. (m)	TRANS. (m)	LONG. (m)	TRANS. (m)
1	10.00	18.00	22.55	22.55
2	14.35	14.35	16.64	16.64
3	5.94	5.94	22.00	100.00
4	13.70	13.70	74.00	93.00
5	11.40	14.00	23.00	104.00
RPROMEDIO	5.54	6.60	15.82	33.62
PROMEDIO AMBOS SENTIDOS	6.069		24.719	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3.36	4.41	23.82	43.72

Los resultados de las medias de error de predicción y su correspondiente media son mostrados en la Tabla 13. Obteniendo la media y la distribución estándar de parámetro menor con la propuesta en comparación con la media de la Normativa para el caso del uso de atributos reales. En la Figura 24 se puede observar gráficamente la comparativa de las medias de predicción para los cinco casos evaluados.

**Tabla 13. Parámetros estadísticos de las medias de error de predicción (atributos reales).**

<i>VALORES ABSOLUTOS DE LAS MEDIAS DE ERROR DE PREDICCIÓN (ATRIBUTOS REALES)</i>		
CASO No.	NORMA	PROPUESTA
1	0.04601	0.008785
2	0.02021	0.0305
3	0.01339	0.00669
4	0.02949	0.07372
5	0.02631	0.00669
PROMEDIO	0.013541	0.0126385
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.01224	0.02888



**Figura 24** Comparación del Error de predicción de la Normativa y la metodología Propuesta (atributos reales).

Tanto las figuras como las tablas se pueden sujetar a diversos análisis, sin embargo lo más rescatable de los mismos es que la distancia de correlación para la metodología propuesta se mantiene constante, entre 40 y 50 metros, mientras que para el caso de la normativa oscila entre los 12 y 90 metros.

### **6.5** Características y limitaciones de la información disponible.

El número de puntos muestreados fue seleccionado en relación a lo que establece dentro de la fracción H.3. de la Norma N-CTR-CAR-1-01-009/00, subbases y bases, así como de la N-CTR-CAR-1-04-002/03, terracerías, de la Normativa SCT en donde se especifica que es una por cada 50 metros de longitud de superficie.

La ubicación aleatoria de los puntos de muestreo consideró lo establecido en la fracción D.2. de la Norma M-CAL-1-02/01, Control y Aseguramiento de Calidad, de la Normativa SCT.

Para el caso donde se utiliza lo establecido en la Normativa SCT tal como lo sugiere para una superficie de 600 metros de longitud. Para el segundo caso se propone modificar la ubicación de los puntos de muestreo, haciendo que un punto se ubique aleatoriamente cada 50 metros, hasta

completar los 600 metros de longitud, usando así la misma cantidad de puntos de muestreo que en el primer caso, que son doce los necesarios para cubrir los 600 metros de longitud de superficie analizada.

En los puntos de muestreo se determinaron valores que cumplan con los parámetros establecidos por la Normativa SCT, para el caso de la determinación del grado de compactación de la subbase. Suponiendo que se cumplen con las condiciones necesarias para alcanzar el grado de compactación mínimo requerido por la Normativa SCT. Con ello se trata de obtener, en la medida de lo posible, un valor medio del grado de compactación que represente la longitud de la superficie compactada.

Una dificultad encontrada para el procesamiento geoestadístico de los datos fue que se necesita como mínimo diez puntos de muestreo, por lo que se decidió que para el desarrollo del estudio se realizaría con doce puntos, que repartidos a lo que dice la Normativa SCT que sea uno por cada 50 metros, solventando así el inconveniente de tener un número de puntos superior a diez además de que 600 metros de longitud de superficie, es una producción en términos reales, con las dimensiones propuestas, que se puede cumplir en una jornada de trabajo.

## 7 CONCLUSIONES

La distancia de correlación con respecto a la normativa vigente presenta variaciones más grandes que las obtenidas con respecto al método propuesto, estas pueden desde 10 metros hasta 80 metros aproximadamente para el primero, en tanto que para el segundo se mantienen entre 40 y 50 metros, tomando en cuenta un diámetro efectivo de correlación. Como se puede apreciar, la metodología propuesta por la normativa puede acarrear errores, dependiendo sobre todo del uso de la tabla de números aleatorios en el espacio completo de análisis. Por el contrario, el encauzar los datos en sub-espacios permite determinar de manera más eficiente el área de correlación del punto muestreado.

Asociado a lo anterior, se observa que la distancia de correlación es influenciada por los valores de los atributos que se estén analizando, esto es debido a que cada parámetro estudiado genera un momento diferente con respecto a cada análisis, por lo cual se puede decir que un máximo ó un mínimo en los datos puede ocasionar una mayor o menor correlación entre los puntos analizados, esta variación podría ser evaluada con métodos estadísticos simples; como el uso de la desviación estándar, el cual motivaría una descripción más específica de la tendencia de los datos.

El análisis geoestadístico es una herramienta complementaria, la cual puede ser utilizada para un análisis estadístico, ambas herramientas pueden ayudar a revisar cualquier proceso de control de calidad, en el caso de estudio, dan una idea general para establecer la distancia de correlación entre los puntos de muestreo. La anterior, a primera vista deberá no ser mayor de 50 metros, ya que un muestreo aleatorio mayor produce menores correlaciones y por lo tanto se puede presentar una mayor incertidumbre en el modelo.

Para determinar de una manera más eficiente el control de calidad de una vía terrestre, se deberán contemplar entre otras cosas:

- a) Decidir cuál es el promedio a evaluar para la compactación. En el caso de un material uniforme, esta media puede basarse en un conocimiento previo del mismo tipo de suelo a usar en el terraplén. Cuando se trata de materiales heterogéneos, puede ser necesario hacer ajustes diarios de la media especificada.
- b) Establecer el criterio de aceptación o rechazo, el cual consiste en determinar el menor valor posible de la compactación a aceptar. Este valor mínimo puede ser establecido con respecto al conocimiento previo del suelo o modificarse de acuerdo a la heterogeneidad del muestreo.
- c) Definir el área mínima o máxima de la revisión de la compactación para ser evaluada. Estas áreas coincidentes con la obra, pueden variar de unos cuantos metros hasta unos pocos kilómetros, dependiendo sobre todo del avance de obra.
- d) Definir un número pre-establecido de muestras ubicadas aleatoriamente, el cual puede ser establecido o analizado con métodos geoestadísticos, con la finalidad de observar la correlación entre puntos. Las regiones de análisis se pueden establecer antes de que los ensayos se realicen.
- e) Establecer el punto de muestreo de compactación donde el criterio de aceptación o rechazo coincida con el método exacto de muestreo y obtención de la compactación, tanto de laboratorio como de campo.
- f) Establecer los criterios de acción en el caso en el que la compactación no entre dentro de los límites pre-establecidos.
- g) Definir un criterio de re-muestreo de campo en las áreas que no cumplieron con las especificaciones establecidas. Se deberá establecer un nuevo muestreo de campo con un nuevo análisis estadístico y geoestadístico con la finalidad de observar las nuevas correlaciones presentes entre los puntos muestreados.

Lo anterior se rescata de los procedimientos iniciales que plantea el análisis aleatorio de la verificación de la compactación y los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

La correlación de los datos es heterogénea para ambos casos estudiados, por lo que una dirección de correlación no puede ser establecida, esto es principalmente asociado a que se trata de un fenómeno estocástico (no hay comportamiento esférico).

El método geoestadístico aquí descrito y utilizado puede tener variaciones importantes con respecto al área a analizar, los parámetros y la distribución de los mismos entre otros, por lo cual se presenta como complemento del análisis estadístico utilizado actualmente para el control y aseguramiento de calidad de las vías terrestres. Debido sobre todo a que son modelos dinámicos y por tanto las correlaciones y las incertidumbres variarán en mayor o menor medida con respecto al tiempo.

Se hace la recomendación de continuar el estudio para que se pudiera determinar el número de secciones con las cuales se podría llevar a cabo el control de calidad con relación a una longitud determinada, de la superficie de una obra vial en construcción.

Las normas o reglamentos vigentes contribuyen al desarrollo de nuevas vías terrestres, sin embargo las capacidades que estas tienen van cambiando con el tiempo. Las nuevas metodologías tanto de construcción como de análisis pueden ayudar a tener un mejor control de calidad de las obras que vinculan al país y por tanto mejorar la calidad del movimiento de los usuarios.

## **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA REVISADA**

- Armstrong, M. and Roth, C. 1997. Notas del curso Geoestadística Lineal en “El Ciclo de formación especializada en Geoestadística”, Curso: 1997-1998, Centro de Geoestadística de la Escuela Nacional Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia.
- Auvinet, G. G., Z. Medina-Cetina y M. Juárez, 2001. Interpretación Geoestadística de exploraciones geotécnicas. Publicación Instituto de Ingeniería-SMMS, México.
- Cirión, M. R. 2003. Geoestadística RPF-Respuestas a Preguntas Frecuentes. [Documento en línea]. Disponible:  
[http://www.ciriongeo.co.cc/web\\_documents/Geoestadistica\\_PFR.pdf](http://www.ciriongeo.co.cc/web_documents/Geoestadistica_PFR.pdf).  
[Consulta: 2009, Diciembre 12].
- Cheng, C. L., A. A. Oloufab, and H. T. Randolph. 1996. A GIS-based system for tracking pavement compaction. Automation in Construction, Volume 5, Issue 1, March, Pages 51-59 (Abstr.).
- Crespo, V. C. 1971. Vías de comunicación. Limusa.
- Crespo, V. C. 1979. Mecánica de suelos y cimentaciones. Limusa.
- Cuador, G. J., Q.S. Arleys, E. C. Elmidio y R.H. Robert (s.f.). Simulación de Variables Regionalizadas. Ejemplos de aplicación, [Documento en línea]. Disponible:  
[http://www.ciriongeo.co.cc/web\\_documents/La%20Simulacion\\_Geoestadistica.pdf](http://www.ciriongeo.co.cc/web_documents/La%20Simulacion_Geoestadistica.pdf). [Consultado: 2009, Noviembre 18].
- Cuador, G. J. 1997. Elementos de Geoestadística. Universidad de Pinar del Río [Documento en línea]. Disponible:  
[http://www.ciriongeo.co.cc/web\\_documents/Elementos%20de%20Geoestadistica.pdf](http://www.ciriongeo.co.cc/web_documents/Elementos%20de%20Geoestadistica.pdf). [Consultado: 2009, Noviembre 17].

- Cuador, G. J. 2000. La Geoestadística su Surgimiento y Evolución. Publicación Ciencia Tecnología y Medio Ambiente-CITMA, Cuba.
- Deutsch, C.V., and A.G. Journel. 1998. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Second Edition, Oxford University Press, 369 p.
- Díaz, V. M. 2002. Geoestadística aplicada. [Documento en línea]. Disponible: <http://es.scribd.com/doc/24737935/Geoestadistica-Aplicada>. [Consultado: 2009, Septiembre 22].
- Gallardo, A. 2006. Geoestadística. Asociación Española de Ecología Terrestre. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=431>. [Consultado: 2009, Noviembre 12].
- Giraldo, H. R. (s.f.). Introducción a la Geoestadística Teoría y Aplicación. Universidad Nacional de Colombia. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.docentes.unal.edu.co/rgiraldoh/docs/LIBRO%20DE%20GEOESTADISTICA.pdf>. [Consultado; 2009, Noviembre 15].
- González, N. M. 2002. Geoestadística Aplicada A La Clasificación De Suelos Para Cultivos. Tesis de grado ICM (Instituto de Ciencias Matemáticas), Ecuador. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/5978>. [Consultado: 2010, Abril 25].
- Hines W., and D. Montgomery. 2001. Probabilidad y estadística para ingeniería, Editorial CECOSA, México.
- Journal, A.G., and Ch. J. Huijbregts. 1978. Mining Geostatistics. From Academic Press. [Documento en línea]. Disponible: [http://www.geostatcam.com/Adobe/1978\\_journal\\_and\\_Huijbregts.pdf](http://www.geostatcam.com/Adobe/1978_journal_and_Huijbregts.pdf). [Consultado: 2009, Diciembre 10].

- Lantuejoul, Ch. 1995. Conditional Simulation, Centre de Geostatistiqué. Ecole des Mines de París, 141 p.
- López, V. D. 2007. Control Geoestadístico de Calidad de la Compactación de Obras Téreas. Tesis de Maestría (Mecánica de Suelos), FIUAQ.
- Llamazares, G. O. 1973. Sobre el control de calidad en la construcción de carreteras. [Documento en línea]. Disponible: [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1973/1973\\_tomol\\_3093\\_01.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1973/1973_tomol_3093_01.pdf). [Consultado: 2010, Enero 11].
- Matheron, G. F. 1987. The evolution of Geoestistics. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the application of computers and mathematics in the mineral industries.
- Matheron, G. F. 1970. La théorie des variables régionalisées, et ses applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, núm. 5, 112 p
- Moral, F. J. 2004. Aplicación de la Geoestadística en las ciencias ambientales. Ecosistemas (1), 11 pp.
- Morales, I. G. 2005. Caracterización geoestadística del subsuelo en un predio ubicado en Corregidora, Qro. Tesis de Maestría (Mecánica de Suelos), FIUAQ.
- Morales, M. A. 2004. Aplicación de la Geoestadística a la descripción estratigráfica del subsuelo de la zona sur de la cuenca de México. Tesis de Maestría en Ciencias (Mecánica de Suelos), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, México.
- Myers, D. E. 1991. Pseudo-cross variograms, Positive-definiteness and Cokriging. Mathematical Geology.

- Olivera, B. F. 1986. Estructuración de vías terrestres, CECSA.
- Origlio, V. (s.f.). Stochastic. From MathWorld A Wolfram Web Resource. created by Eric W.Weisstein. [Documento en línea]. Disponible: <http://mathworld.wolfram.com/Stochastic.html>. [Consultado: 2010, Enero 12].
- Papoulis, A. 1984. Probability random variables and stochastic processes. International Student Edition, USA.
- Parzen, E. 1962. Stochastic Processes, Oakland CA: Holden Day, p. 7
- Rico. R. A., y M. H. Del Castillo. 1979. La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres 2: Carreteras, ferrocarriles y autopistas, LIMUSA.
- Rendí, J. M. 1981. An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation. Golder Associaties. Inc. Consulting Geotechnical and Mining Engineers, South African Insititute of Mining and Metallurgy, Johannesburg.
- Rondón, O. (s.f.). Curso de Krigeado por Oscar Rondón. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.geo.upm.es/postgrado/CarlosLopez/geoestadistica/index.htm>. [Consulta: 2005, Diciembre 26].
- Salinas, H. L. 2009. Análisis de Eficiencia en el Diseño de Cimentaciones Aplicando Métodos Geoestadísticos. Tesis de Maestría (Construcción), FIUAQ.
- Sharov, A. 1996. .Quantitative Population Ecology. Virginia Tech, USA.
- Sherman, G. B., R. O. Watkins, and R. H. Prysock. 1967. A Statistical Analysis of Embankment Compaction. State of California, Business and

- Transportation Agency, Department of Public Works, Division of Highways, Materials and Research Department.
- Silva, G. A. 2009. Hidrología Estocástica. [Documento en línea]. Disponible: <http://gsilvam.com/estocastica.htm>. [Consultado: 2010, Enero 10].
- Ulloa, M., E. Vidal, O. Ingaramo, L. Morales, y A. Paz. 2003. Aplicación de la Geoestadística al estudio de las propiedades del subsuelo. Comunicaciones científicas y tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste.
- Weisstein, E. W. (s.f.). Deterministic. From MathWorld A Wolfram Web Resource. [Documento en línea]. Disponible: <http://mathworld.wolfram.com/Stochastic.html>. [Consultado: 2010, Enero 12]
- Zárate, A. M. (2007). Diseño de Pavimentos Flexibles. AAMAC.
- Zhang, X. F., Van Eijkeren, J. C. and Heemink, A. W. 1995. On the Weighted Least Squares Method for Fitting a Semivariogram Model. Short Note, Computers & Geosciences, Vol. 21, No.4, pp. 605,608.
- National Defense 1998. Military Soils Engineering. Soil Properties. Affected by Compaction. CHAPTER 8 Soil Compaction Section I, pp 196-225. [Documento en línea] Disponible: [http://www.itc.nl/~rossiter/docs/fm5-410/fm5-410\\_ch8.pdf](http://www.itc.nl/~rossiter/docs/fm5-410/fm5-410_ch8.pdf). [Consultado: 2010, Diciembre 12]
- Normativa SCT. (s.f.). Normativa para la infraestructura del transporte. [Documento en línea]. Disponible: <http://normas.imt.mx/default.htm>. [consultado: 2010, Enero 04].

---

Wikipedia. (s.f.). Artículo Krigeaje publicado por Wikipedia. [Documento en línea]. Disponible: [http://es.wikipedia.org/wiki/Krigeaje#Kriging\\_simples](http://es.wikipedia.org/wiki/Krigeaje#Kriging_simples). [consultado: 2010, Enero 11].

## ANEXOS

Datos obtenidos de la selección del número, ubicación y resultados de los puntos de muestreo, para el desarrollo y análisis superficies representadas por la Normativa y por la distribución propuesta. Las unidades correspondientes a X y Y son metros, para Z es el % de compactación.

**Tabla 8. Parámetros estadísticos del atributo, en Normativa SCT y Propuesta.**

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL ATRIBUTO PARA LOS DIEZ ANÁLISIS EN AMBOS CASOS	
N° de Datos	12
Valor mínimo	100
Valor máximo	105.5
Rango	5.5
Media	102.750
Mediana	102.750
Moda	-----
Desviación estándar	1.80278
Varianza	3.25
Coefficiente de variación	0.01755

### 8.1.1 Normativa.

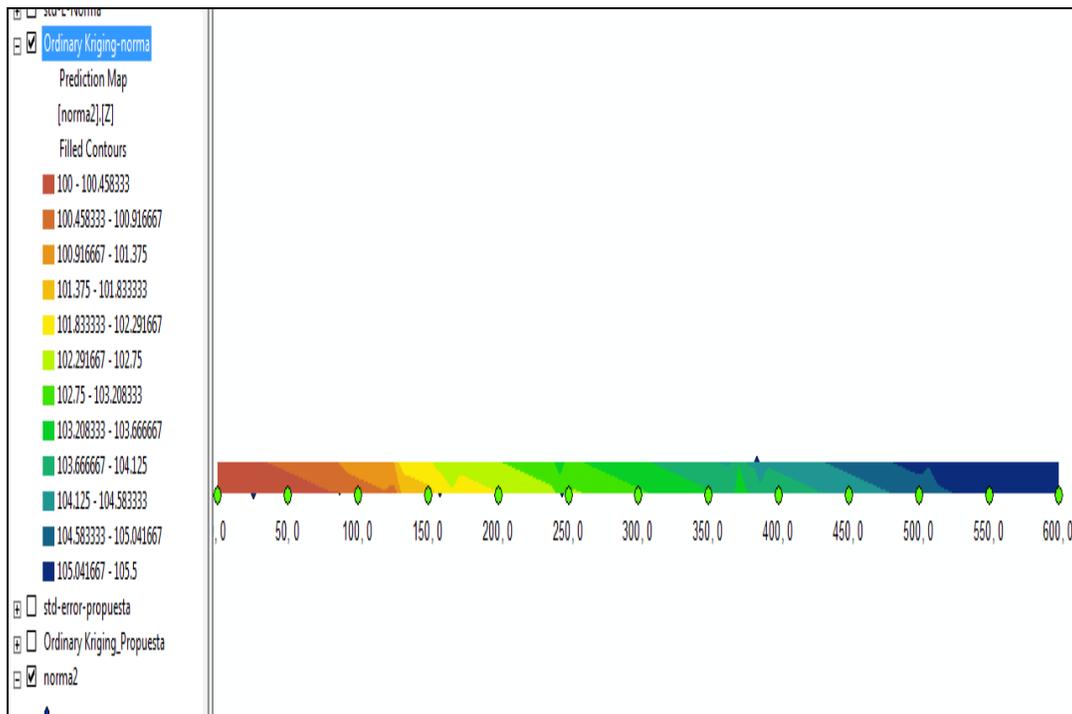
Segundo caso.

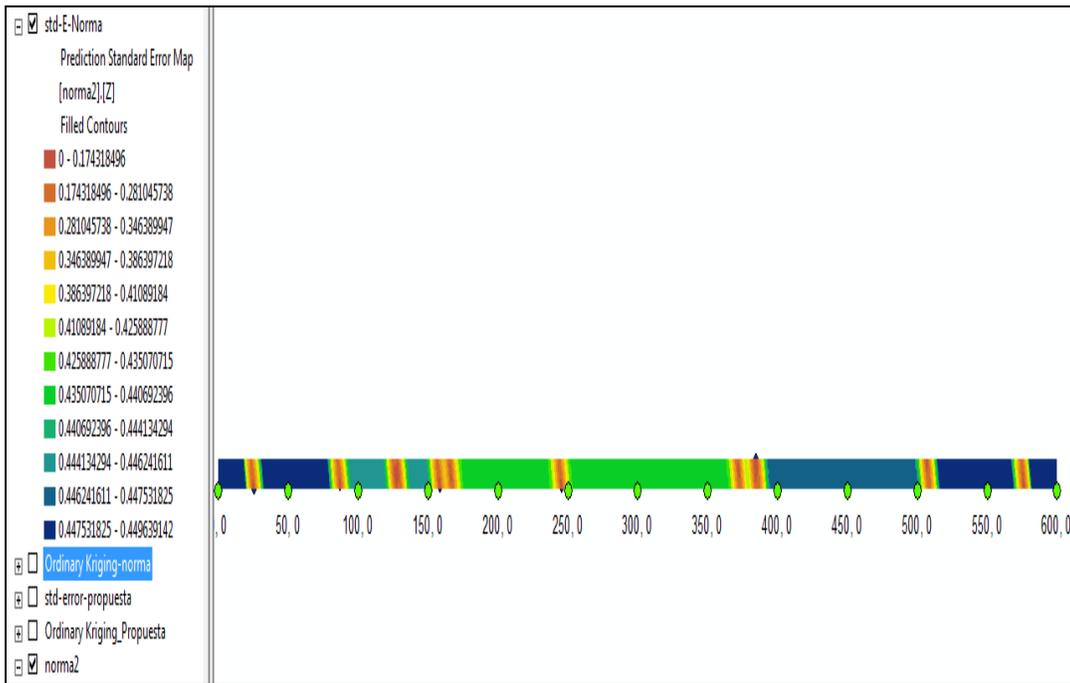
**Tabla 8.1. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.**

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				N° de pruebas:		Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:		Ancho del tramo	
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L = 600.00		A = 11	
N°	A	B	Distancia longitudinal (m), dL	Distancia transversal (m), dA	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km)	Distancia transversal al eje (m), dA'	Lado
	(a)	(b)	(a x L)	(b x A)	( Km1 + dL )	(dA-A/2)	
0							
1	0.96	0.204	576	2.244	0+576.00	-3.256	
2	0.211	0.386	126.6	4.246	0+126.60	-1.254	
3	0.264	0.074	158.4	0.814	0+158.40	-4.686	
4	0.214	0.572	128.4	6.292	0+128.40	0.792	
5	0.042	0.032	25.2	0.352	0+025.20	-5.148	
6	0.145	0.163	87	1.793	0+087.00	-3.707	
7	0.277	0.536	166.2	5.896	0+166.20	0.396	
8	0.64	0.508	384	5.588	0+384.00	0.088	
9	0.62	0.583	372	6.413	0+372.00	0.913	
10	0.641	0.929	384.6	10.219	0+384.60	4.719	
11	0.409	0.075	245.4	0.825	0+245.40	-4.675	
12	0.845	0.726	507	7.986	0+507.00	2.486	

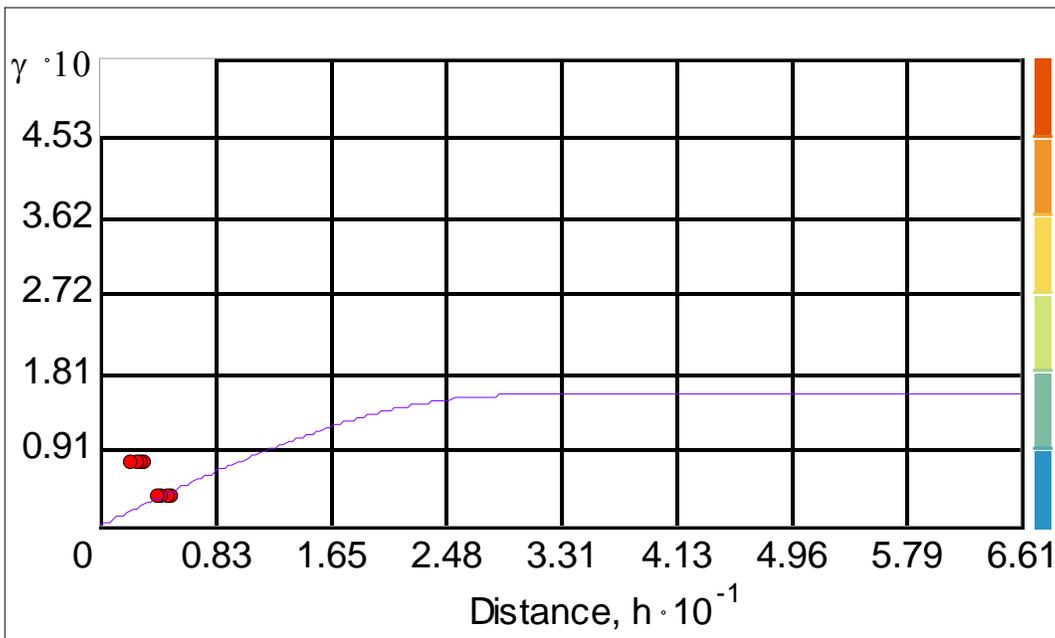
**Tabla 8.2. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
25.20	0.352	100.0
87.00	1.793	100.5
126.60	4.246	101.0
128.40	6.292	101.5
158.40	0.814	102.0
166.20	5.896	102.5
245.40	0.825	103.0
372.00	6.413	103.5
384.00	5.588	104.0
384.60	10.219	104.5
507.00	7.986	105.0
576.00	2.244	105.5

**Figura 8.1. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**



**Figura 8.2.** Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.



**Figura 1.** Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

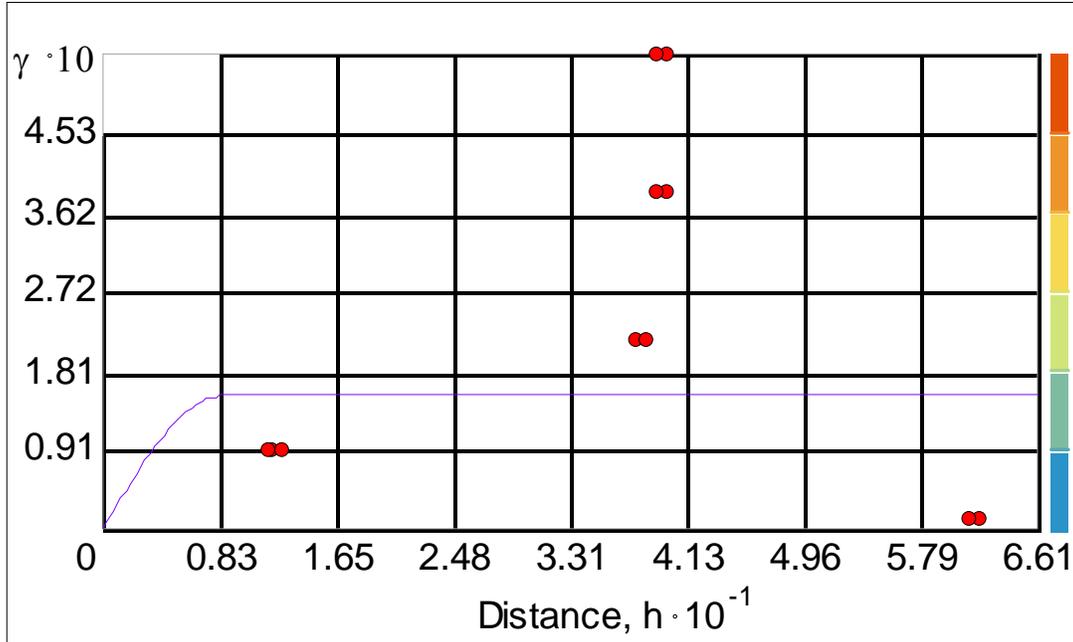


Figura 8.4. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.5. Resultado de la media del error de predicción.

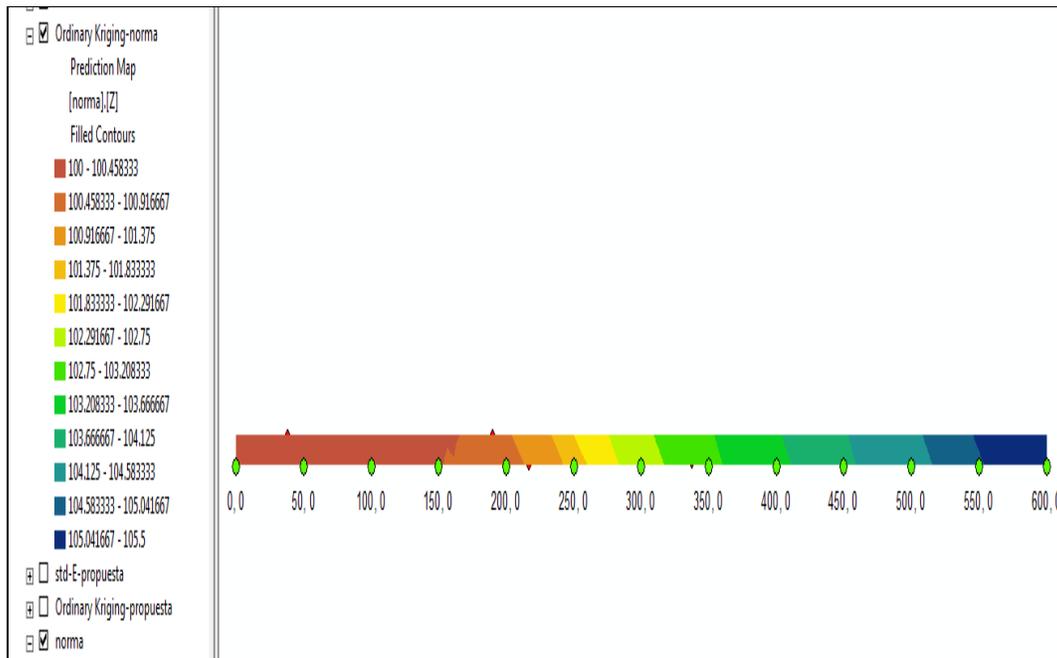
Tercer caso.

Tabla 8.3. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:		Ancho del tramo		Fecha:
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L = 600.00		A =		11
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), dL (a x L)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) (Km1 + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA - A/2)	Lado	
	(a)	(b)						
0								
1	0.316	0.914	189.6	10.054	0+189.60	4.554		
2	0.731	0.648	438.6	7.128	0+438.60	1.628		
3	0.494	0.294	296.4	3.234	0+296.40	-2.266		
4	0.841	0.47	504.6	5.17	0+504.60	-0.33		
5	0.973	0.252	583.8	2.772	0+583.80	-2.728		
6	0.361	0.043	216.6	0.473	0+216.60	-5.027		
7	0.436	0.316	261.6	3.476	0+261.60	-2.024		
8	0.652	0.329	391.2	3.619	0+391.20	-1.881		
9	0.911	0.504	546.6	5.544	0+546.60	0.044		
10	0.064	0.893	38.4	9.823	0+038.40	4.323		
11	0.417	0.088	250.2	0.968	0+250.20	-4.532		
12	0.562	0.095	337.2	1.045	0+337.20	-4.455		

**Tabla 8.4. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
38.40	9.823	100.0
189.60	10.054	100.5
216.60	0.473	101.0
250.20	0.968	101.5
261.60	3.476	102.0
296.40	3.234	102.5
337.20	1.045	103.0
391.20	3.619	103.5
438.60	7.128	104.0
504.60	5.170	104.5
546.60	5.544	105.0
583.80	2.772	105.5



**Figura 8.6. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geostatística.**

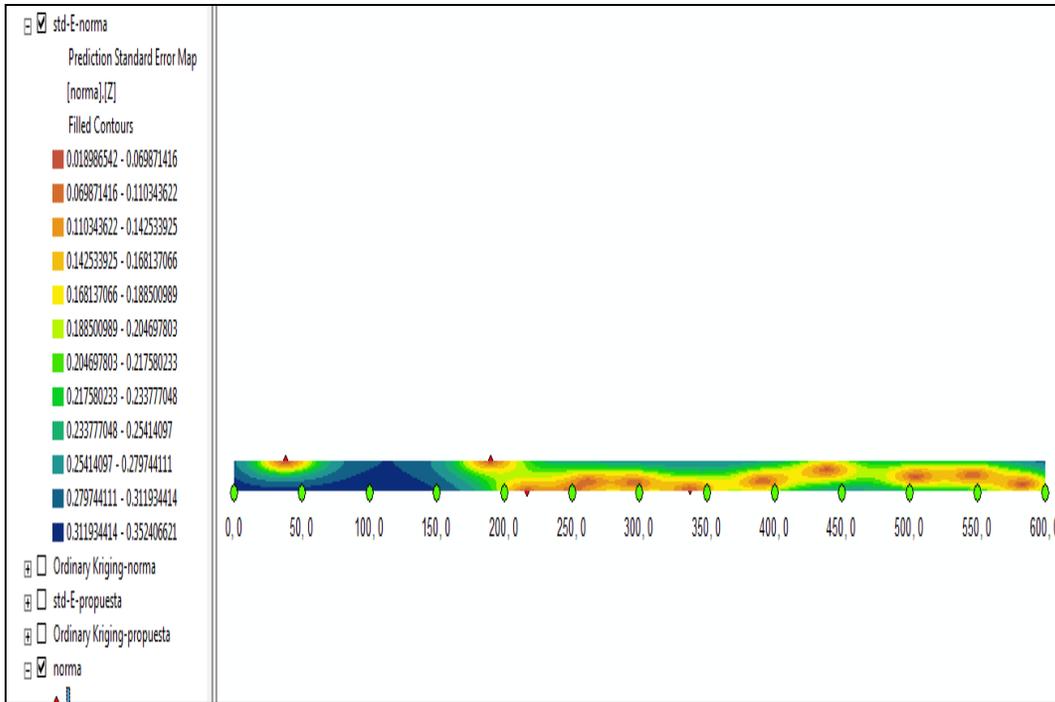


Figura 8.7. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

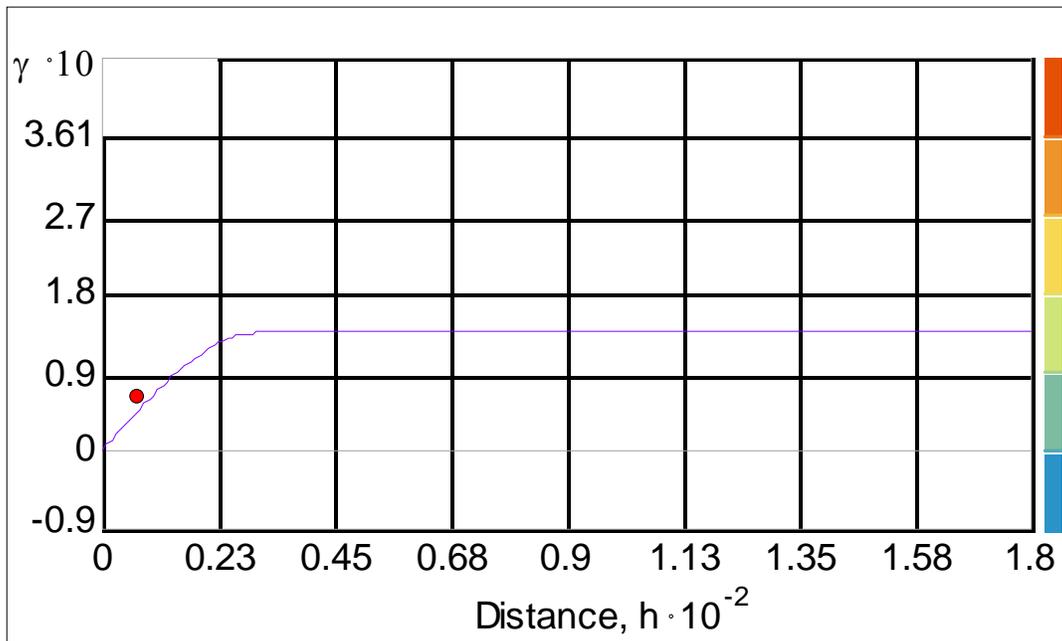


Figura 8.8. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

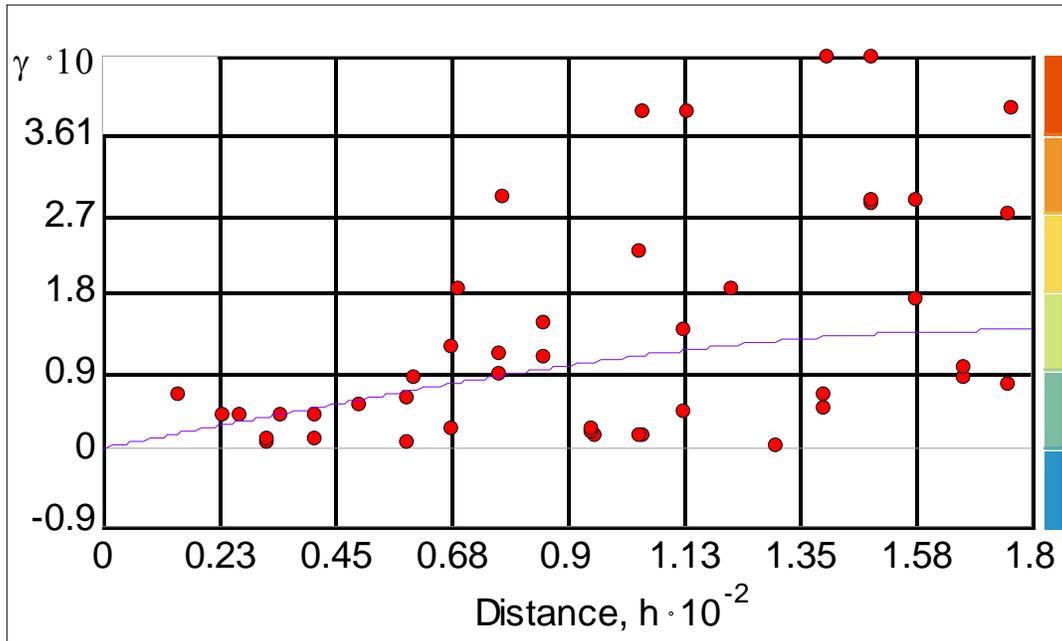


Figura 8.9. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.

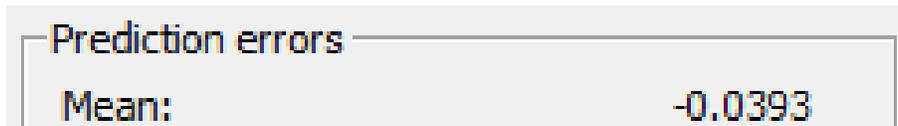


Figura 8.10. Resultado de la media del error de predicción.

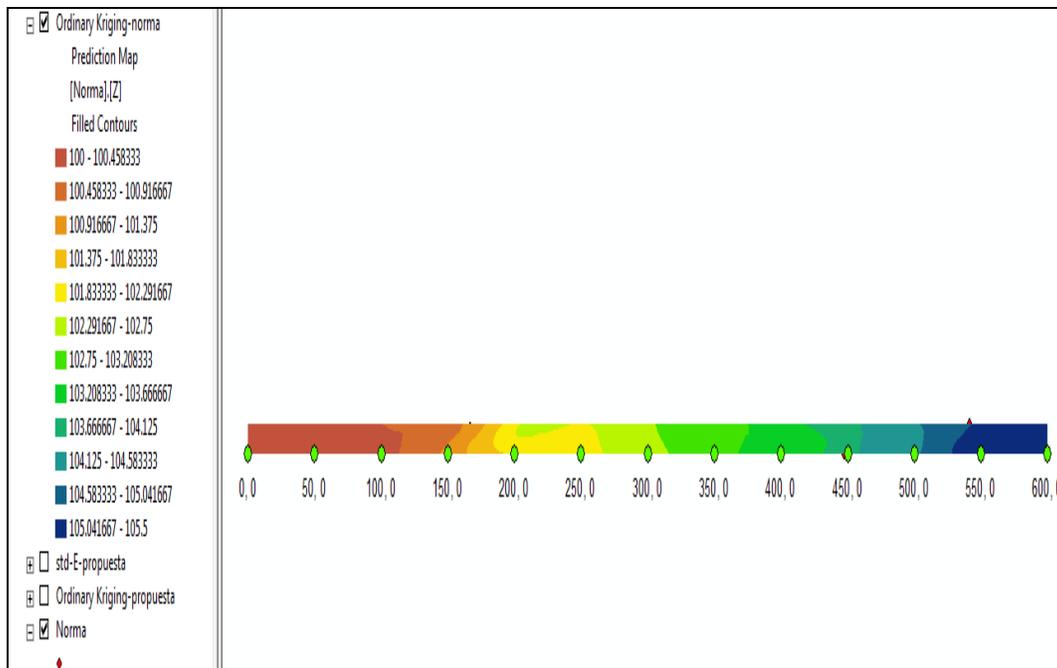
Cuarto caso.

Tabla 8.5. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				Nº de pruebas:		Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:		Ancho del tramo	
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L = 600.00		A = 11	
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), dL (a x L)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) (Km1 + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
	(a)	(b)					
0							
1	0.204	0.571	122.4	6.281	0+122.40	0.781	
2	0.337	0.182	202.2	2.002	0+202.20	-3.498	
3	0.834	0.346	500.4	3.806	0+500.40	-1.694	
4	0.914	0.367	548.4	4.037	0+548.40	-1.463	
5	0.278	0.789	166.8	8.679	0+166.80	3.179	
6	0.346	0.715	207.6	7.865	0+207.60	2.365	
7	0.745	0.012	447	0.132	0+447.00	-5.368	
8	0.283	0.305	169.8	3.355	0+169.80	-2.145	
9	0.603	0.634	361.8	6.974	0+361.80	1.474	
10	0.096	0.256	57.6	2.816	0+057.60	-2.684	
11	0.71	0.171	426	1.881	0+426.00	-3.619	
12	0.902	0.873	541.2	9.603	0+541.20	4.103	

**Tabla 8.6. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
57.60	2.816	100.0
122.40	6.281	100.5
166.80	8.679	101.0
169.80	3.355	101.5
202.20	2.002	102.0
207.60	7.865	102.5
361.80	6.974	103.0
426.00	1.881	103.5
447.00	0.132	104.0
500.40	3.806	104.5
541.20	9.603	105.0
548.40	4.037	105.5



**Figura 8.11. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

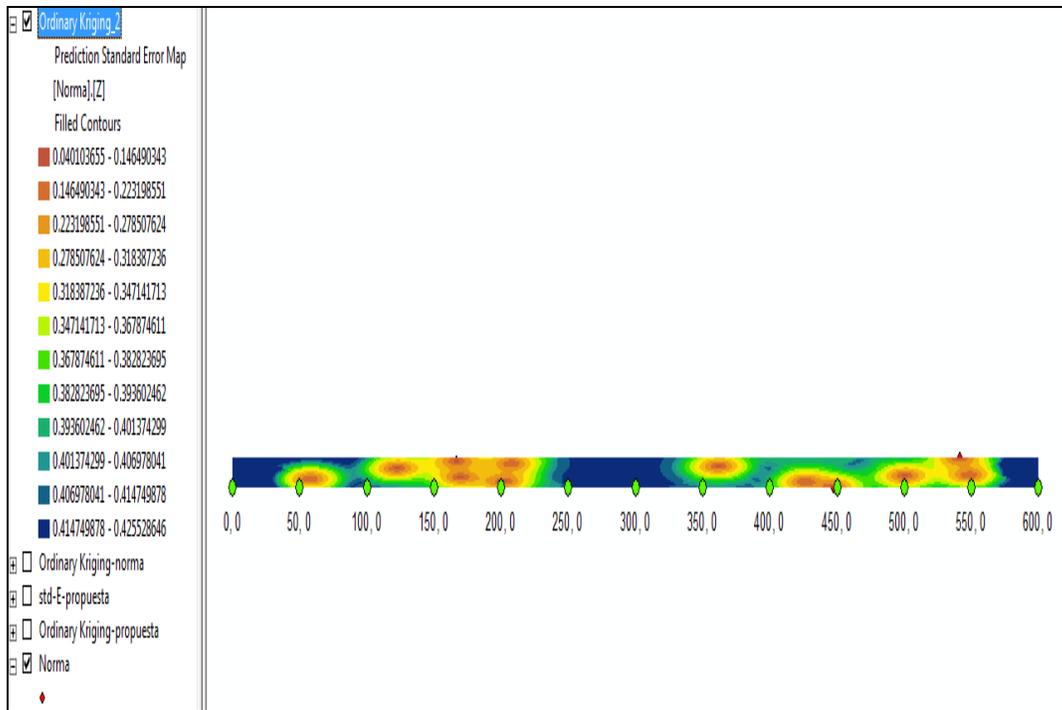


Figura 8.12. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

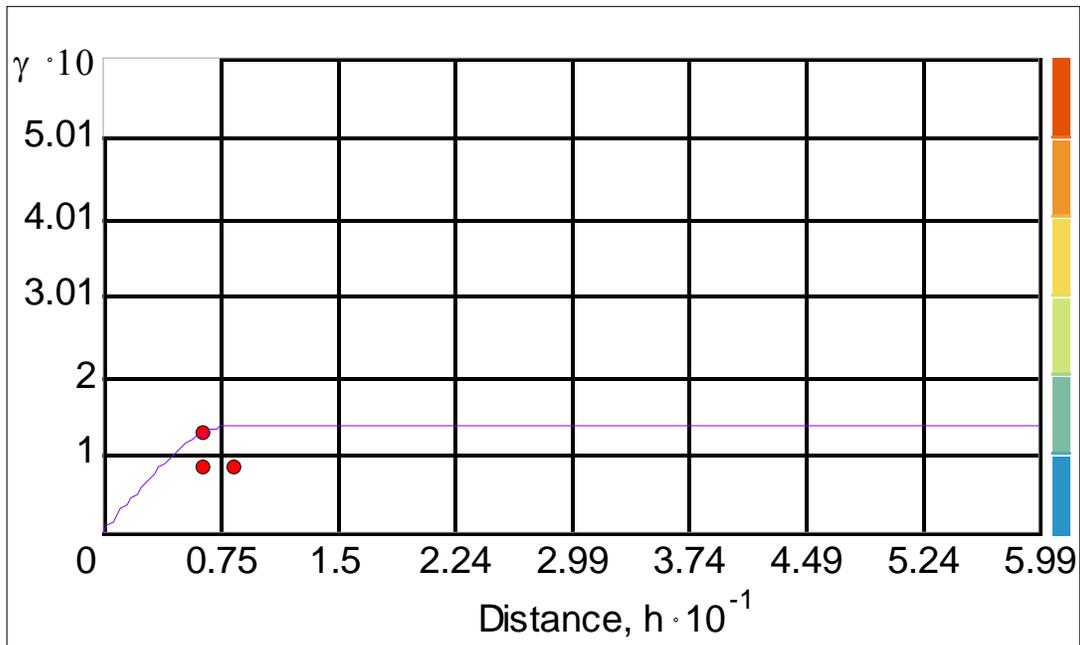


Figura 8.13. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

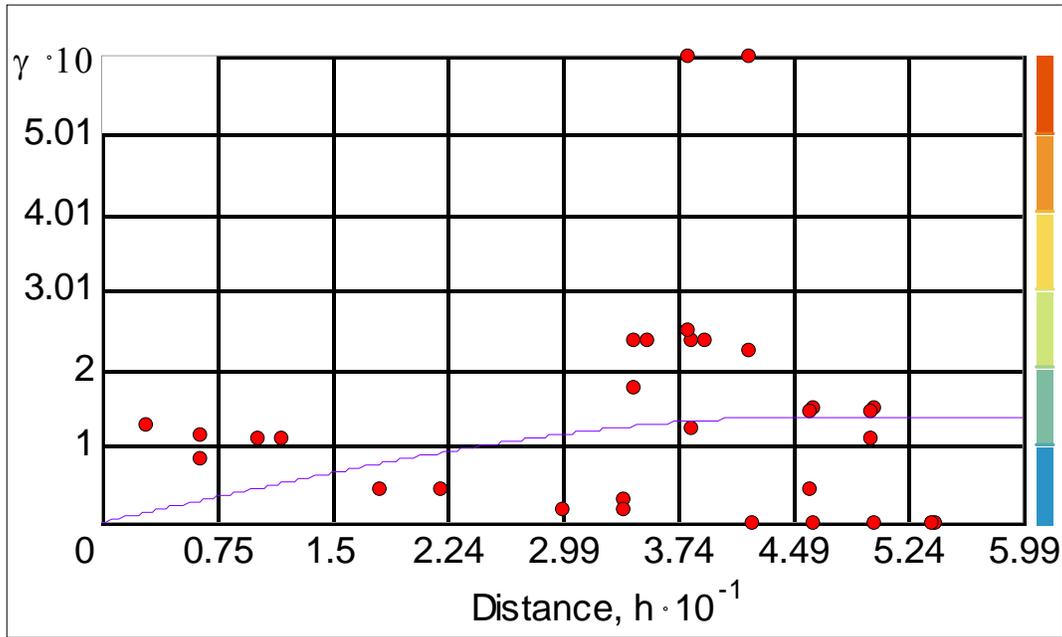


Figura 8.14. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.15. Resultado de la media del error de predicción.

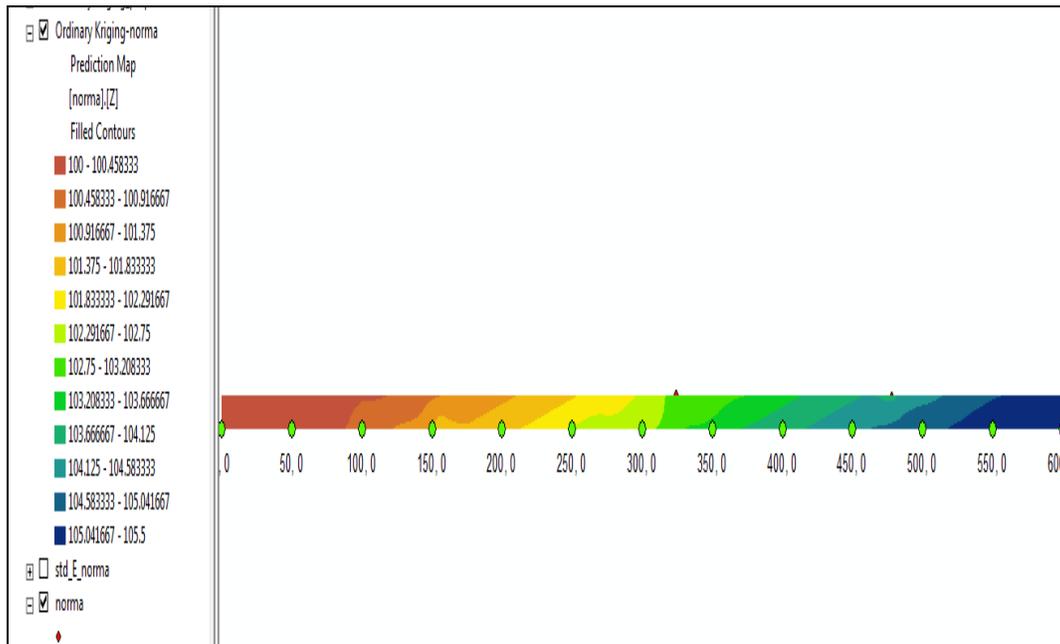
Quinto caso.

Tabla 8.7. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				5	Nº de pruebas:		12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 0+000	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 0+600	Longitud del tramo:		L = 600.00	Ancho del tramo	A =	11
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), dL (a x L)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) (Km1 + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado		
0									
1	0.51	0.357	306	3.927	0+306.00	-1.573			
2	0.797	0.89	478.2	9.79	0+478.20	4.29			
3	0.165	0.658	99	7.238	0+099.00	1.738			
4	0.88	0.327	528	3.597	0+528.00	-1.903			
5	0.54	0.893	324	9.823	0+324.00	4.323			
6	0.24	0.323	144	3.553	0+144.00	-1.947			
7	0.128	0.157	76.8	1.727	0+076.80	-3.773			
8	0.61	0.29	366	3.19	0+366.00	-2.31			
9	0.919	0.002	551.4	0.022	0+551.40	-5.478			
10	0.809	0.534	485.4	5.874	0+485.40	0.374			
11	0.259	0.182	155.4	2.002	0+155.40	-3.498			
12	0.467	0.78	280.2	8.58	0+280.20	3.08			

**Tabla 8.8. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
76.80	1.727	100.0
99.00	7.238	100.5
144.00	3.553	101.0
155.40	2.002	101.5
280.20	8.580	102.0
306.00	3.927	102.5
324.00	9.823	103.0
366.00	3.190	103.5
478.20	9.790	104.0
485.40	5.874	104.5
528.00	3.597	105.0
551.40	0.022	105.5



**Figura 8.16. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

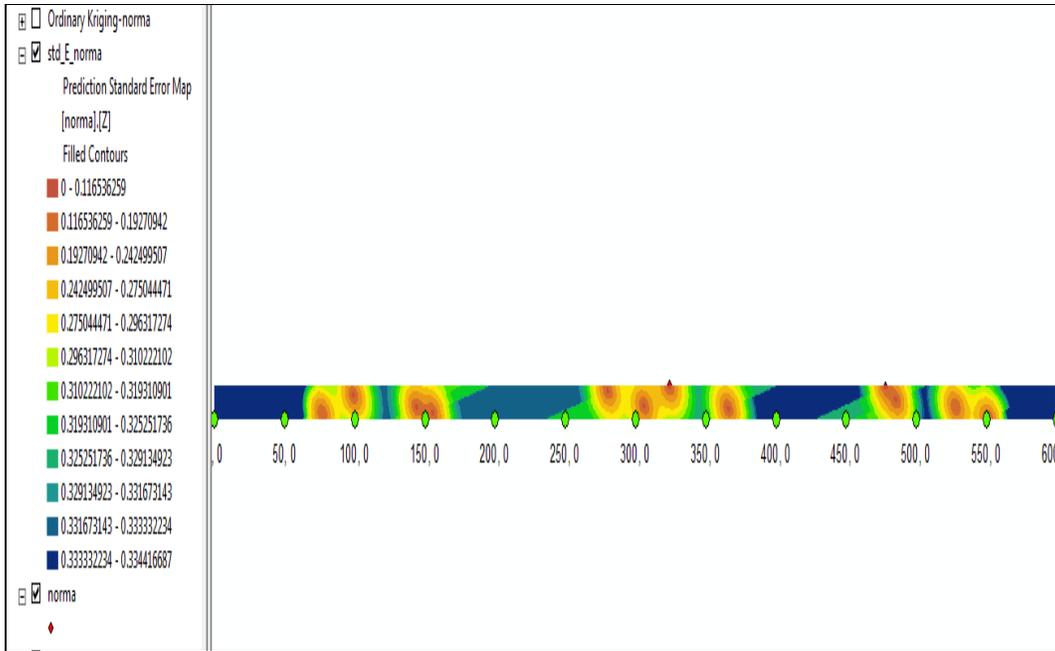


Figura 8.17. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

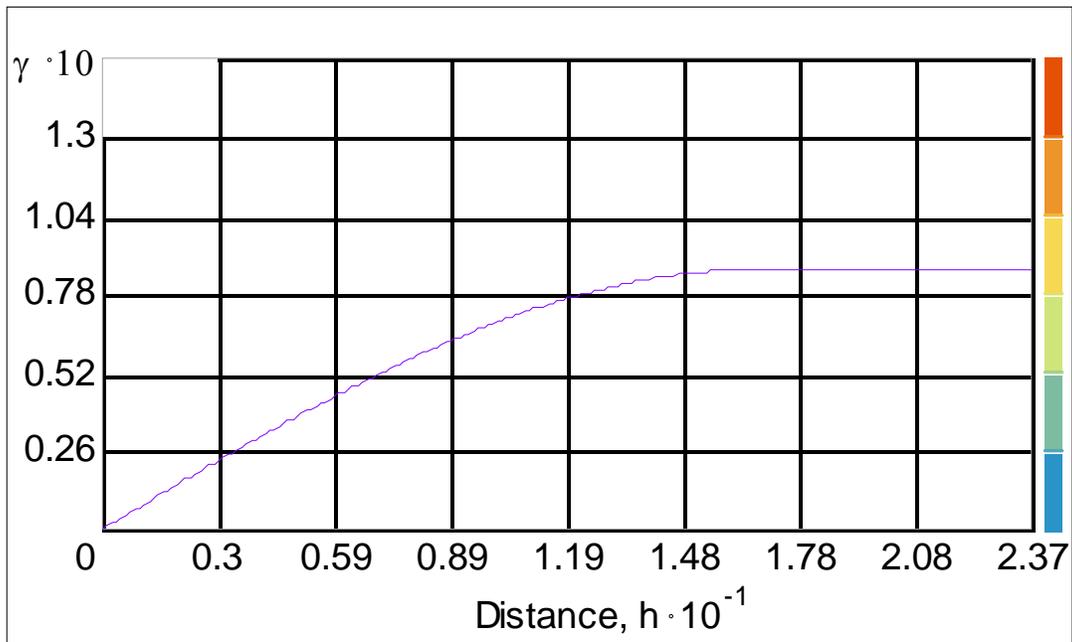


Figura 8.18. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

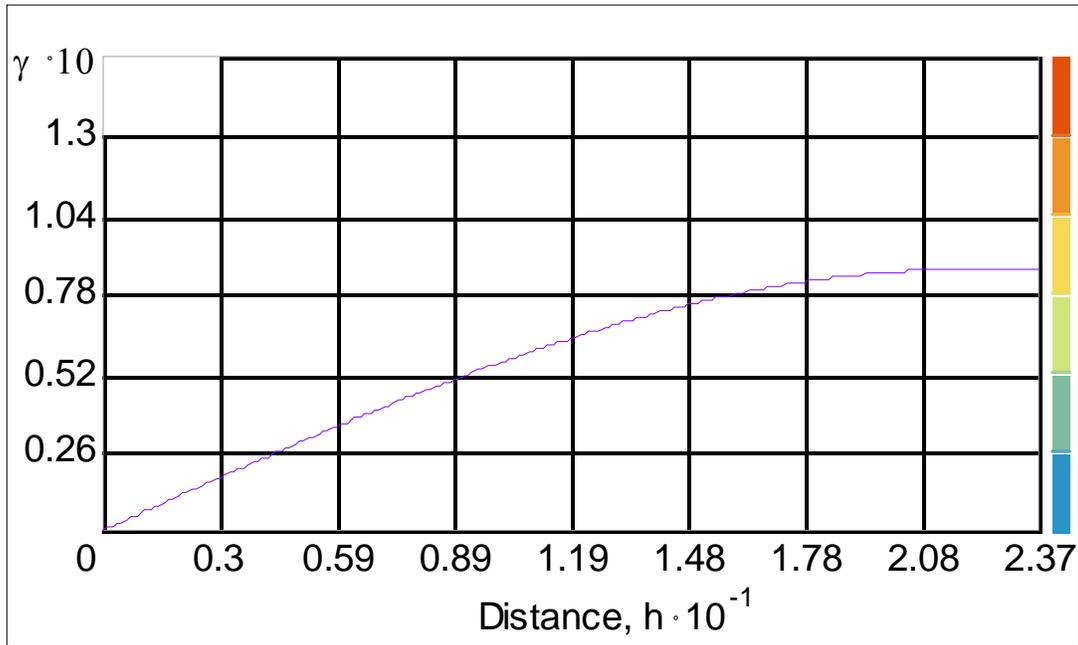


Figura 8.19. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.20. Resultado de la media del error de predicción.

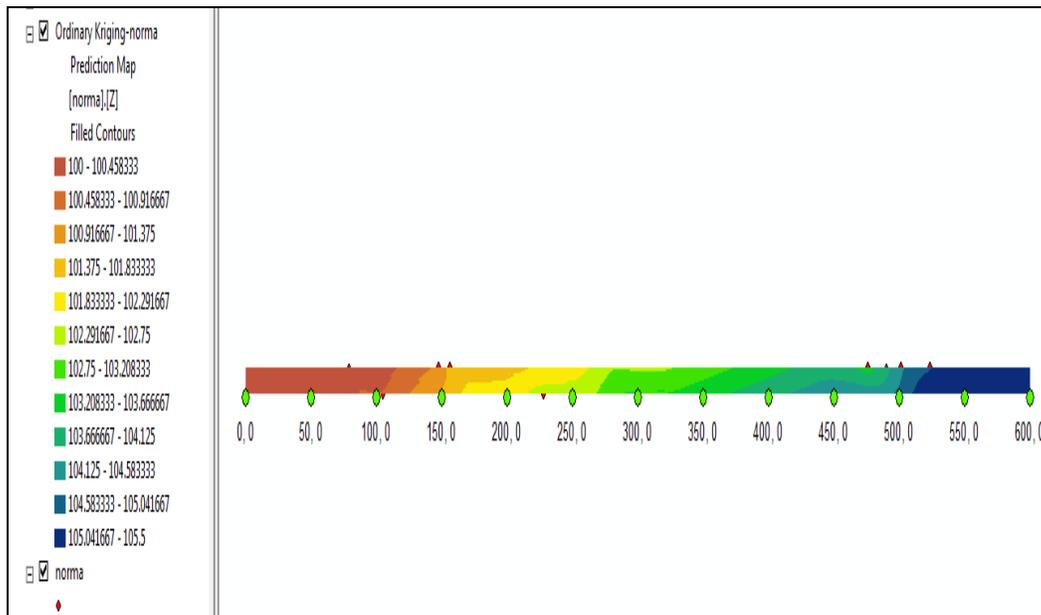
Sexto caso.

Tabla 8.9. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:		Ancho del tramo		Fecha:
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L = 600.00		A =		11
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), dL	Distancia transversal (m), dA	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km)	Distancia transversal al eje (m), dA'	Lado	
	(a)	(b)	(a x L)	(b x A)	( Km1 + dL )	(dA-A/2)		
0								
1	0.175	0.097	105	1.067	0+105.00	-4.433		
2	0.26	0.898	156	9.878	0+156.00	4.378		
3	0.816	0.872	489.6	9.592	0+489.60	4.092		
4	0.475	0.603	285	6.633	0+285.00	1.133		
5	0.362	0.655	217.2	7.205	0+217.20	1.705		
6	0.245	0.925	147	10.175	0+147.00	4.675		
7	0.835	0.925	501	10.175	0+501.00	4.675		
8	0.872	0.932	523.2	10.252	0+523.20	4.752		
9	0.379	0.118	227.4	1.298	0+227.40	-4.202		
10	0.131	0.876	78.6	9.636	0+078.60	4.136		
11	0.793	0.904	475.8	9.944	0+475.80	4.444		
12	0.914	0.582	548.4	6.402	0+548.40	0.902		

**Tabla 8.10. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
78.60	9.636	100.0
105.00	1.067	100.5
147.00	10.175	101.0
156.00	9.878	101.5
217.20	7.205	102.0
227.40	1.298	102.5
285.00	6.633	103.0
475.80	9.944	103.5
489.60	9.592	104.0
501.00	10.175	104.5
523.20	10.252	105.0
548.40	6.402	105.5



**Figura 8.21. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

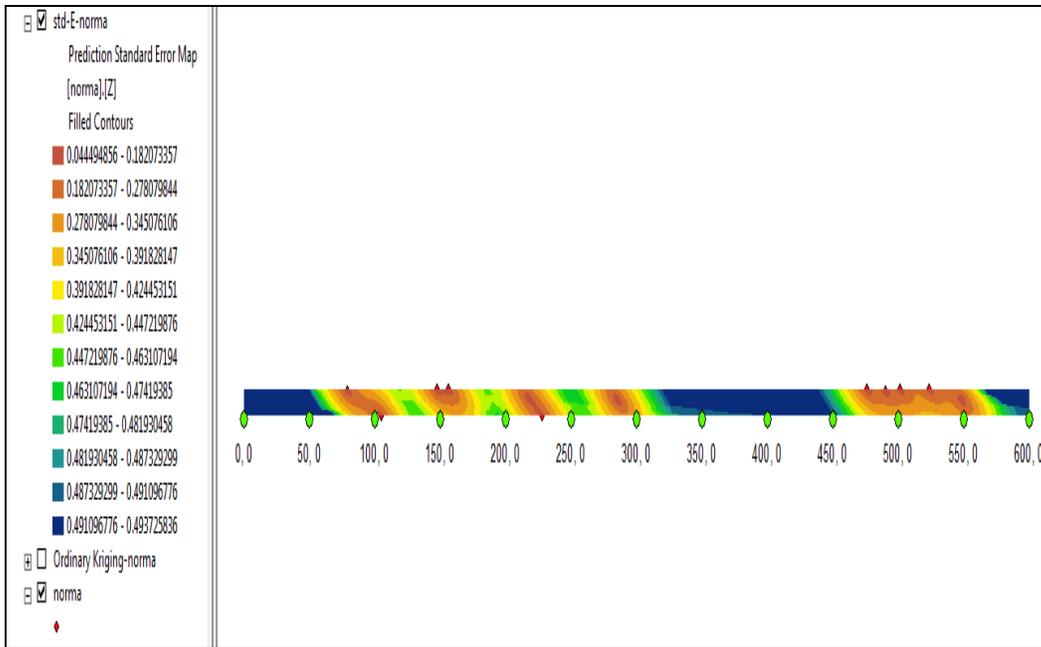


Figura 8.22. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

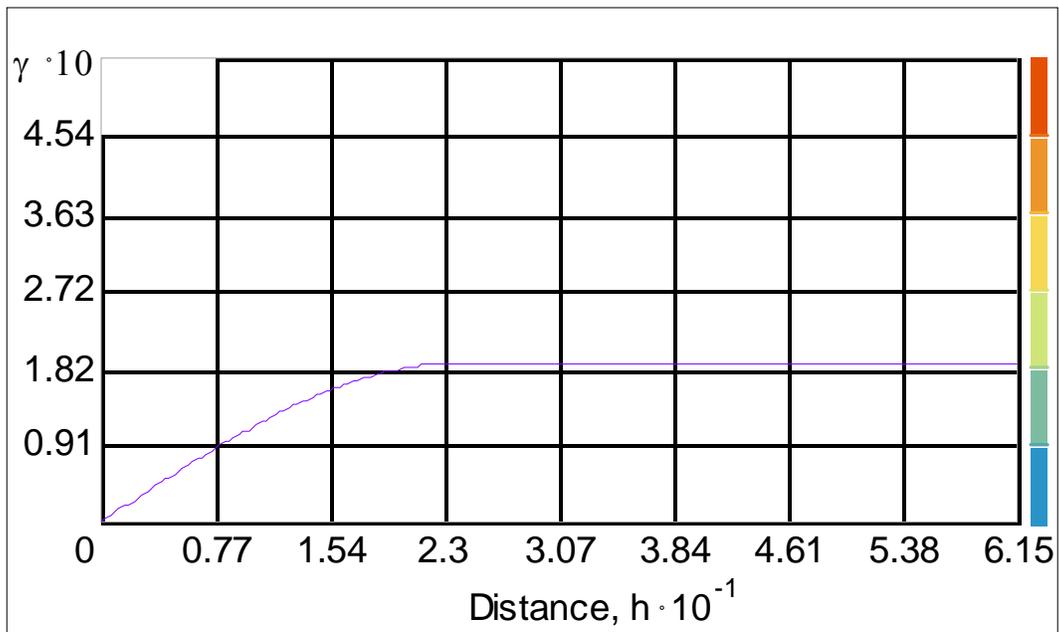


Figura 8.23. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

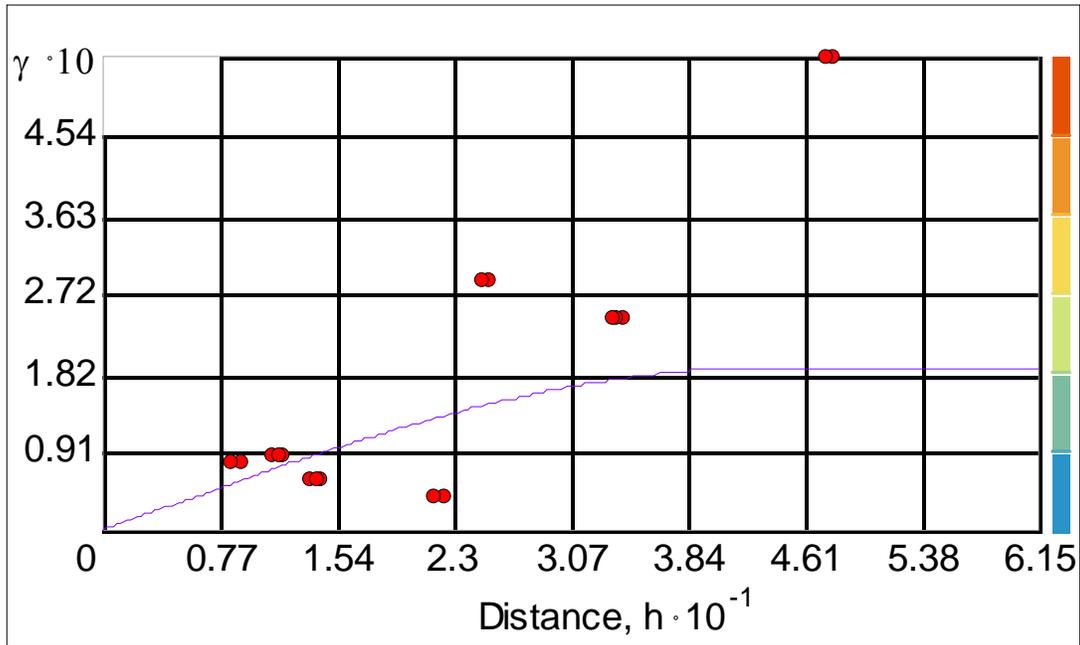


Figura 8.24. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.25. Resultado de la media del error de predicción.

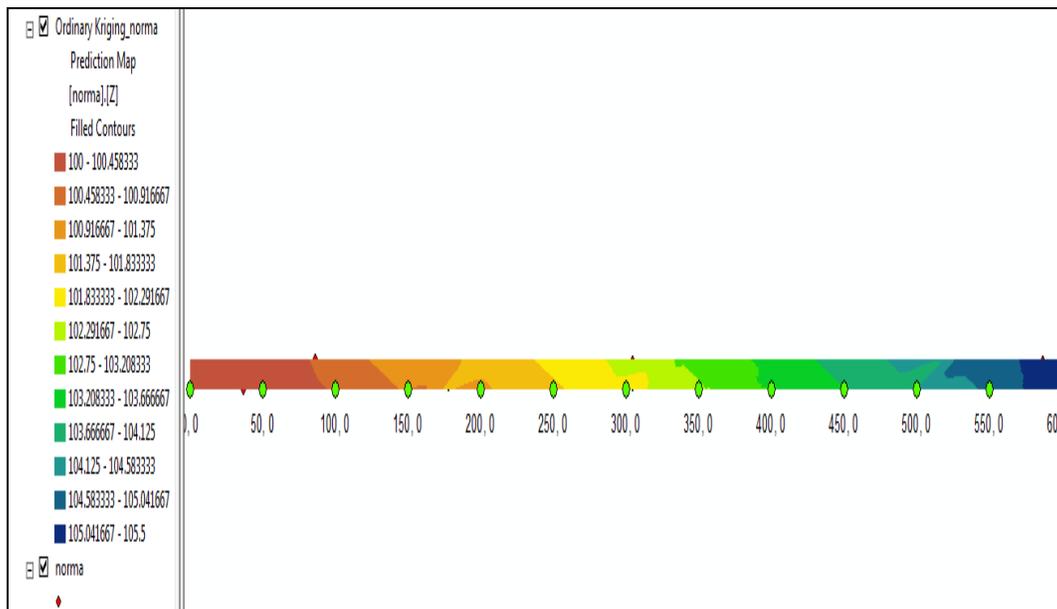
Séptimo caso.

Tabla 8.11. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				7		Nº de pruebas:	12		Fecha:
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 0+000	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 0+600	Longitud del tramo:	L = 600.00	Ancho del tramo	A =	11	
									Nº
	(a)	(b)				( Km1 + $dL$ )			
0									
1	0.954	0.376	572.4	4.136		0+572.40	-1.364		
2	0.296	0.104	177.6	1.144		0+177.60	-4.356		
3	0.143	0.812	85.8	8.932		0+085.80	3.432		
4	0.672	0.603	403.2	6.633		0+403.20	1.133		
5	0.855	0.344	513	3.784		0+513.00	-1.716		
6	0.507	0.104	304.2	1.144		0+304.20	-4.356		
7	0.854	0.627	512.4	6.897		0+512.40	1.397		
8	0.978	0.799	586.8	8.789		0+586.80	3.289		
9	0.507	0.768	304.2	8.448		0+304.20	2.948		
10	0.619	0.306	371.4	3.366		0+371.40	-2.134		
11	0.287	0.372	172.2	4.092		0+172.20	-1.408		
12	0.061	0.039	36.6	0.429		0+036.60	-5.071		

**Tabla 8.12. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
36.60	0.429	100.0
85.80	8.932	100.5
172.20	4.092	101.0
177.60	1.144	101.5
304.20	1.144	102.0
304.20	8.448	102.5
371.40	3.366	103.0
403.20	6.633	103.5
512.40	6.897	104.0
513.00	3.784	104.5
572.40	4.136	105.0
586.80	8.789	105.5



**Figura 8.26. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

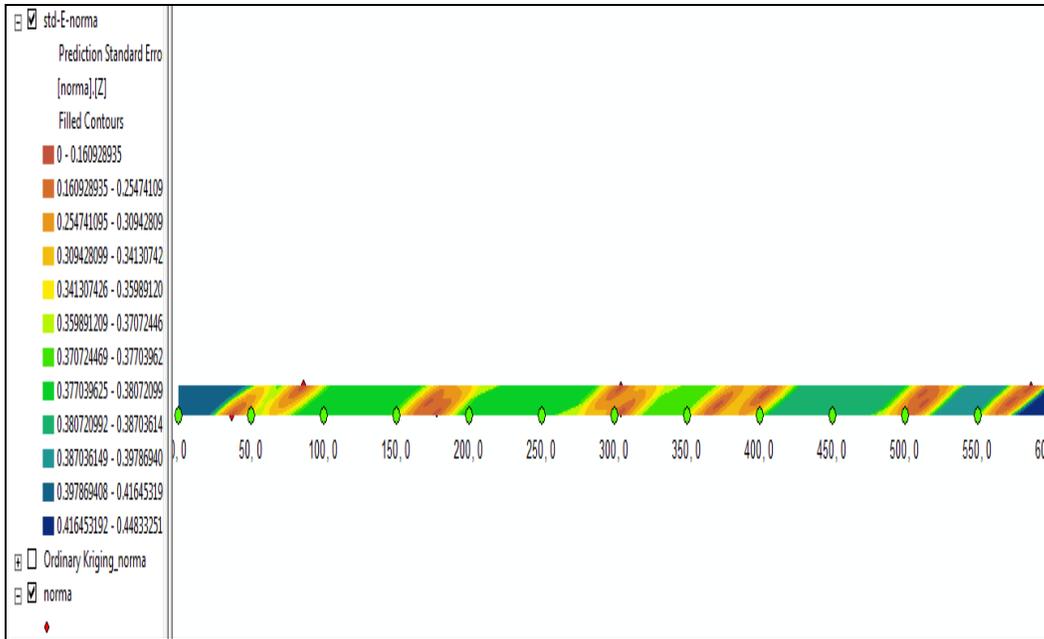


Figura 8.27. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

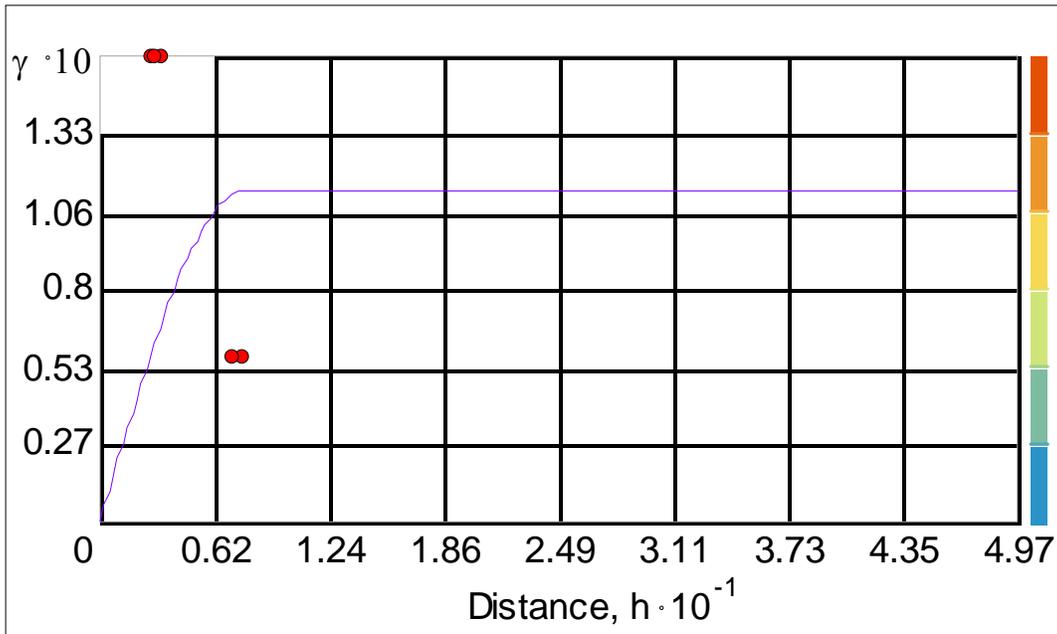


Figura 8.28. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

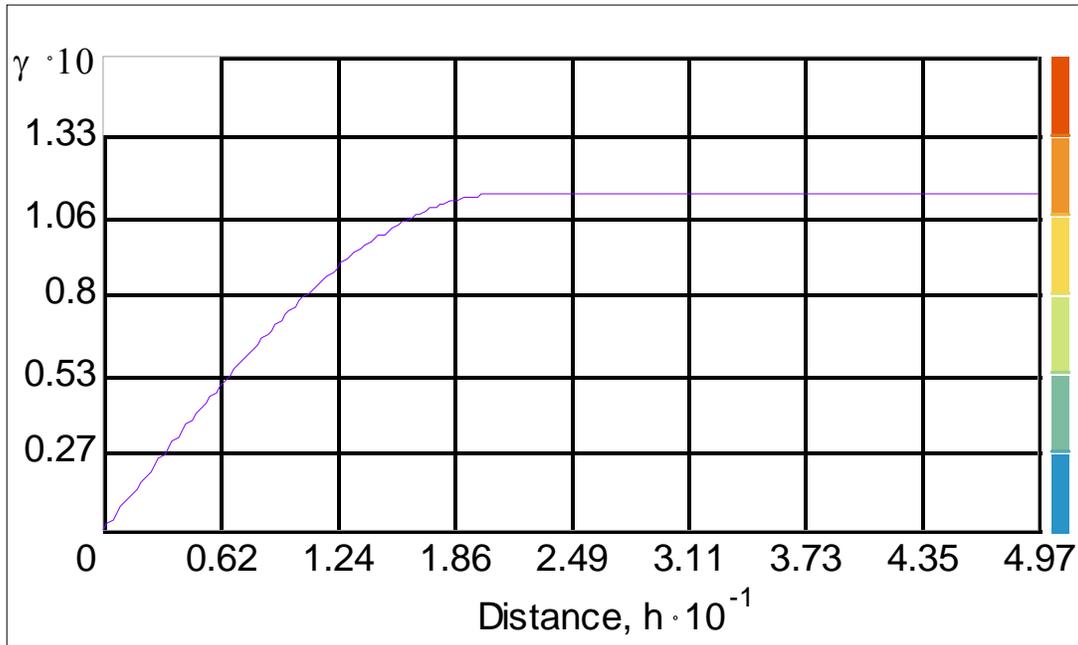


Figura 8.29. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.30. Resultado de la media del error de predicción.

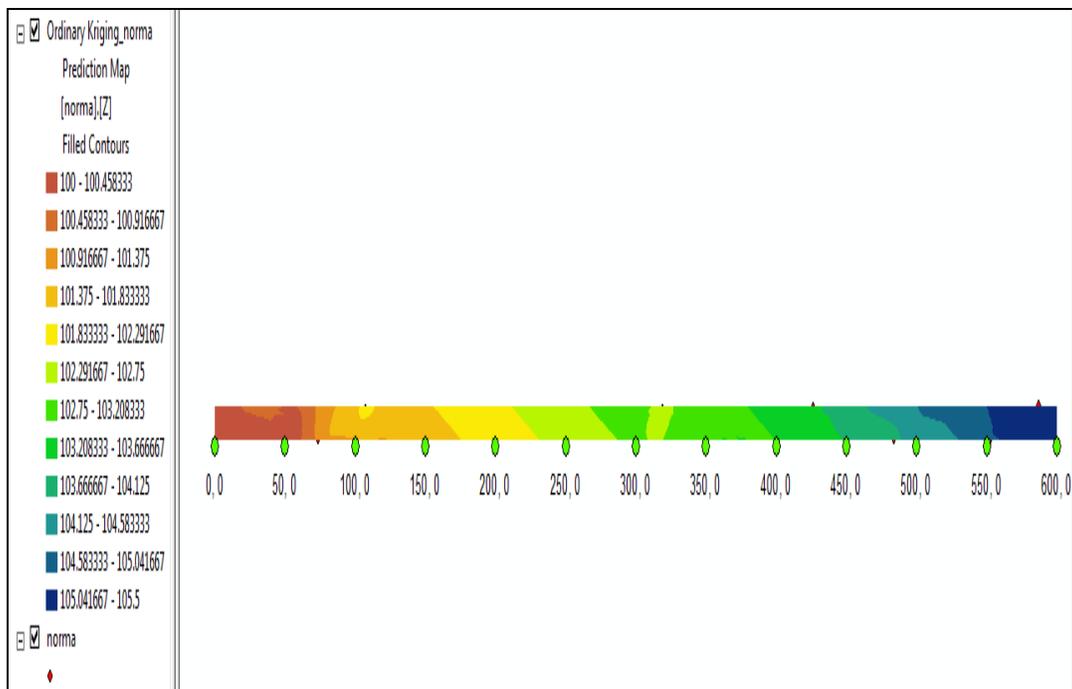
Octavo caso.

Tabla 8.13. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:	Ancho del tramo	Fecha:	
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L = 600.00	A =	11	
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), dL (a x L)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) (Km1 + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
	(a)	(b)					
0							
1	0.09	0.465	54	5.115	0+054.00	-0.385	
2	0.978	0.99	586.8	10.89	0+586.80	5.39	
3	0.576	0.396	345.6	4.356	0+345.60	-1.144	
4	0.92	0.142	552	1.562	0+552.00	-3.938	
5	0.711	0.934	426.6	10.274	0+426.60	4.774	
6	0.123	0.187	73.8	2.057	0+073.80	-3.443	
7	0.141	0.4	84.6	4.4	0+084.60	-1.1	
8	0.806	0.199	483.6	2.189	0+483.60	-3.311	
9	0.179	0.901	107.4	9.911	0+107.40	4.411	
10	0.532	0.885	319.2	9.735	0+319.20	4.235	
11	0.105	0.599	63	6.589	0+063.00	1.089	
12	0.83	0.837	498	9.207	0+498.00	3.707	

**Tabla 8.14. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
54.00	5.115	100.0
63.00	6.589	100.5
73.80	2.057	101.0
84.60	4.400	101.5
107.40	9.911	102.0
319.20	9.735	102.5
345.60	4.356	103.0
426.60	10.274	103.5
483.60	2.189	104.0
498.00	9.207	104.5
552.00	1.562	105.0
586.80	10.890	105.5



**Figura 8.31. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

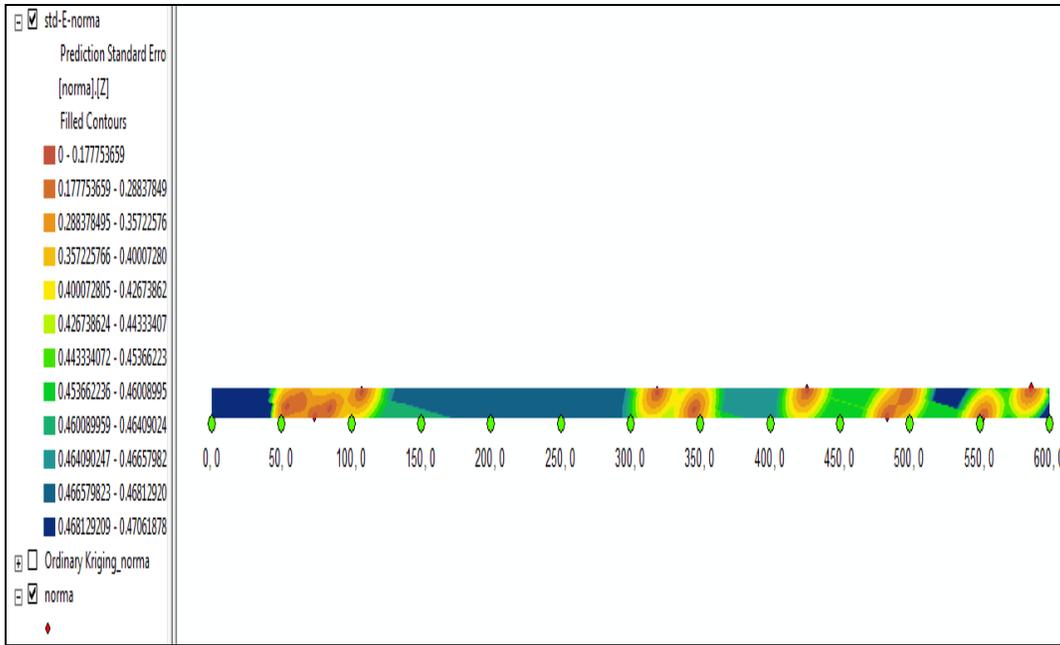


Figura 8.32. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

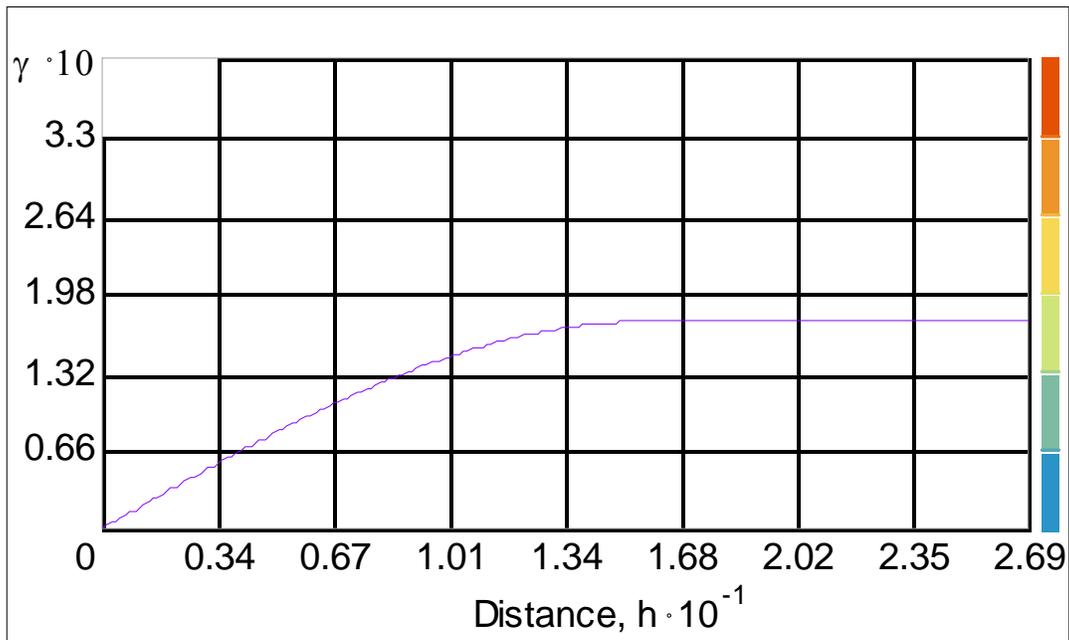


Figura 8.33. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

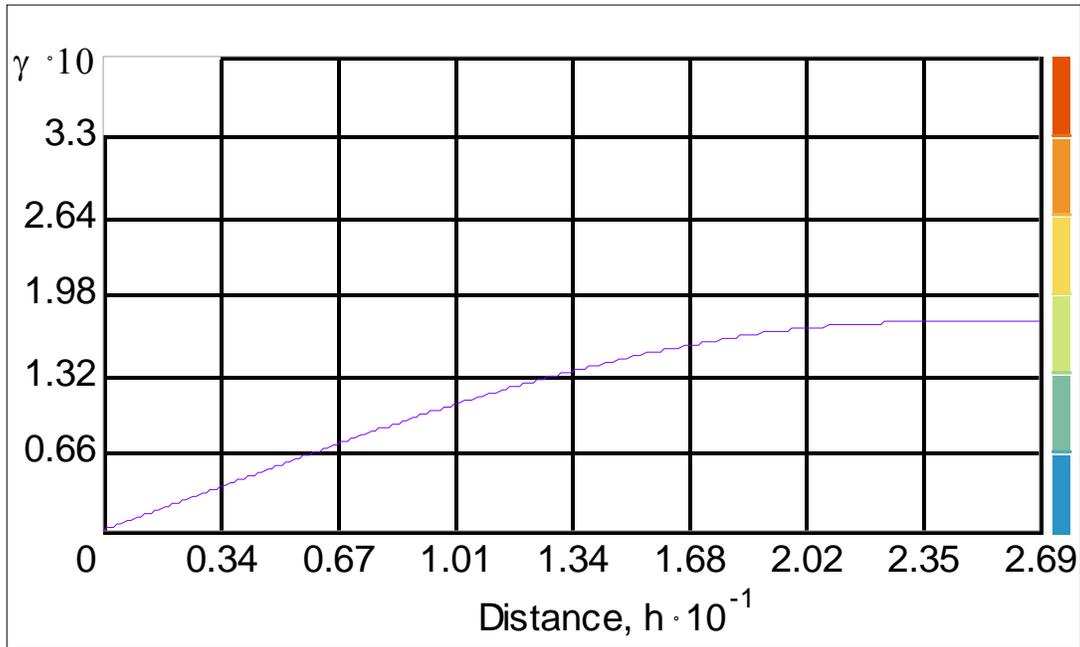


Figura 8.34. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.35. Resultado de la media del error de predicción.

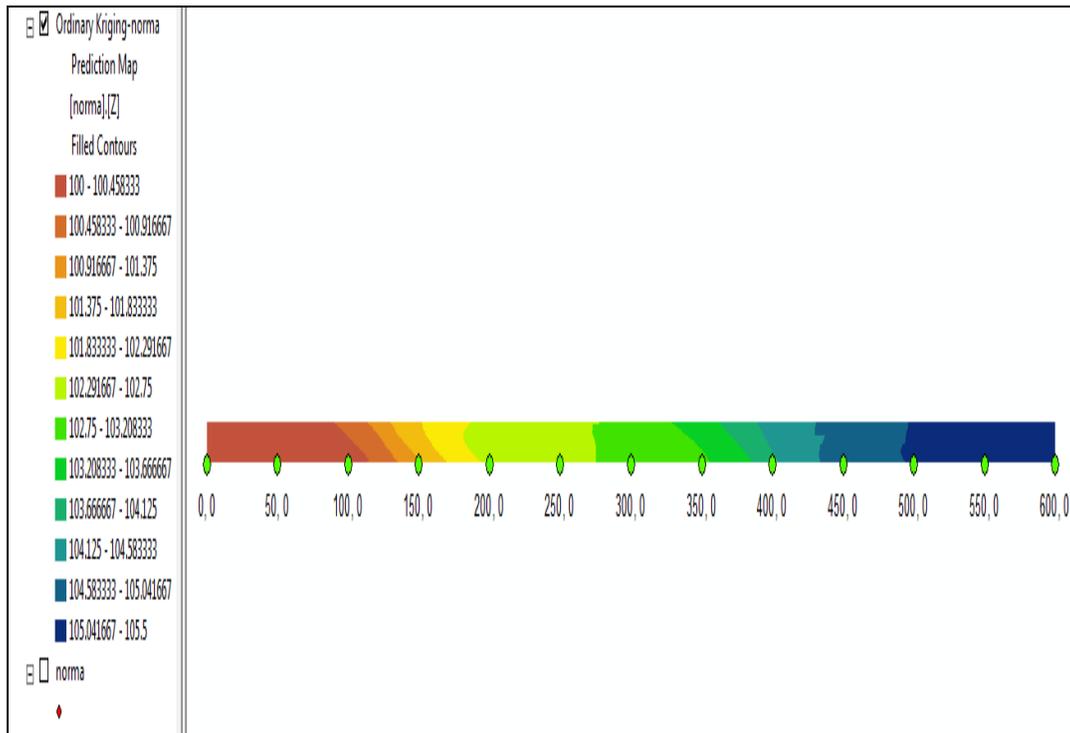
Noveno caso.

Tabla 8.15. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:			9	Nº de pruebas:		12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 0+000	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 0+600		Longitud del tramo: L= 600.00	Ancho del tramo	A=	11
			Nº	A				
	(a)	(b)	(a x L)	(b x A)	( Km1 + dL )	( dA - A/2 )		
0								
1	0.287	0.216	172.2	2.376	0+172.20	-3.124		
2	0.705	0.049	423	0.539	0+423.00	-4.961		
3	0.629	0.112	377.4	1.232	0+377.40	-4.268		
4	0.65	0.519	390	5.709	0+390.00	0.209		
5	0.205	0.767	123	8.437	0+123.00	2.937		
6	0.806	0.299	483.6	3.289	0+483.60	-2.211		
7	0.977	0.962	586.2	10.582	0+586.20	5.082		
8	0.564	0.089	338.4	0.979	0+338.40	-4.521		
9	0.102	0.159	61.2	1.749	0+061.20	-3.751		
10	0.328	0.457	196.8	5.027	0+196.80	-0.473		
11	0.23	0.715	138	7.865	0+138.00	2.365		
12	0.197	0.101	118.2	1.111	0+118.20	-4.389		

**Tabla 8.16. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
61.20	1.749	100.0
118.20	1.111	100.5
123.00	8.437	101.0
138.00	7.865	101.5
172.20	2.376	102.0
196.80	5.027	102.5
338.40	0.979	103.0
377.40	1.232	103.5
390.00	5.709	104.0
423.00	0.539	104.5
483.60	3.289	105.0
586.20	10.582	105.5



**Figura 8.36. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

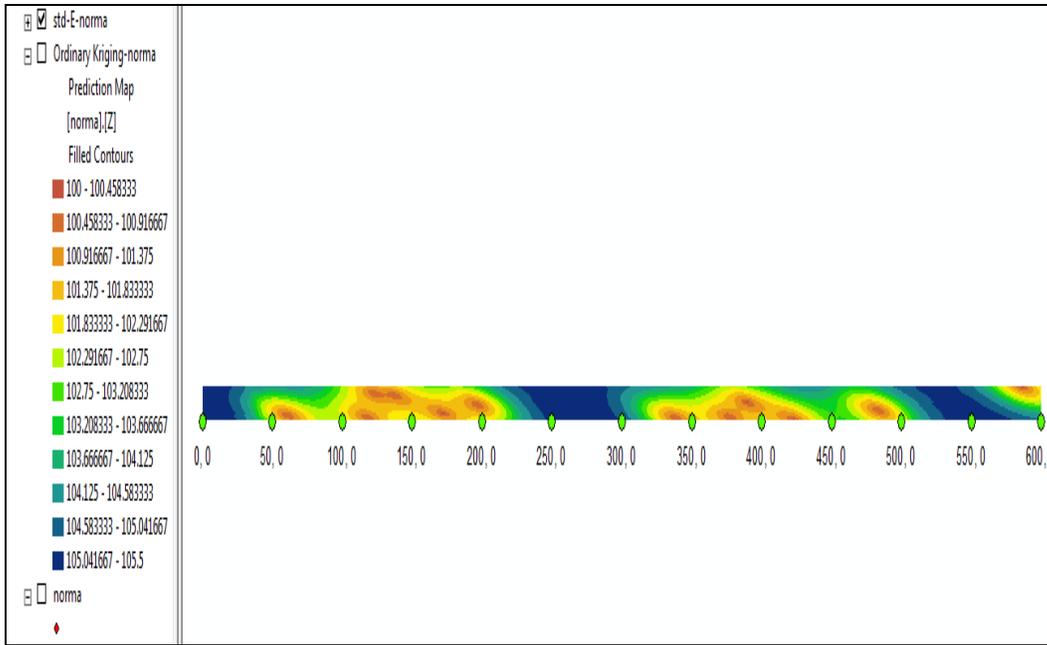


Figura 8.37. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

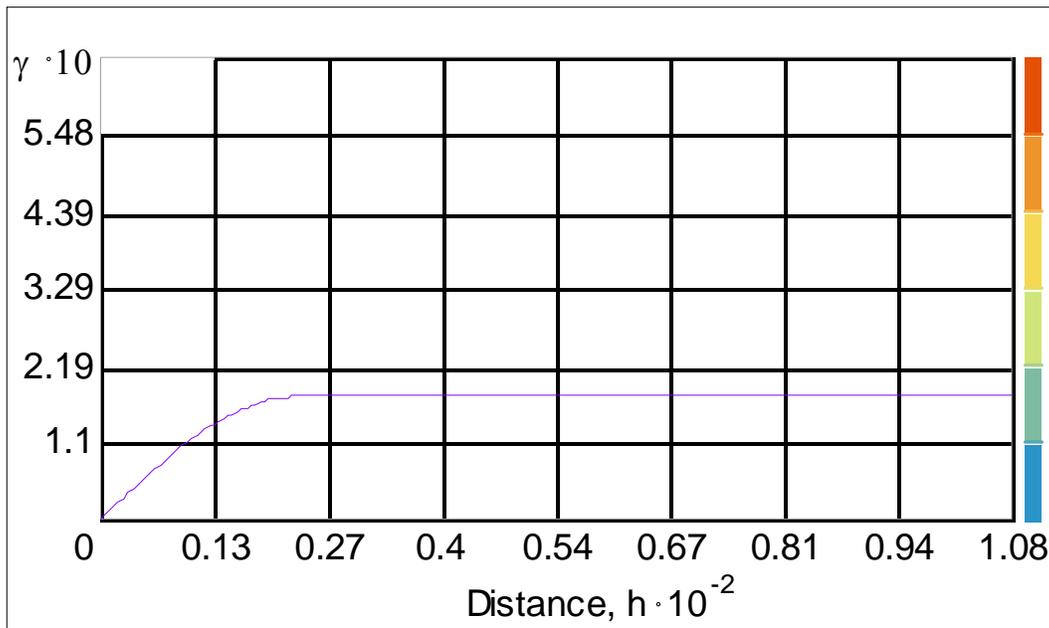


Figura 8.38. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

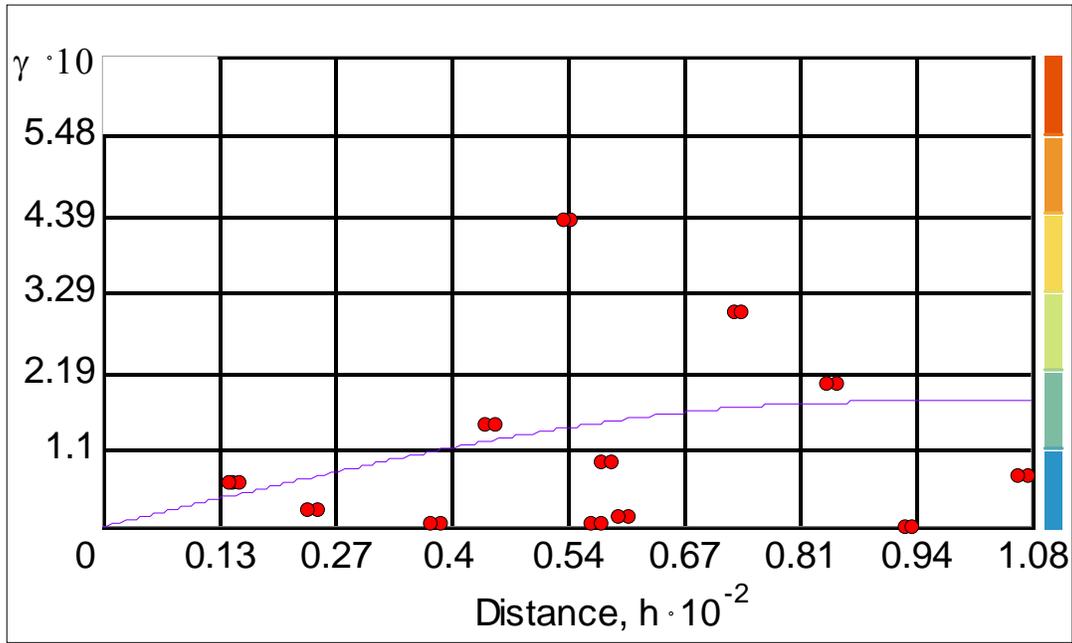


Figura 8.39. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.

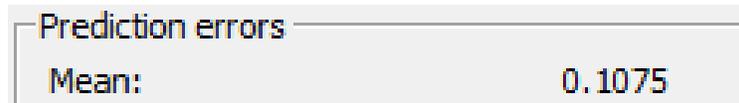


Figura 8.40. Resultado de la media del error de predicción.

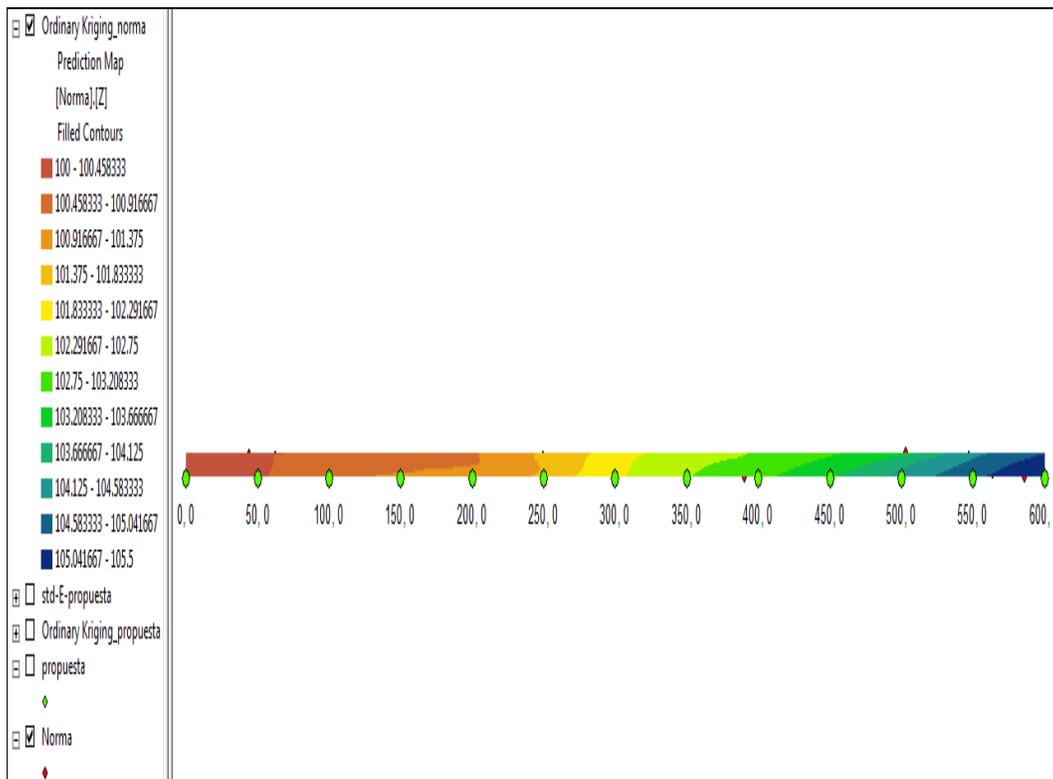
Décimo caso.

Tabla 8.17. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo: L = 600.00		Ancho del tramo		Fecha:
Km1: 0+000		Km2: 0+600						A = 11
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), dL (a x L)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) (Km1 + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado	
	(a)	(b)						
0								
1	0.38	0.27	228	2.97	0+228.00	-2.53		
2	0.912	0.582	547.2	6.402	0+547.20	0.902		
3	0.939	0.162	563.4	1.782	0+563.40	-3.718		
4	0.485	0.321	291	3.531	0+291.00	-1.969		
5	0.104	0.576	62.4	6.336	0+062.40	0.836		
6	0.65	0.038	390	0.418	0+390.00	-5.082		
7	0.976	0.046	585.6	0.506	0+585.60	-4.994		
8	0.546	0.468	327.6	5.148	0+327.60	-0.352		
9	0.843	0.497	505.8	5.467	0+505.80	-0.033		
10	0.416	0.543	249.6	5.973	0+249.60	0.473		
11	0.838	0.675	502.8	7.425	0+502.80	1.925		
12	0.073	0.612	43.8	6.732	0+043.80	1.232		

**Tabla 8.18. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
43.80	6.732	100.0
62.40	6.336	100.5
228.00	2.970	101.0
249.60	5.973	101.5
291.00	3.531	102.0
327.60	5.148	102.5
390.00	0.418	103.0
502.80	7.425	103.5
505.80	5.467	104.0
547.20	6.402	104.5
563.40	1.782	105.0
585.60	0.506	105.5



**Figura 8.41. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

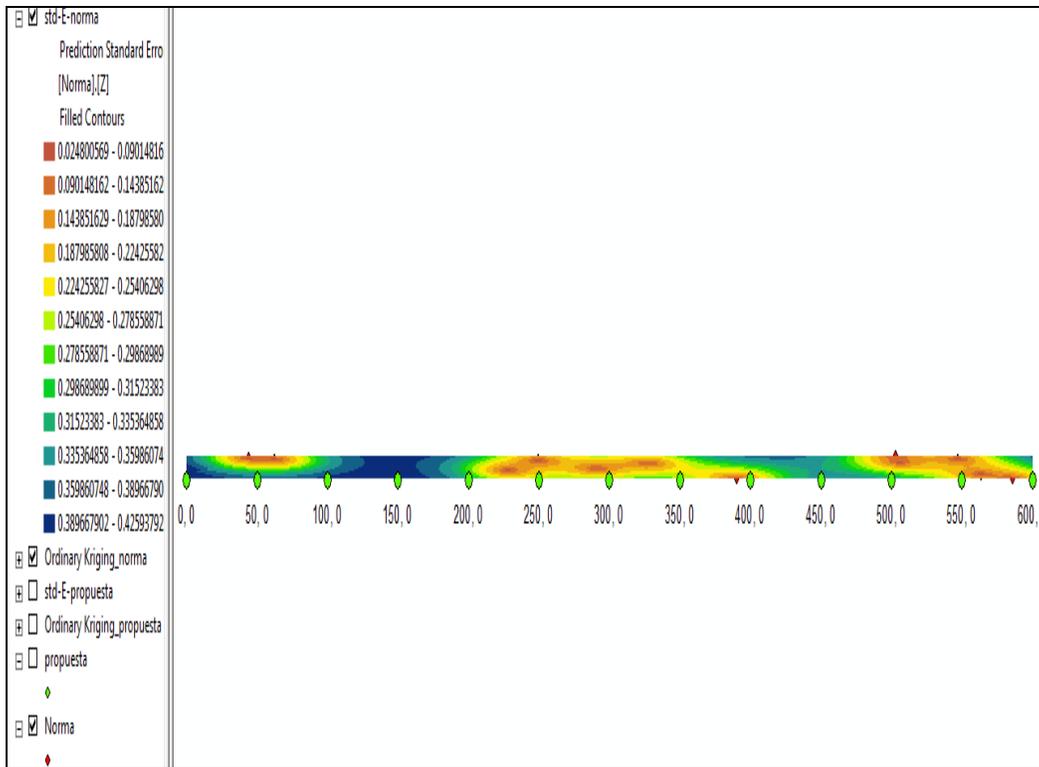


Figura 8.42. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

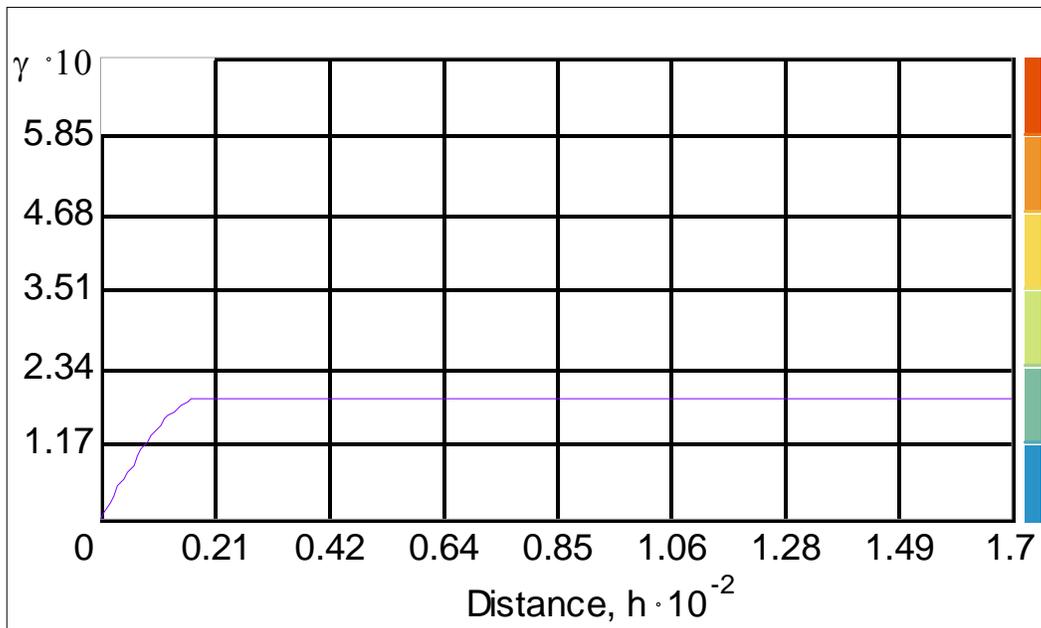


Figura 8.43. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

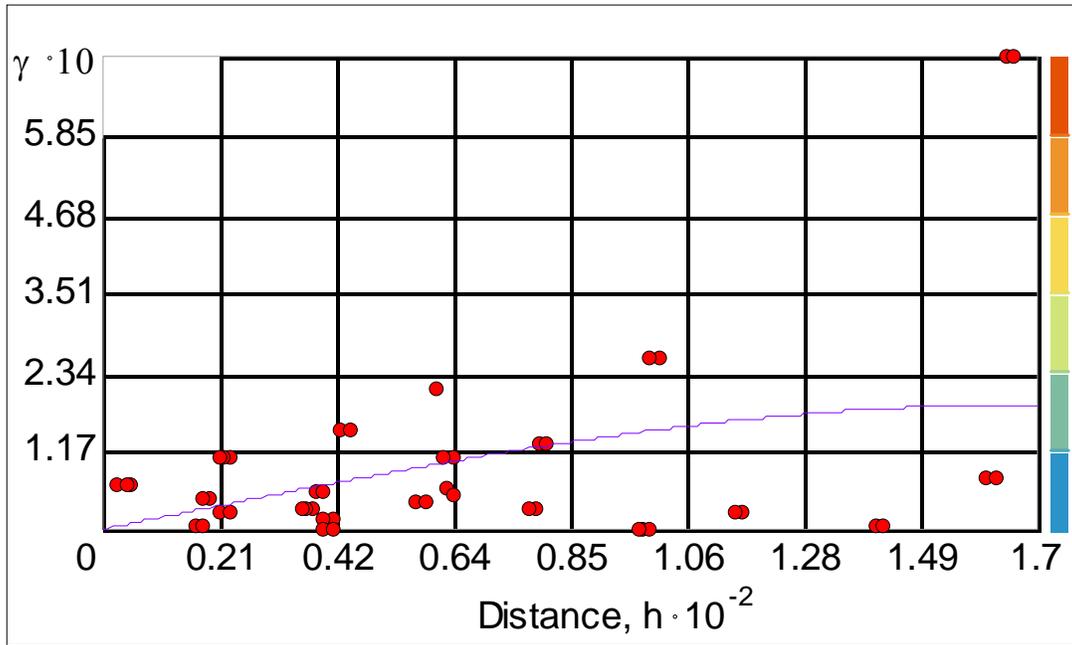


Figura 8.44. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.45. Resultado de la media del error de predicción.

### 8.1.2 Muestreo Propuesto.

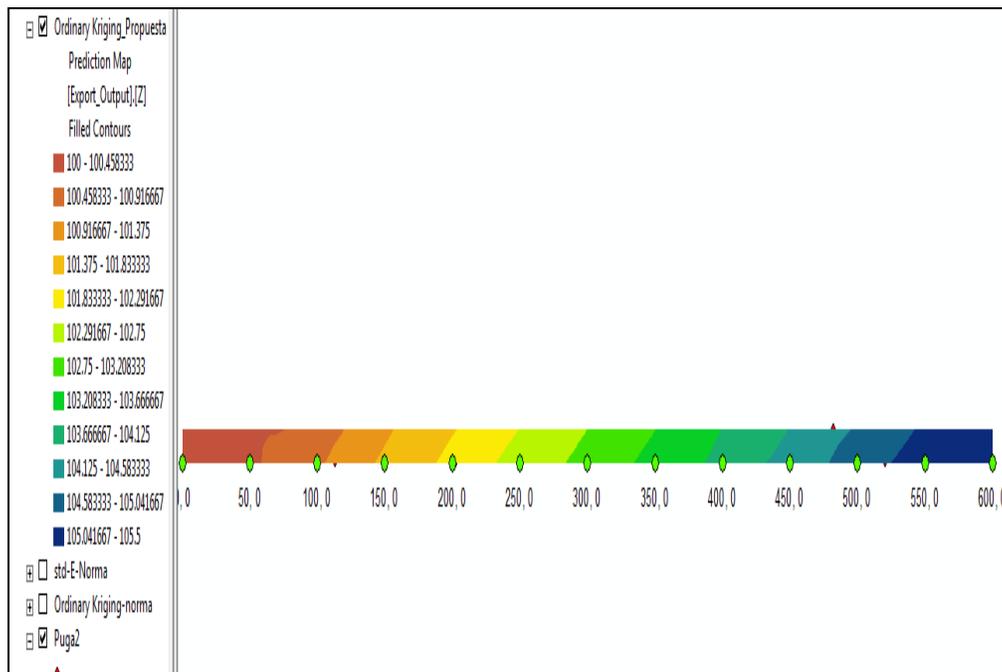
Segundo caso.

Tabla 8.19. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:					1	Nº de pruebas:		12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 0+000			Cadenamiento al término del tramo	Km2: 0+600		Longitud del tramo: L= 600.00	Ancho del tramo		A= 11
	Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba		A	B		Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)						
0	0+000									
1	0+050	50	0.473	0.738	23.65	8.118	0+023.65	2.618		
2	0+100	50	0.397	0.001	19.85	0.011	0+069.85	-5.489		
3	0+150	50	0.983	0.753	49.15	8.283	0+149.15	2.783		
4	0+200	50	0.745	0.967	37.25	10.637	0+187.25	5.137		
5	0+250	50	0.846	0.823	42.3	9.053	0+242.30	3.553		
6	0+300	50	0.378	0.989	18.9	10.879	0+268.90	5.379		
7	0+350	50	0.385	0.831	19.25	9.141	0+319.25	3.641		
8	0+400	50	0.139	0.262	6.95	2.882	0+356.95	-2.618		
9	0+450	50	0.802	0.491	40.1	5.401	0+440.10	-0.099		
10	0+500	50	0.815	0.814	40.75	8.954	0+490.75	3.454		
11	0+550	50	0.219	0.421	10.95	4.631	0+510.95	-0.869		
12	0+600	50	0.744	0.014	37.2	0.154	0+587.20	-5.346		

**Tabla 20. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
23.65	8.118	100.0
69.85	0.011	100.5
149.15	8.283	101.0
187.25	10.637	101.5
242.30	9.053	102.0
268.90	10.879	102.5
319.25	9.141	103.0
356.95	2.882	103.5
440.10	5.401	104.0
490.75	8.954	104.5
510.95	4.631	105.0
587.20	0.154	105.5

**Figura 8.46. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.**

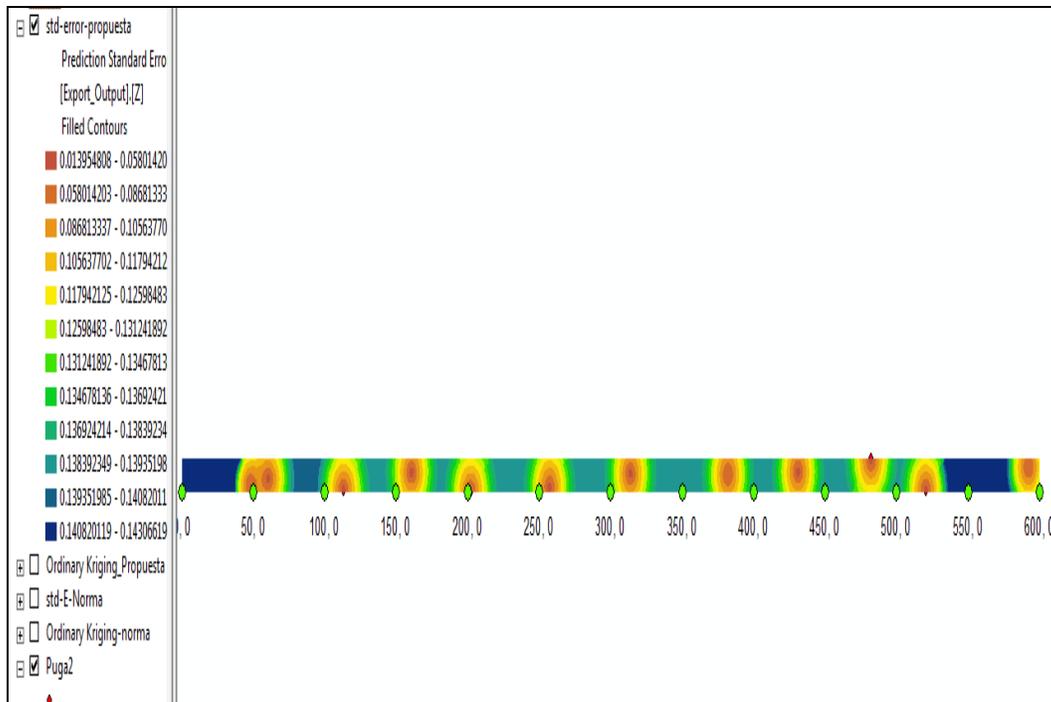


Figura 8.47. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

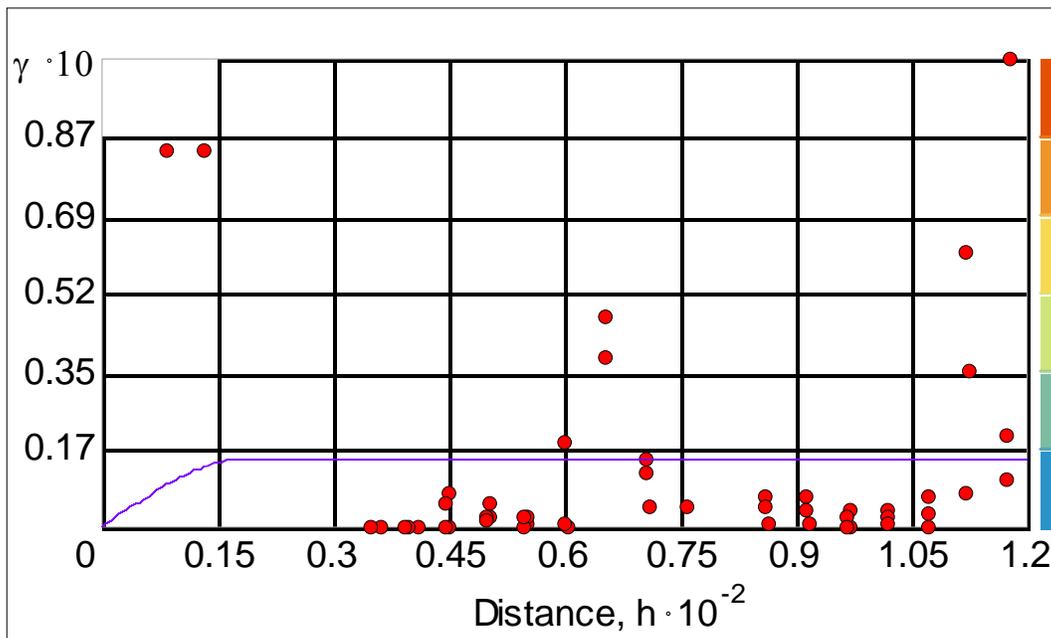


Figura 8.48. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

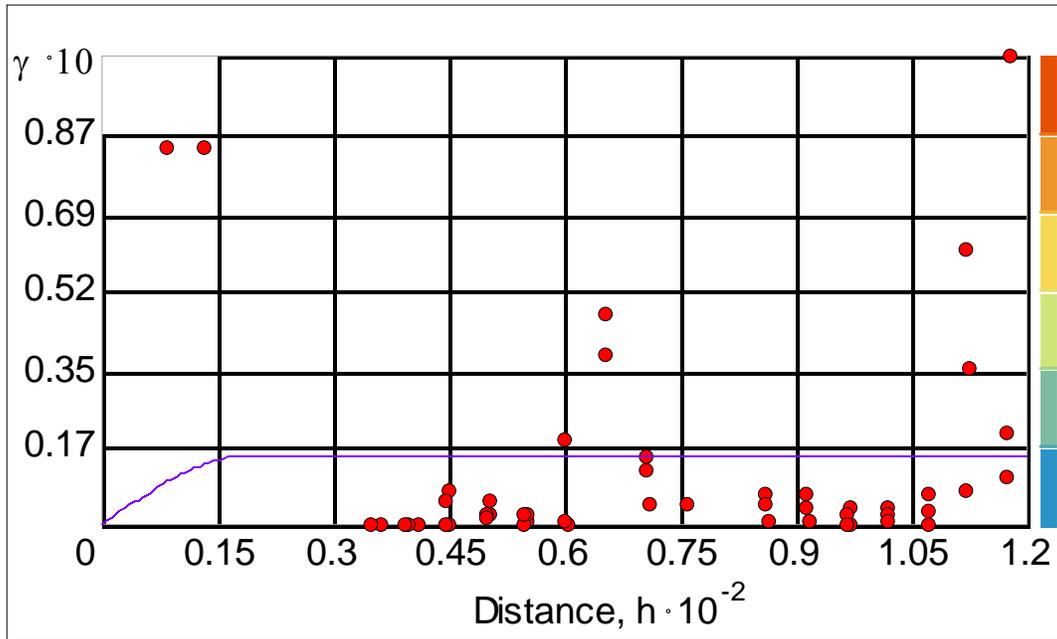


Figura 8.49. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

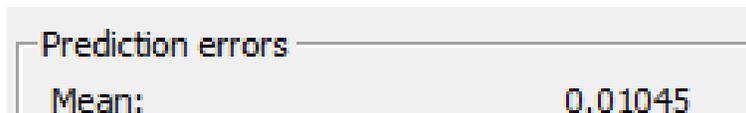


Figura 8.50. Resultado de la media del error de predicción.

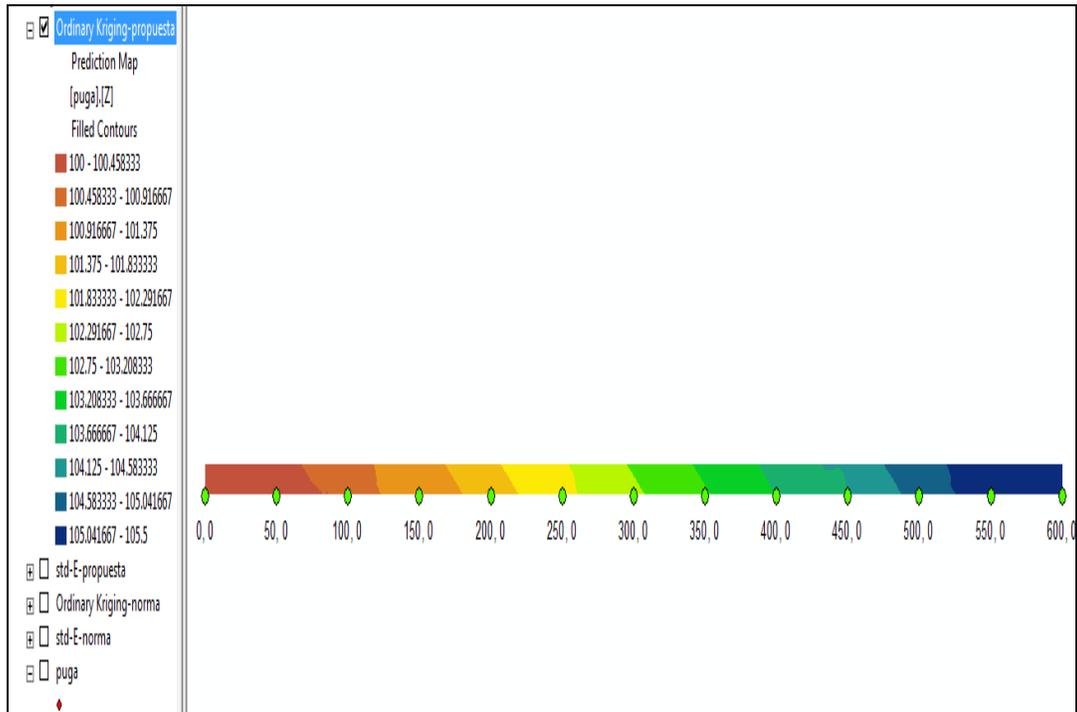
Tercer caso.

Tabla 8.20. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:		3		Nº de pruebas:		12		Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Cadenamiento al término del tramo	Km1: 0+000		Km2: 0+600		Longitud del tramo: L= 600.00	Ancho del tramo	A =	11
		A	B	A	B				
Nº	cadenamiento acumulado (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	(a)	(b)	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) (Km <sub>n</sub> + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
0	0+000								
1	0+050	50	0.316	0.914	15.8	10.054	0+015.80	4.554	
2	0+100	50	0.731	0.648	36.55	7.128	0+086.55	1.628	
3	0+150	50	0.494	0.294	24.7	3.234	0+124.70	-2.266	
4	0+200	50	0.841	0.47	42.05	5.17	0+192.05	-0.33	
5	0+250	50	0.973	0.252	48.65	2.772	0+248.65	-2.728	
6	0+300	50	0.361	0.043	18.05	0.473	0+268.05	-5.027	
7	0+350	50	0.436	0.316	21.8	3.476	0+321.80	-2.024	
8	0+400	50	0.652	0.329	32.6	3.619	0+382.60	-1.881	
9	0+450	50	0.911	0.504	45.55	5.544	0+445.55	0.044	
10	0+500	50	0.064	0.893	3.2	9.823	0+453.20	4.323	
11	0+550	50	0.417	0.088	20.85	0.968	0+520.85	-4.532	
12	0+600	50	0.562	0.095	28.1	1.045	0+578.10	-4.455	

**Tabla 21. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
15.80	10.054	100.0
86.55	7.128	100.5
124.70	3.234	101.0
192.05	5.170	101.5
248.65	2.772	102.0
268.05	0.473	102.5
321.80	3.476	103.0
382.60	3.619	103.5
445.55	5.544	104.0
453.20	9.823	104.5
520.85	0.968	105.0
578.10	1.045	105.5

**Figura 8.51. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.**

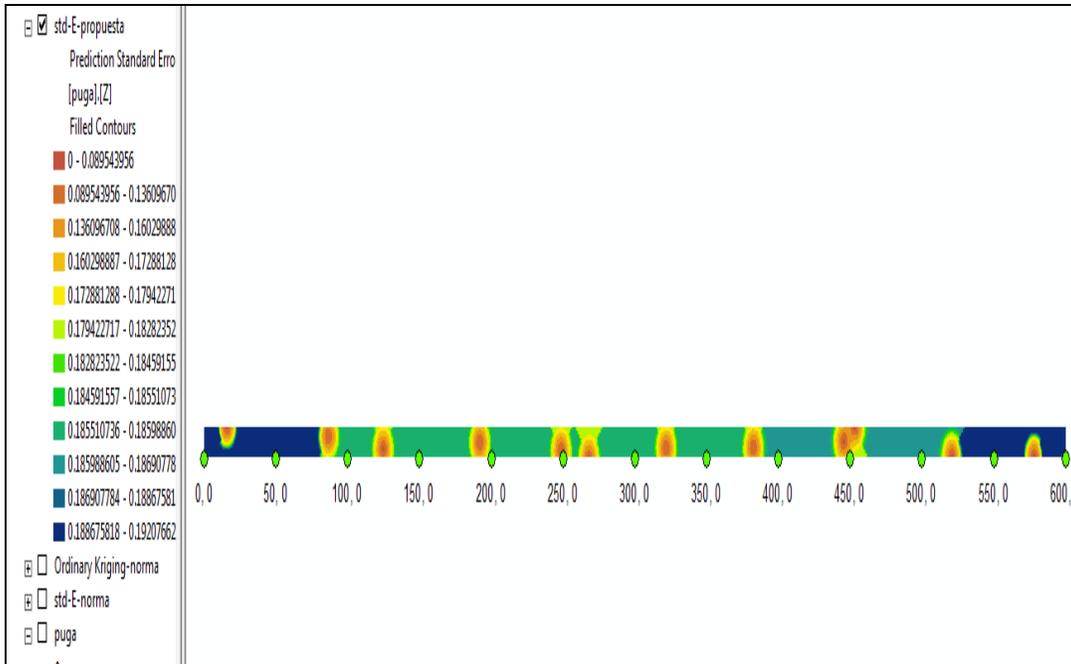


Figura 8.52. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

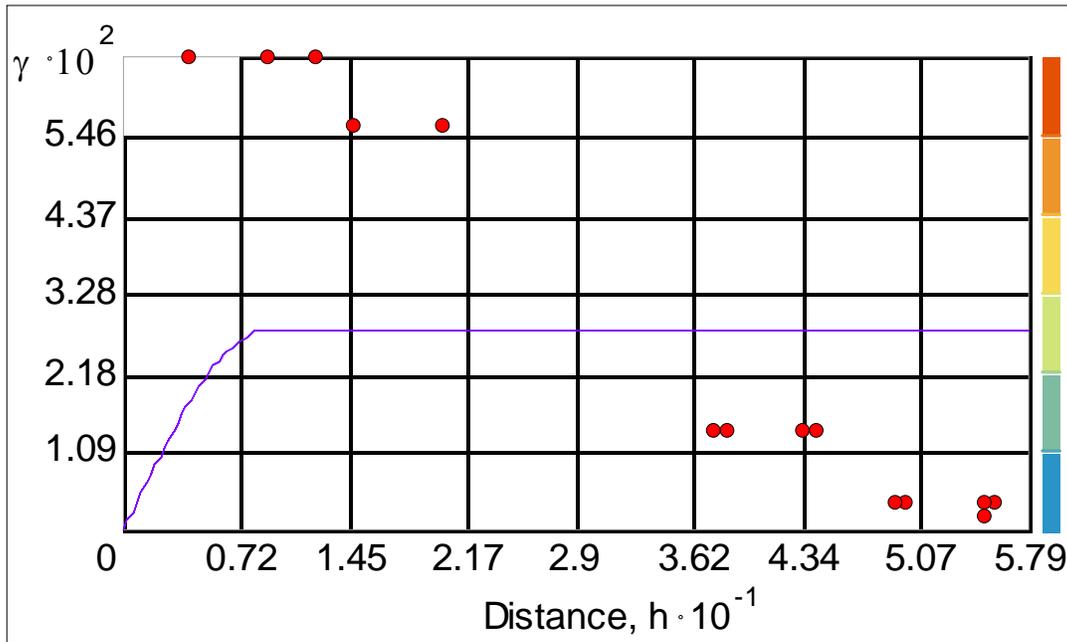


Figura 8.53. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

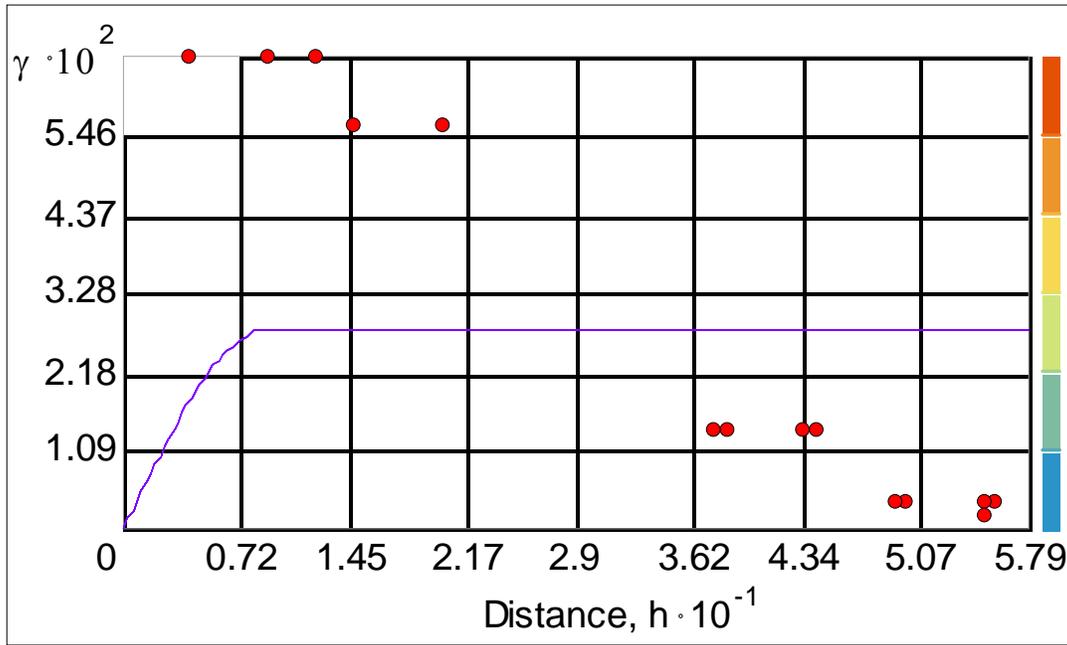


Figura 8.54. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.



Figura 8.55. Resultado de la media del error de predicción.

Cuarto caso.

Tabla 8.22. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:					4	Nº de pruebas:		12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Cadenamiento al término del tramo			Longitud del tramo:	Ancho del tramo	L= 600.00	A =	11		
	Km1: 0+000							Km2: 0+600		
Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba	A	B	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) (Km <sub>n</sub> + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado	
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)						
0	0+000									
1	0+050	50	0.204	0.571	10.2	6.281	0+010.20	0.781		
2	0+100	50	0.337	0.182	16.85	2.002	0+066.85	-3.498		
3	0+150	50	0.834	0.346	41.7	3.806	0+141.70	-1.694		
4	0+200	50	0.914	0.367	45.7	4.037	0+195.70	-1.463		
5	0+250	50	0.278	0.789	13.9	8.679	0+213.90	3.179		
6	0+300	50	0.346	0.715	17.3	7.865	0+267.30	2.365		
7	0+350	50	0.745	0.012	37.25	0.132	0+337.25	-5.368		
8	0+400	50	0.283	0.305	14.15	3.355	0+364.15	-2.145		
9	0+450	50	0.603	0.634	30.15	6.974	0+430.15	1.474		
10	0+500	50	0.096	0.256	4.8	2.816	0+454.80	-2.684		
11	0+550	50	0.71	0.171	35.5	1.881	0+535.50	-3.619		
12	0+600	50	0.902	0.873	45.1	9.603	0+595.10	4.103		

Tabla 23. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
10.20	6.281	100.0
66.85	2.002	100.5
141.70	3.806	101.0
195.70	4.037	101.5
213.90	8.679	102.0
267.30	7.865	102.5
337.25	0.132	103.0
364.15	3.355	103.5
430.15	6.974	104.0
454.80	2.816	104.5
535.50	1.881	105.0
595.10	9.603	105.5

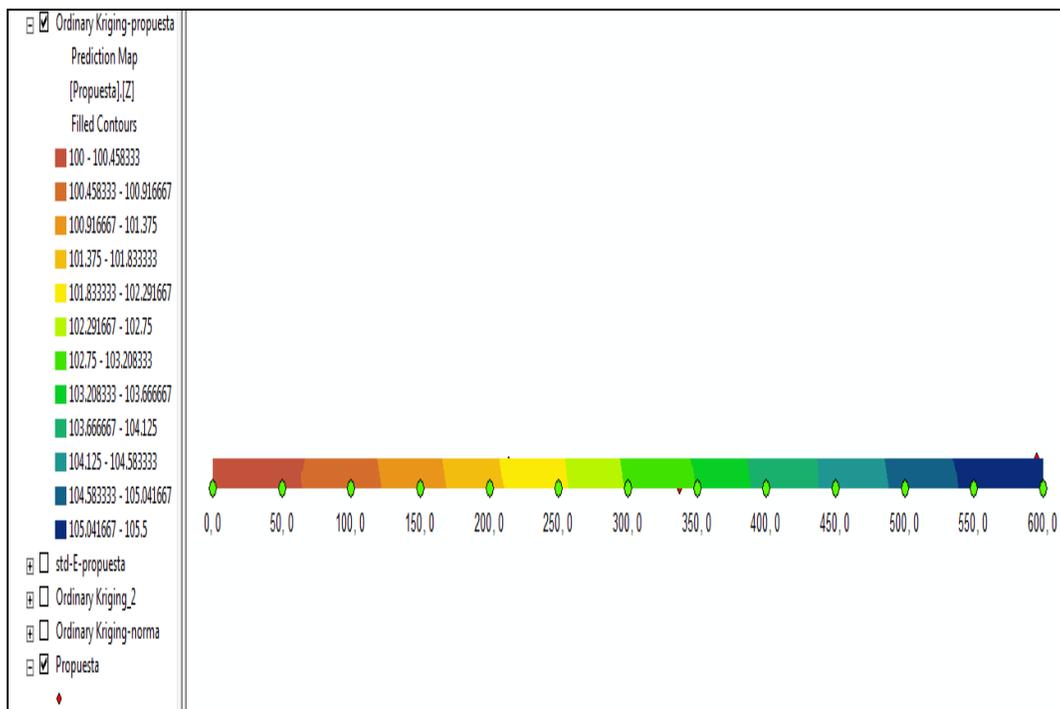


Figura 8.56. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

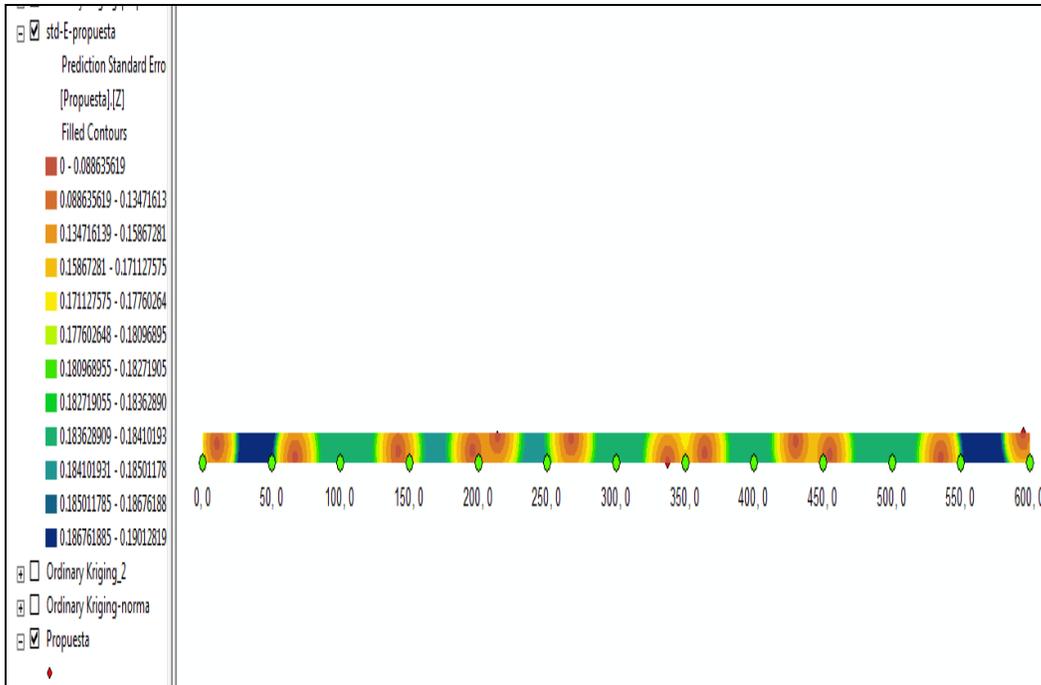


Figura 8.57. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

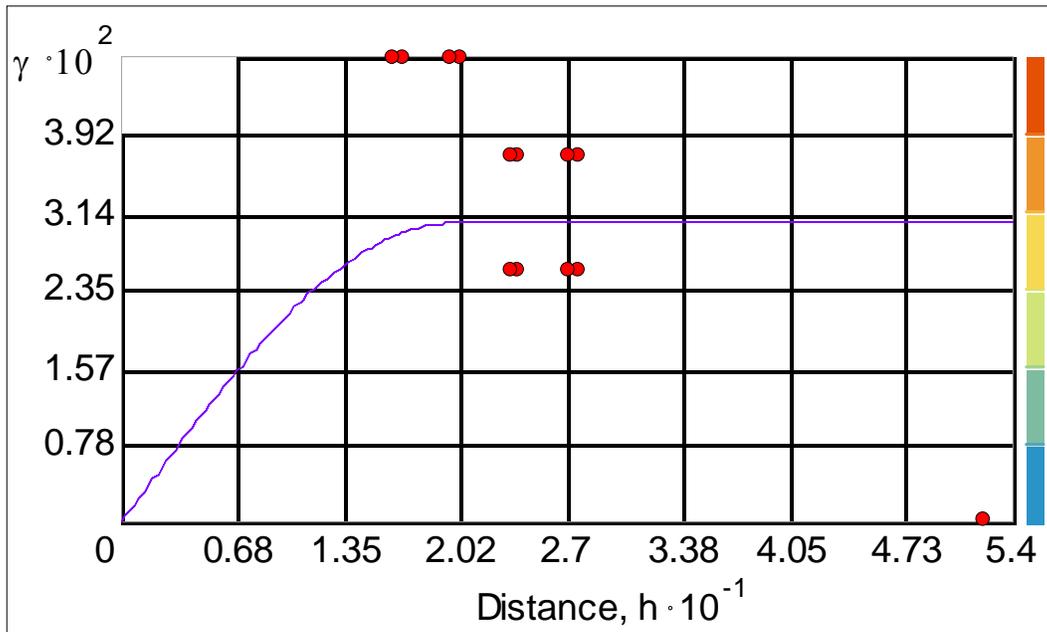


Figura 8.58. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

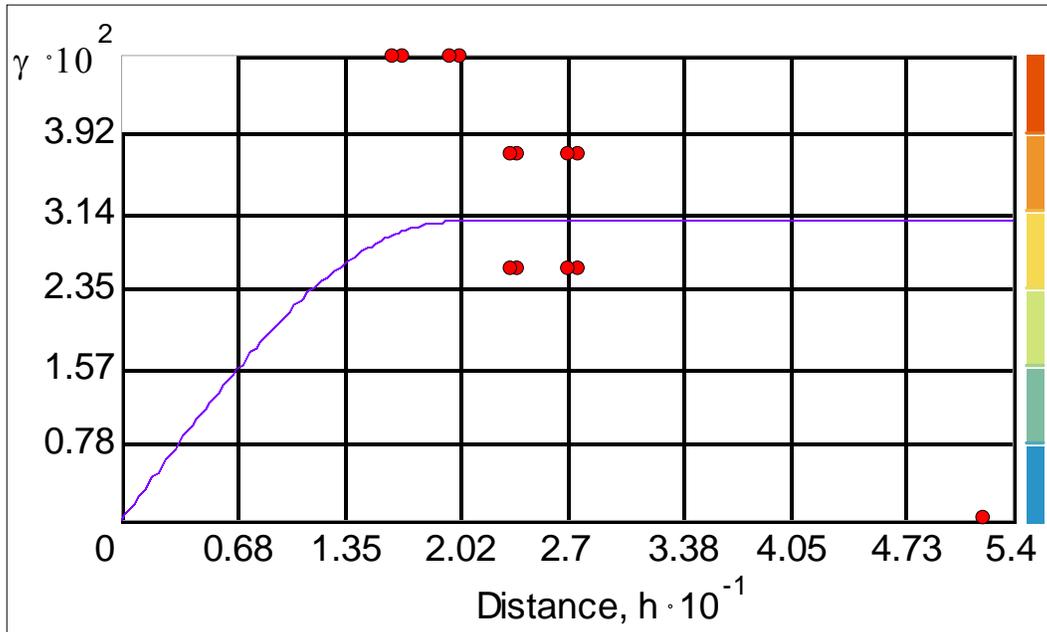


Figura 8.59. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

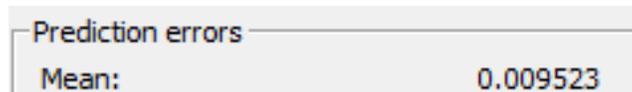


Figura 8.60. Resultado de la media del error de predicción.

Quinto caso.

Tabla 8.24. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:	Ancho del tramo:	Fecha:			
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L= 600.00	A=	11			
Nº	cadenamiento acumulado (Km) (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	A (a)	B (b)	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km, + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
0	0+000								
1	0+050	50	0.51	0.357	25.5	3.927	0+025.50	-1.573	
2	0+100	50	0.797	0.89	39.85	9.79	0+089.85	4.29	
3	0+150	50	0.165	0.658	8.25	7.238	0+108.25	1.738	
4	0+200	50	0.88	0.327	44	3.597	0+194.00	-1.903	
5	0+250	50	0.54	0.893	27	9.823	0+227.00	4.323	
6	0+300	50	0.24	0.323	12	3.553	0+262.00	-1.947	
7	0+350	50	0.128	0.157	6.4	1.727	0+306.40	-3.773	
8	0+400	50	0.61	0.29	30.5	3.19	0+380.50	-2.31	
9	0+450	50	0.919	0.002	45.95	0.022	0+445.95	-5.478	
10	0+500	50	0.809	0.534	40.45	5.874	0+490.45	0.374	
11	0+550	50	0.259	0.182	12.95	2.002	0+512.95	-3.498	
12	0+600	50	0.467	0.78	23.35	8.58	0+573.35	3.08	

Tabla 25. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
25.50	1.727	100.0
89.85	7.238	100.5
108.25	3.553	101.0
194.00	2.002	101.5
227.00	8.580	102.0
262.00	3.927	102.5
306.40	9.823	103.0
380.50	3.190	103.5
445.95	9.790	104.0
490.45	5.874	104.5
512.95	3.597	105.0
573.35	0.022	105.5

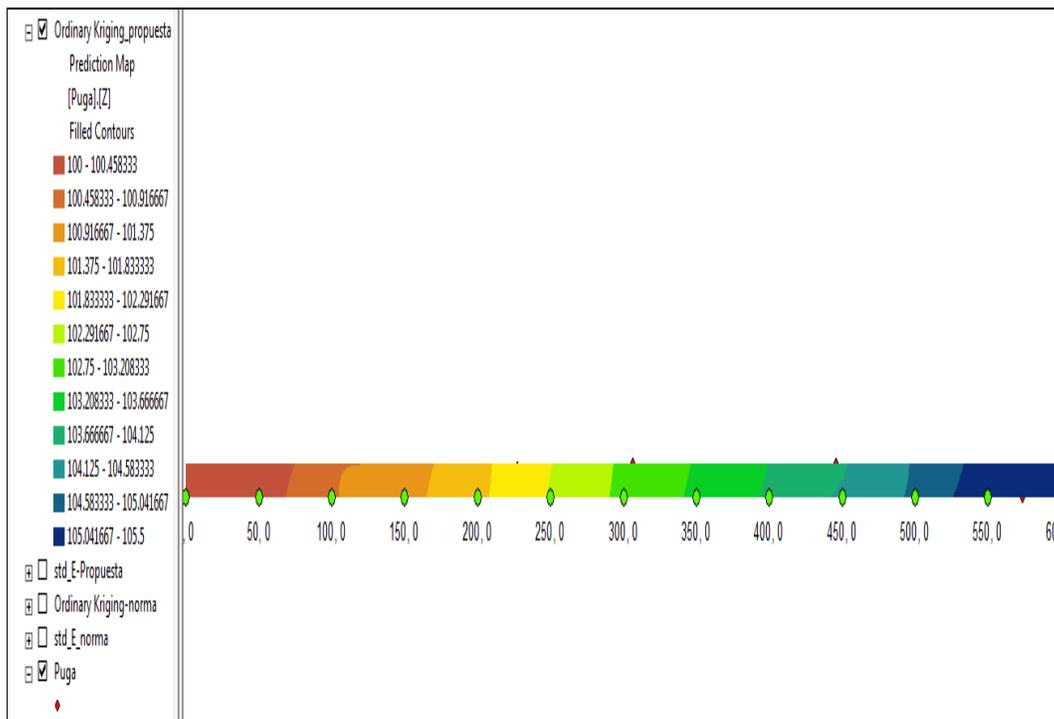


Figura 8.61. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

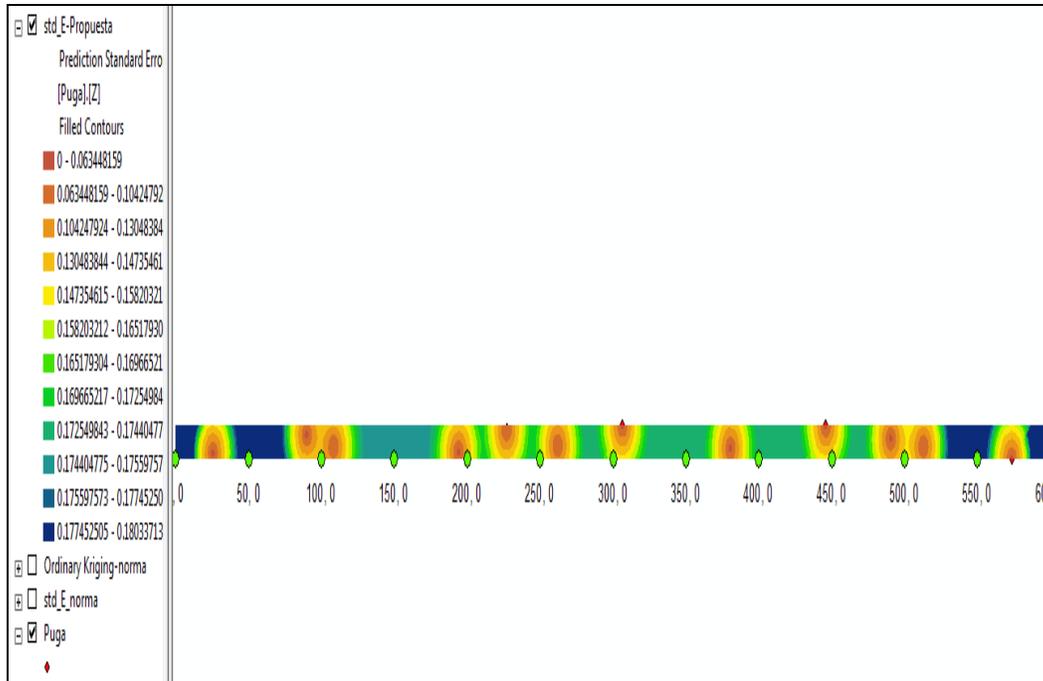


Figura 8.62. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

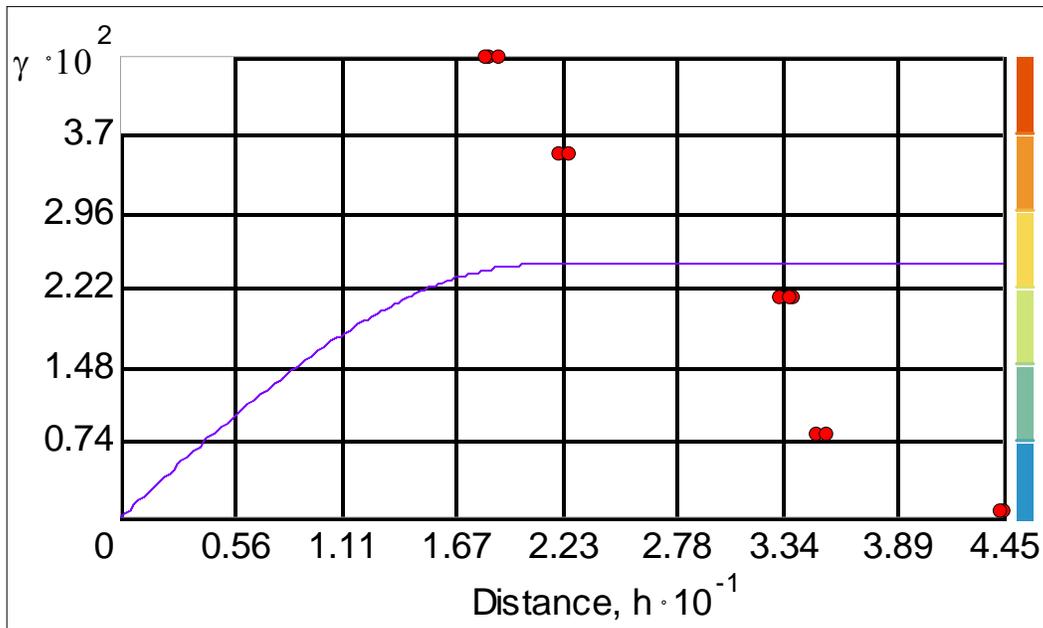


Figura 8.63. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

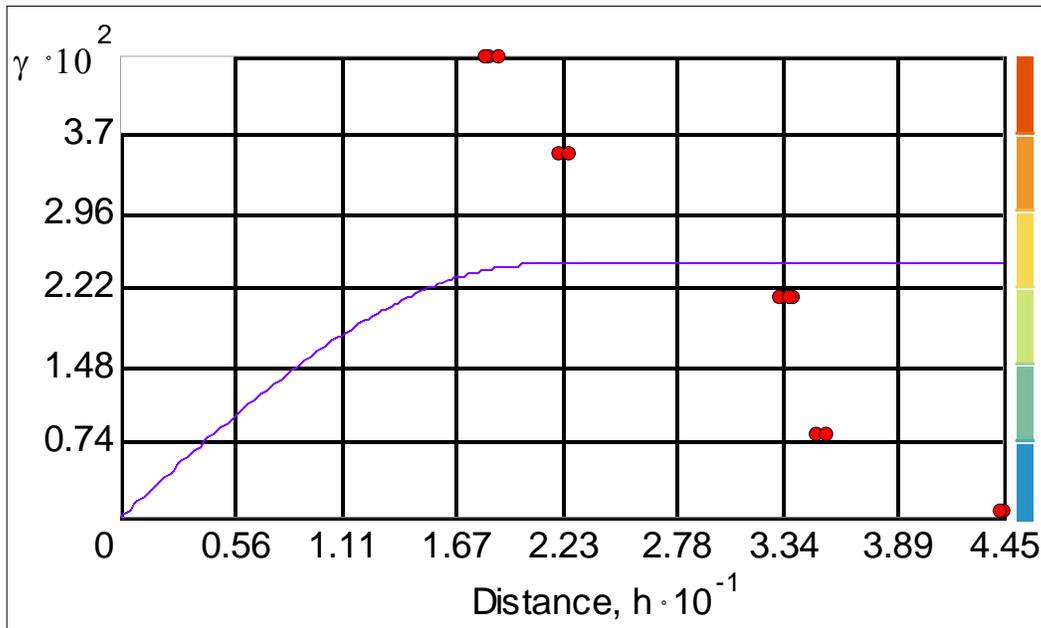


Figura 8.64. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

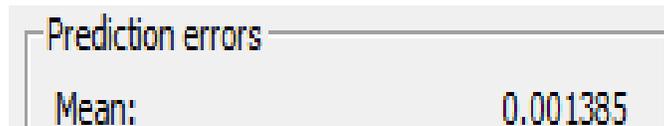


Figura 8.65. Resultado de la media del error de predicción.

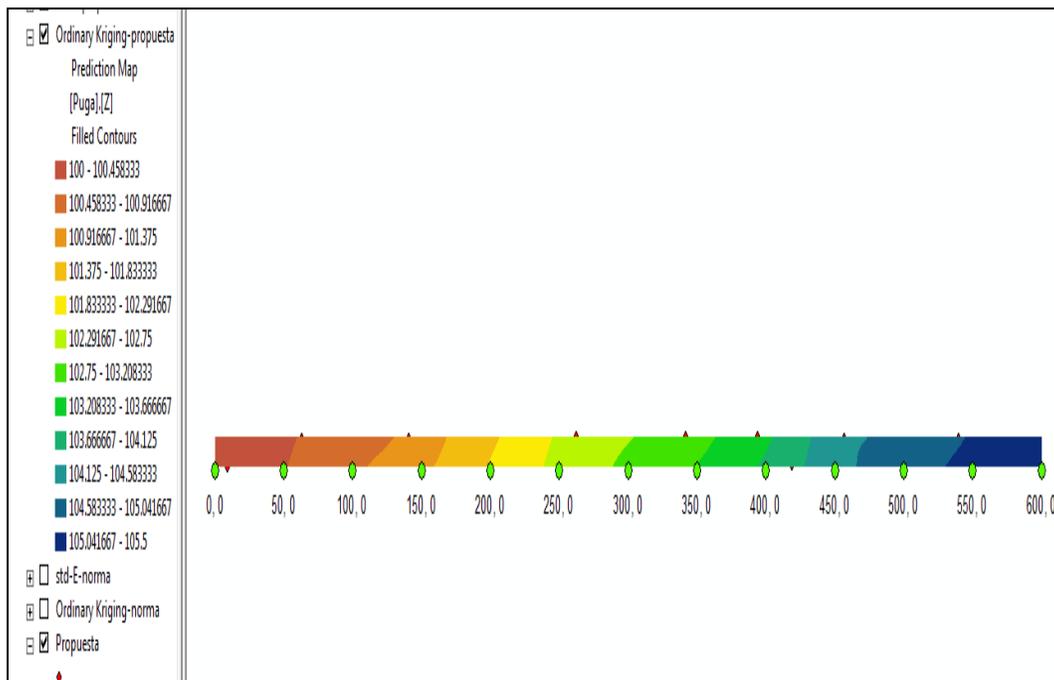
Sexto caso.

Tabla 8.26. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:		Ancho del tramo		Fecha:	
Km1: 0+000		Km2: 0+600		L= 600.00		A=		11	
Nº	cadenamiento acumulado (Km) (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	A (a)	B (b)	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A )	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km, + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
0	0+000								
1	0+050	50	0.175	0.097	8.75	1.067	0+008.75	-4.433	
2	0+100	50	0.26	0.898	13	9.878	0+063.00	4.378	
3	0+150	50	0.816	0.872	40.8	9.592	0+140.80	4.092	
4	0+200	50	0.475	0.603	23.75	6.633	0+173.75	1.133	
5	0+250	50	0.362	0.655	18.1	7.205	0+218.10	1.705	
6	0+300	50	0.245	0.925	12.25	10.175	0+262.25	4.675	
7	0+350	50	0.835	0.925	41.75	10.175	0+341.75	4.675	
8	0+400	50	0.872	0.932	43.6	10.252	0+393.60	4.752	
9	0+450	50	0.379	0.118	18.95	1.298	0+418.95	-4.202	
10	0+500	50	0.131	0.876	6.55	9.636	0+456.55	4.136	
11	0+550	50	0.793	0.904	39.65	9.944	0+539.65	4.444	
12	0+600	50	0.914	0.582	45.7	6.402	0+595.70	0.902	

**Tabla 27. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
8.75	1.067	100.0
63.00	9.878	100.5
140.80	9.592	101.0
173.75	6.633	101.5
218.10	7.205	102.0
262.25	10.175	102.5
341.75	10.175	103.0
393.60	10.252	103.5
418.95	1.298	104.0
456.55	9.636	104.5
539.65	9.944	105.0
595.70	6.402	105.5

**Figura 8.66. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**

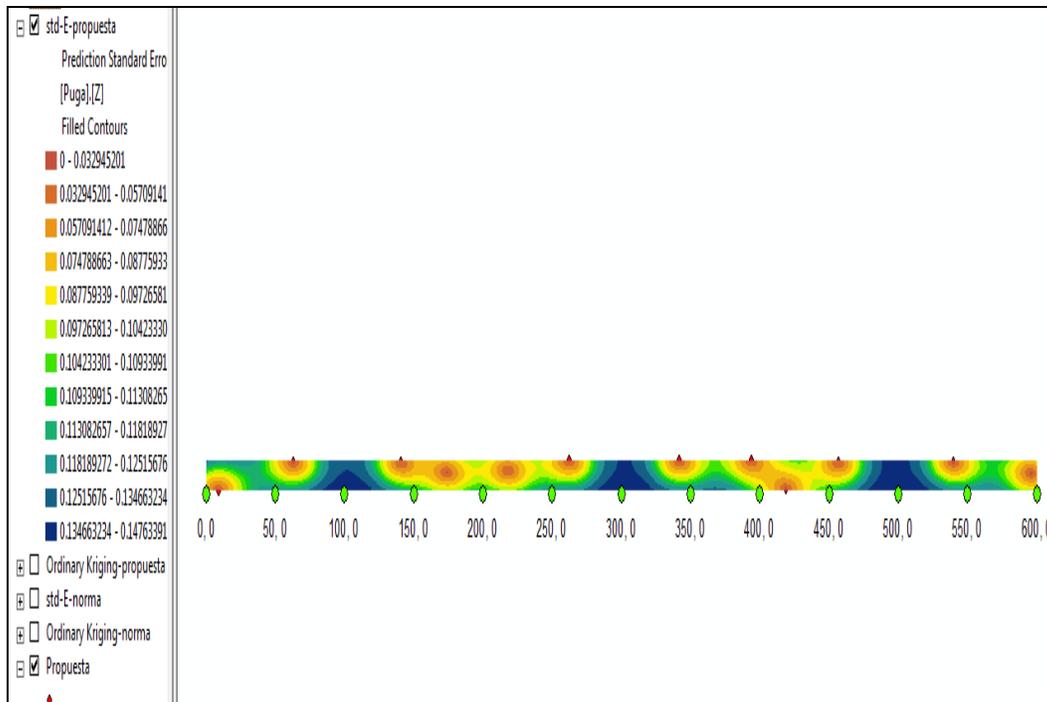


Figura 8.67. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

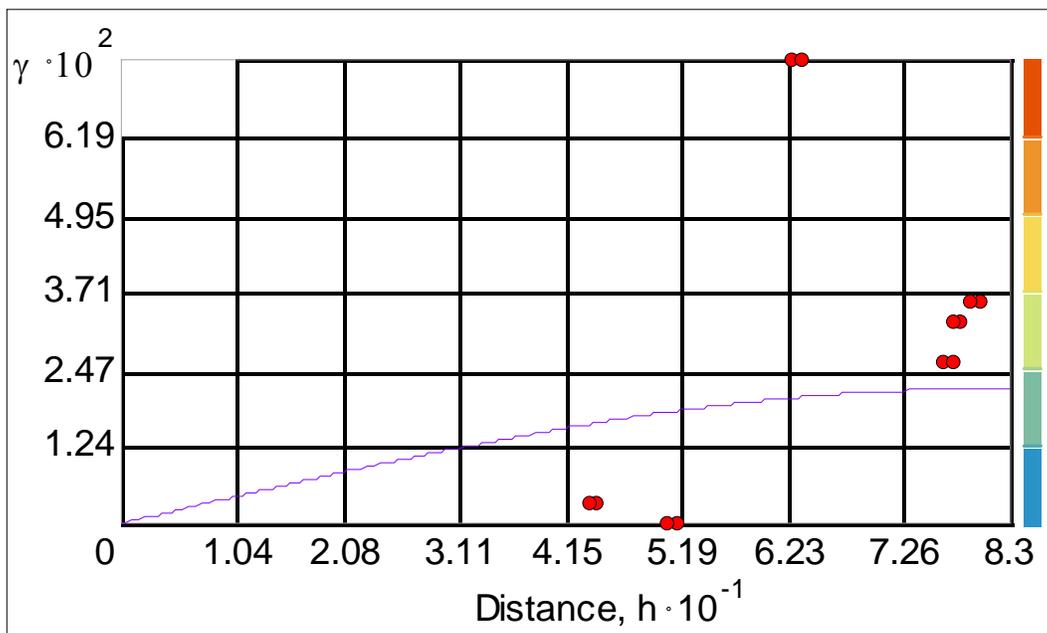


Figura 8.68. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

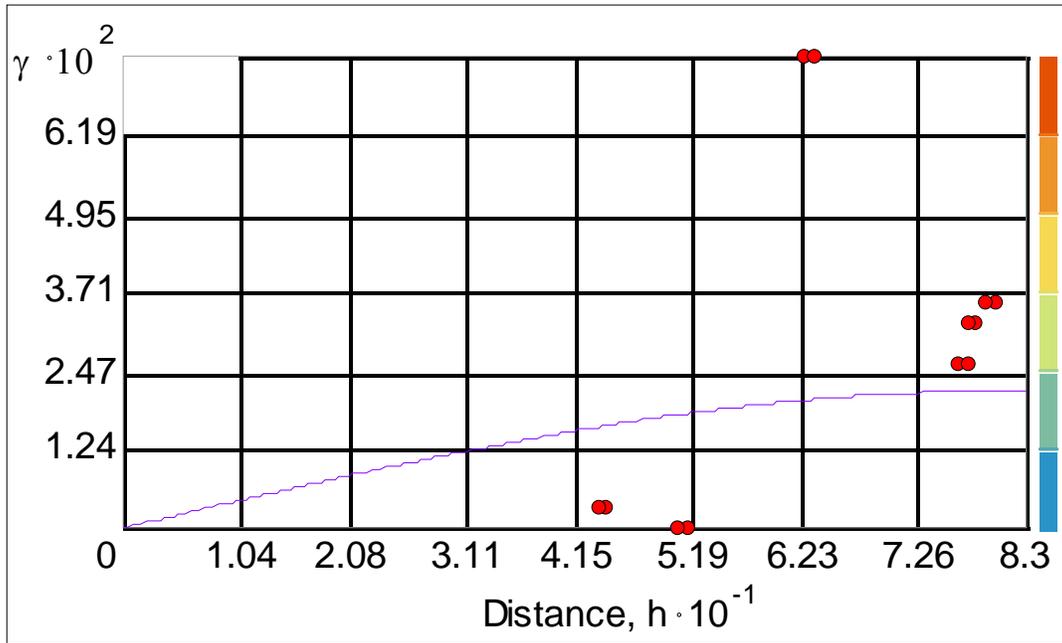


Figura 8.69. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.



Figura 8.70. Resultado de la media del error de predicción.

Séptimo caso.

Tabla 8.28. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo: L= 600.00		Ancho del tramo: A= 11		Fecha:	
Km1: 0+000		Km2: 0+600							
Nº	cadenamiento acumulado (Km) (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	A (a)	B (b)	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) ( Km <sub>n</sub> + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
0	0+000								
1	0+050	50	0.954	0.376	47.7	4.136	0+047.70	-1.364	
2	0+100	50	0.296	0.104	14.8	1.144	0+064.80	-4.356	
3	0+150	50	0.143	0.812	7.15	8.932	0+107.15	3.432	
4	0+200	50	0.672	0.603	33.6	6.633	0+183.60	1.133	
5	0+250	50	0.855	0.344	42.75	3.784	0+242.75	-1.716	
6	0+300	50	0.507	0.104	25.35	1.144	0+275.35	-4.356	
7	0+350	50	0.854	0.627	42.7	6.897	0+342.70	1.397	
8	0+400	50	0.978	0.799	48.9	8.789	0+398.90	3.289	
9	0+450	50	0.507	0.768	25.35	8.448	0+425.35	2.948	
10	0+500	50	0.619	-0.306	30.95	3.366	0+480.95	-2.134	
11	0+550	50	0.287	0.372	14.35	4.092	0+514.35	-1.408	
12	0+600	50	0.061	0.039	3.05	0.429	0+553.05	-5.071	

Tabla 29. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
47.70	4.136	100.0
64.80	1.144	100.5
107.15	8.932	101.0
183.60	6.633	101.5
242.75	3.784	102.0
275.35	1.144	102.5
342.70	6.897	103.0
398.90	8.789	103.5
425.35	8.448	104.0
480.95	3.366	104.5
514.35	4.092	105.0
553.05	0.429	105.5

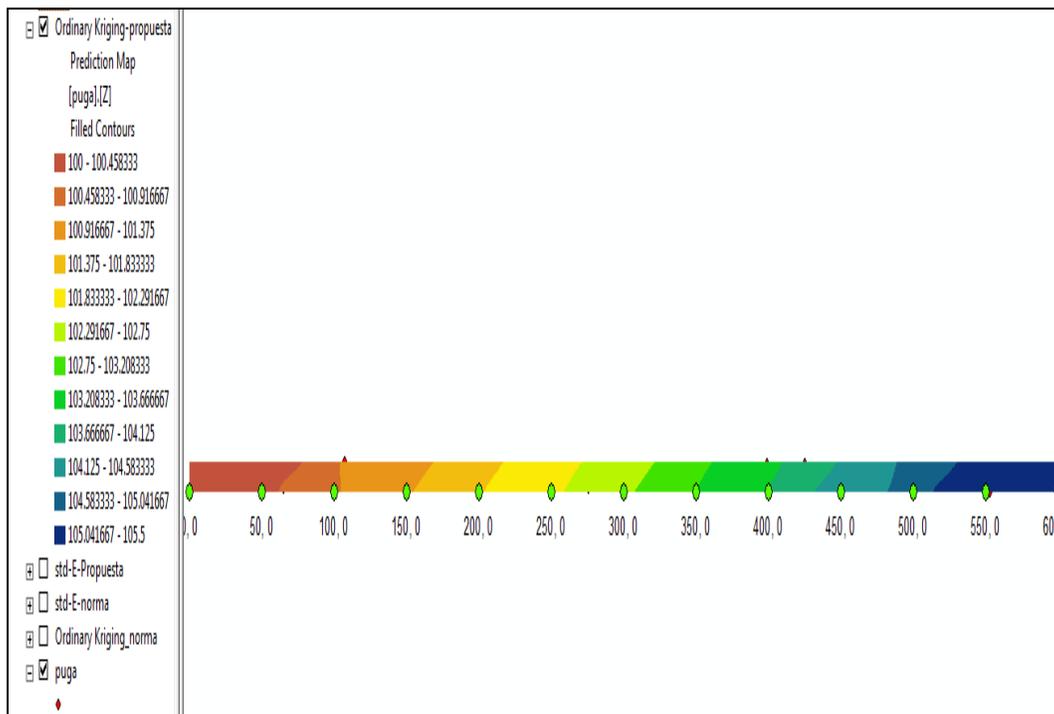


Figura 8.71. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

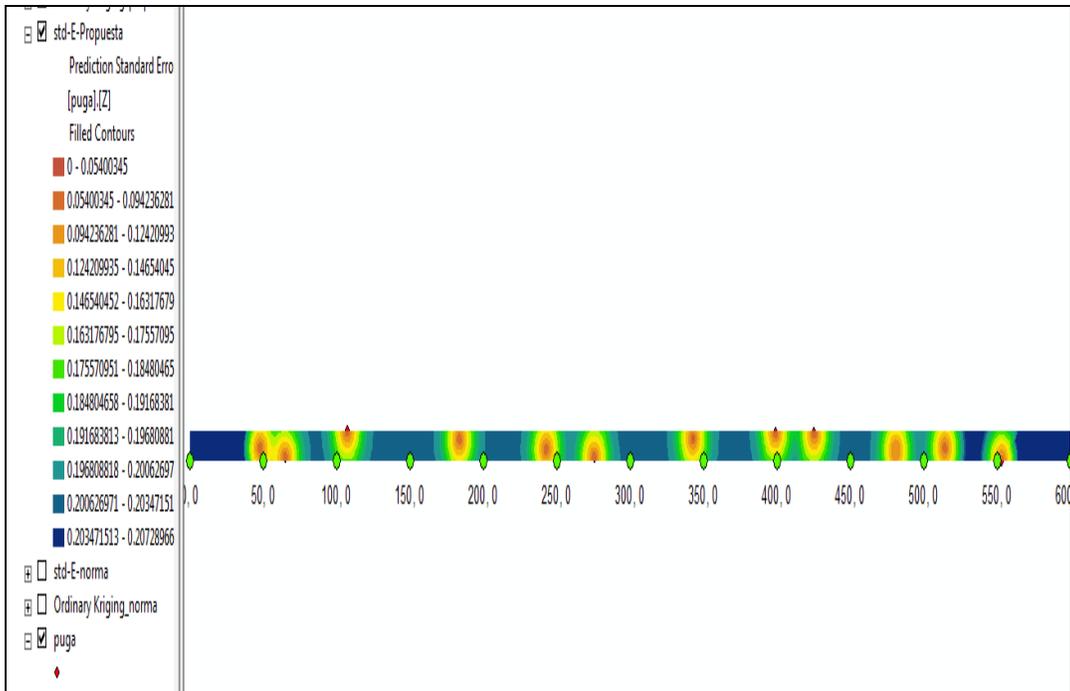


Figura 8.72. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

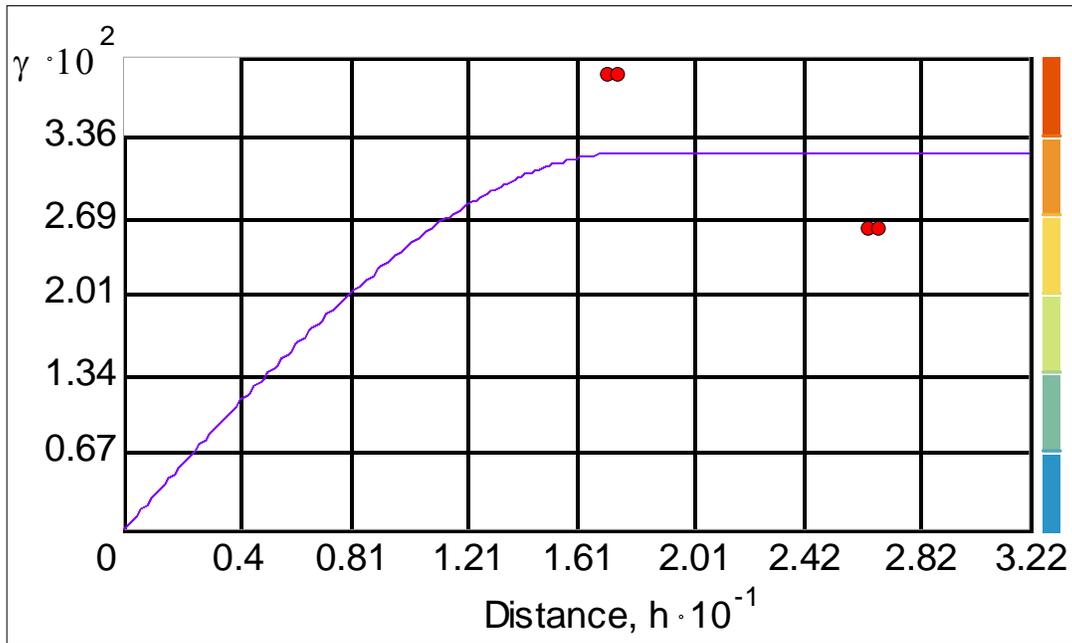


Figura 8.73. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

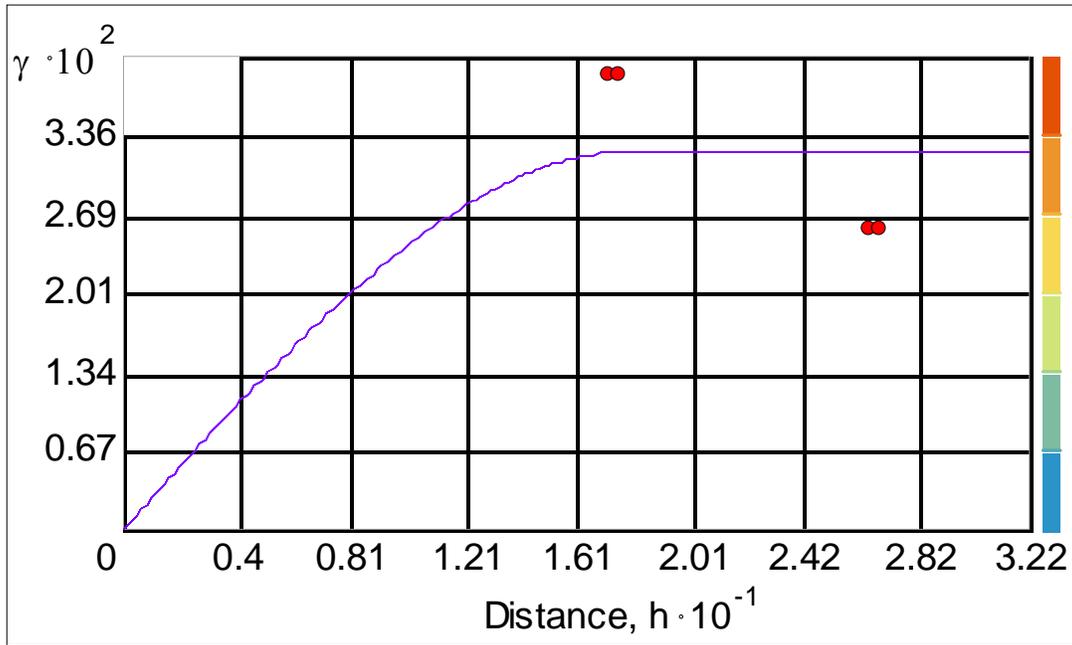


Figura 8.74. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

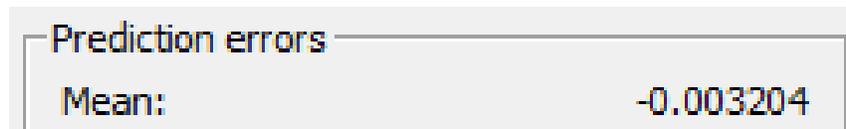


Figura 8.75. Resultado de la media del error de predicción.

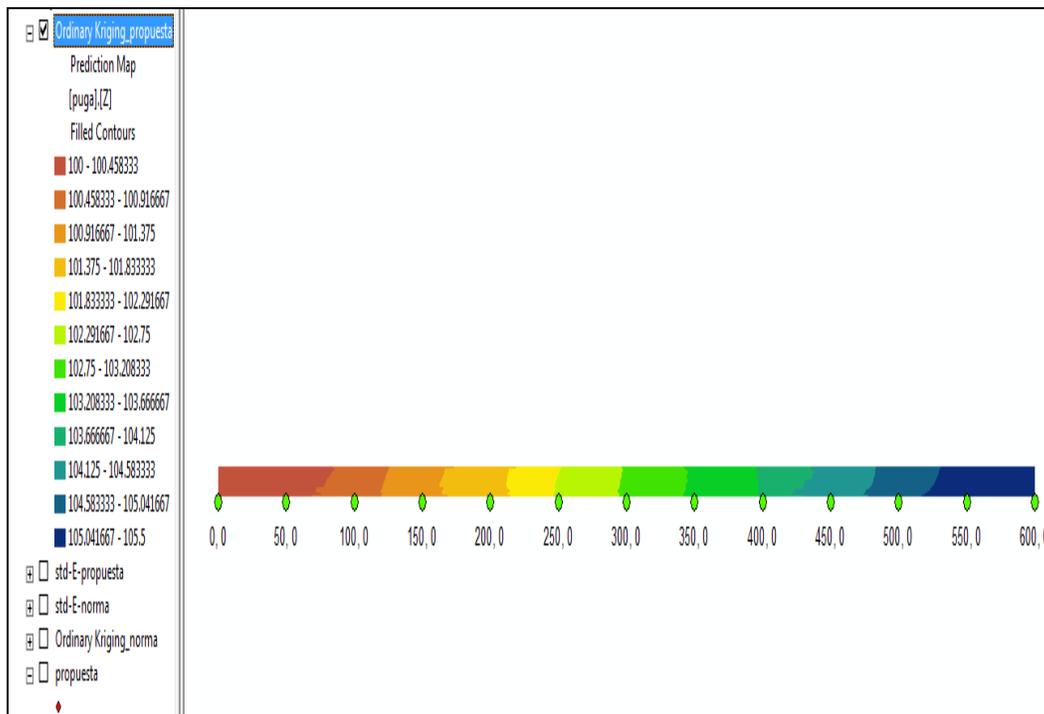
Octavo caso.

Tabla 8.30. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo: L= 600.00		Ancho del tramo: A= 11		Fecha:	
Km1: 0+000		Km2: 0+600							
Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba	A	B	Factor distancia longitudinal	Distancia transversal (m), dA	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km)	Distancia transversal al eje (m), dA'	Lado
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)	(a x s)	(b x A)	( Km <sub>n</sub> + dL)	(dA'-A/2)	
0	0+000								
1	0+050	50	0.09	0.465	4.5	5.115	0+004.50	-0.385	
2	0+100	50	0.978	0.99	48.9	10.89	0+098.90	5.39	
3	0+150	50	0.576	0.396	28.8	4.356	0+128.80	-1.144	
4	0+200	50	0.92	0.142	46	1.562	0+196.00	-3.938	
5	0+250	50	0.711	0.934	35.55	10.274	0+235.55	4.774	
6	0+300	50	0.123	0.187	6.15	2.057	0+256.15	-3.443	
7	0+350	50	0.141	0.4	7.05	4.4	0+307.05	-1.1	
8	0+400	50	0.806	0.199	40.3	2.189	0+390.30	-3.311	
9	0+450	50	0.179	0.901	8.95	9.911	0+408.95	4.411	
10	0+500	50	0.532	0.885	26.6	9.735	0+476.60	4.235	
11	0+550	50	0.105	0.599	5.25	6.589	0+505.25	1.089	
12	0+600	50	0.83	0.837	41.5	9.207	0+591.50	3.707	

**Tabla 8.31. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
4.50	5.115	100.0
98.90	10.890	100.5
128.80	4.356	101.0
196.00	1.562	101.5
235.55	10.274	102.0
256.15	2.057	102.5
307.05	4.400	103.0
390.30	2.189	103.5
408.95	9.911	104.0
476.60	9.735	104.5
505.25	6.589	105.0
591.50	9.207	105.5

**Figura 8.76. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**

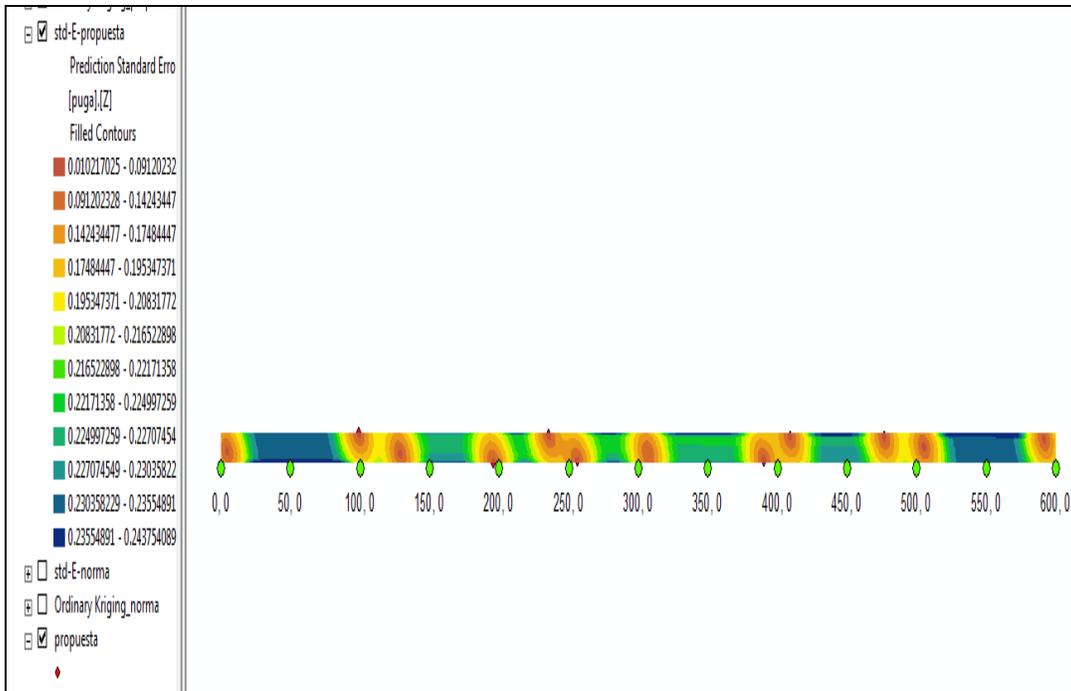


Figura 8.77. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

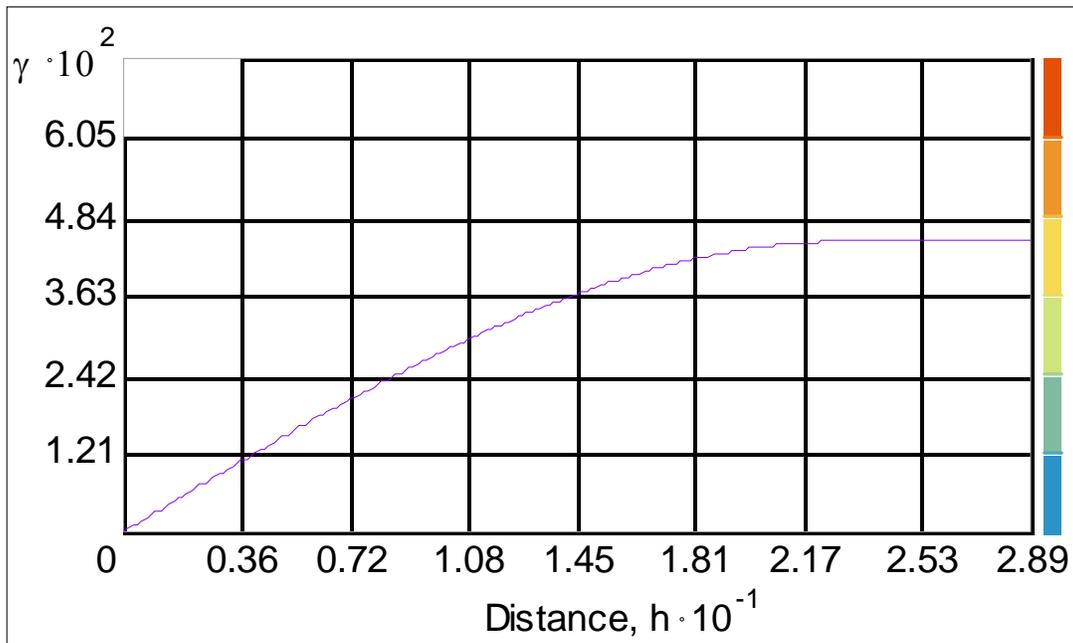


Figura 8.78. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

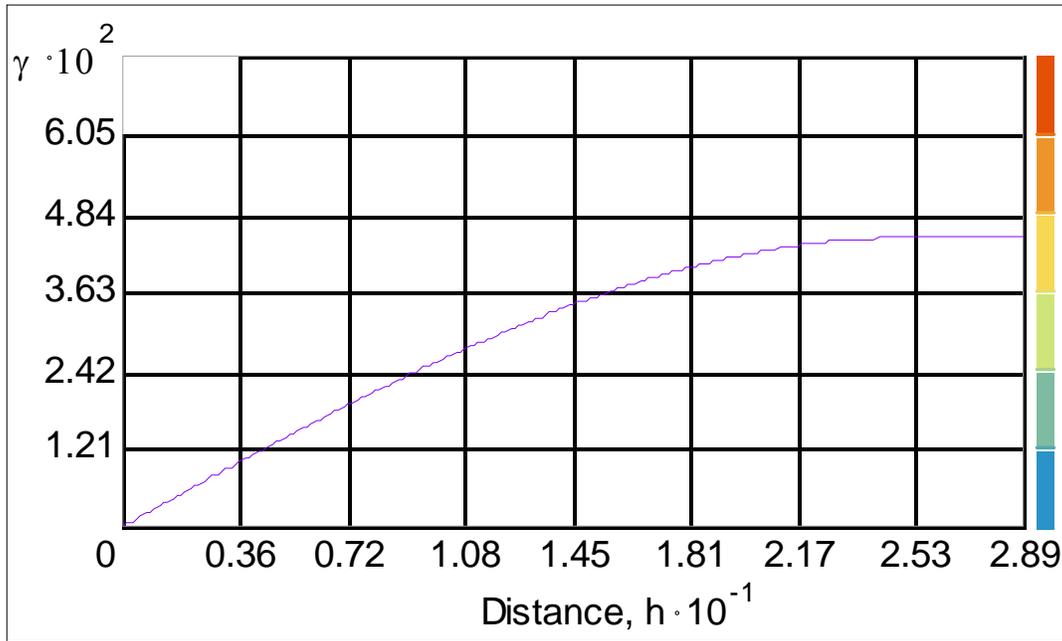


Figura 8.79. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

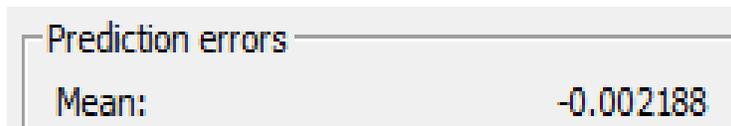


Figura 8.80. Resultado de la media del error de predicción.

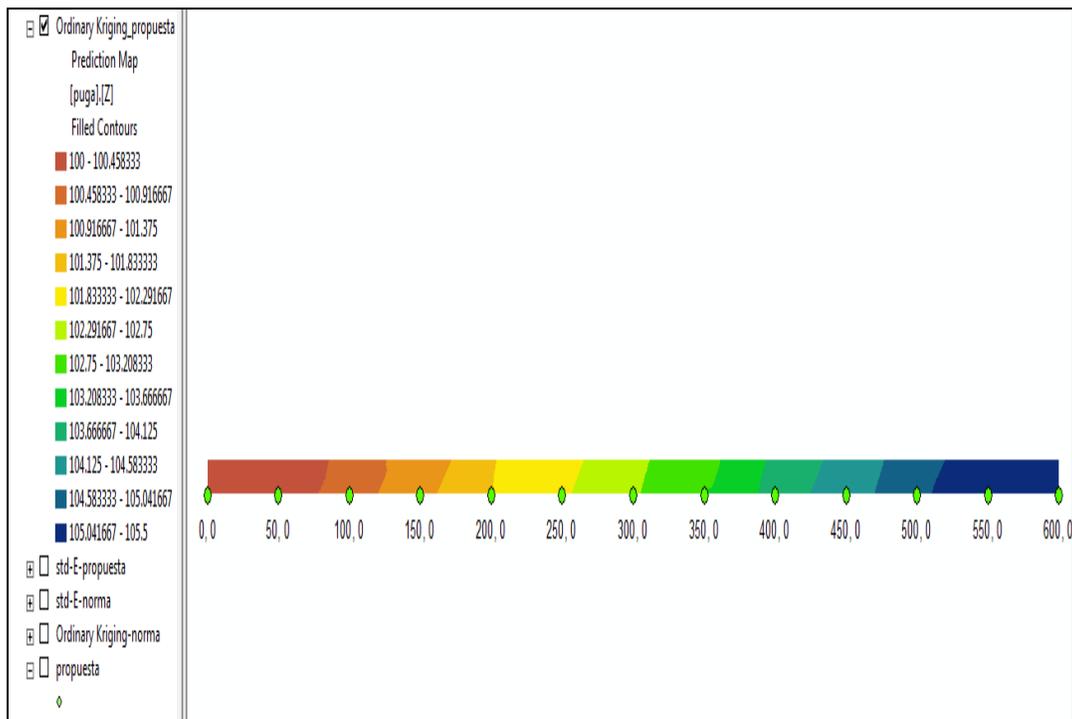
Noveno caso.

Tabla 8.32. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				9		Nº de pruebas:		12		Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 0+000			Cadenamiento al término del tramo	Km2: 0+600		Longitud del tramo: L= 600.00	Ancho del tramo		A= 11	
	Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba		A	B		Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)		Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) (Km <sub>n</sub> + dL)
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)							
0	0+000										
1	0+050	50	0.287	0.216	14.35	2.376	0+014.35	-3.124			
2	0+100	50	0.705	0.049	35.25	0.539	0+085.25	-4.961			
3	0+150	50	0.629	0.112	31.45	1.232	0+131.45	-4.268			
4	0+200	50	0.65	0.519	32.5	5.709	0+182.50	0.209			
5	0+250	50	0.205	0.767	10.25	8.437	0+210.25	2.937			
6	0+300	50	0.806	0.299	40.3	3.289	0+290.30	-2.211			
7	0+350	50	0.977	0.962	48.85	10.582	0+348.85	5.082			
8	0+400	50	0.564	0.089	28.2	0.979	0+378.20	-4.521			
9	0+450	50	0.102	0.159	5.1	1.749	0+405.10	-3.751			
10	0+500	50	0.328	0.457	16.4	5.027	0+466.40	-0.473			
11	0+550	50	0.23	0.715	11.5	7.865	0+511.50	2.365			
12	0+600	50	0.197	0.101	9.85	1.111	0+559.85	-4.389			

**Tabla 8.33. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
14.35	2.376	100.0
85.25	0.539	100.5
131.45	1.232	101.0
182.50	5.709	101.5
210.25	8.437	102.0
290.30	3.289	102.5
348.85	10.582	103.0
378.20	0.979	103.5
405.10	1.749	104.0
466.40	5.027	104.5
511.50	7.865	105.0
559.85	1.111	105.5

**Figura 8.81. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**

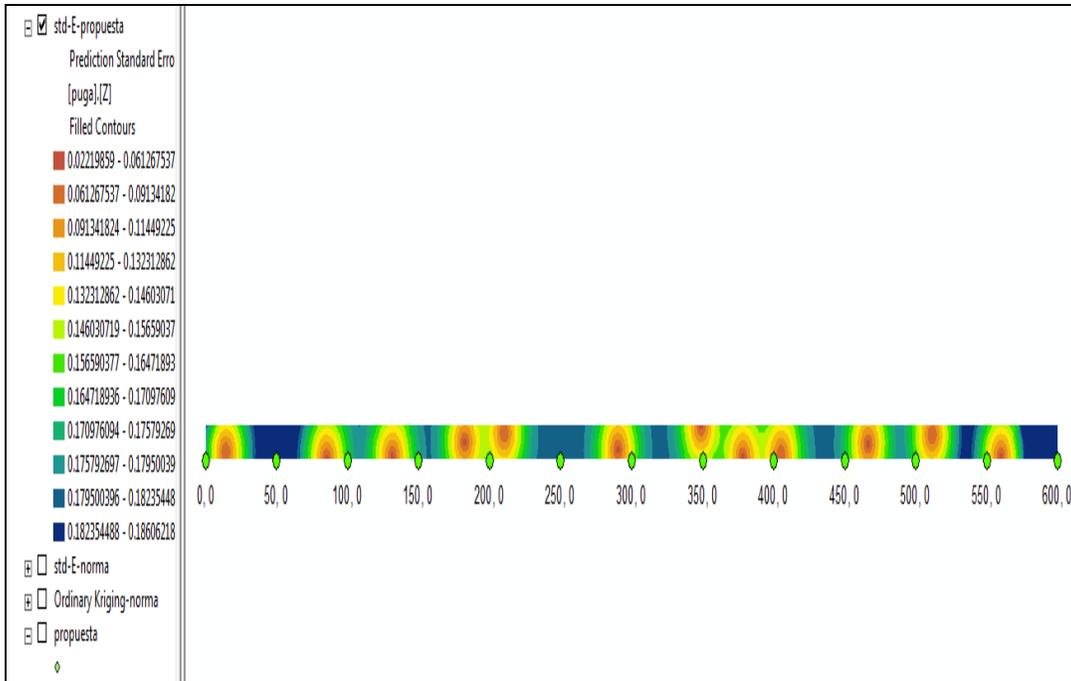


Figura 8.82. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

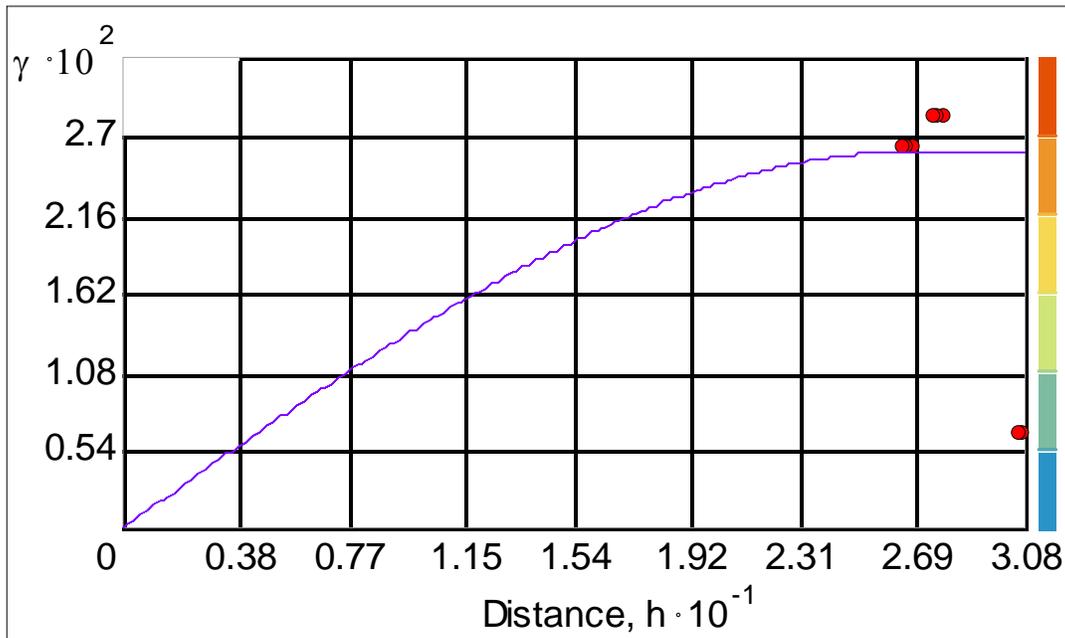


Figura 8.83. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

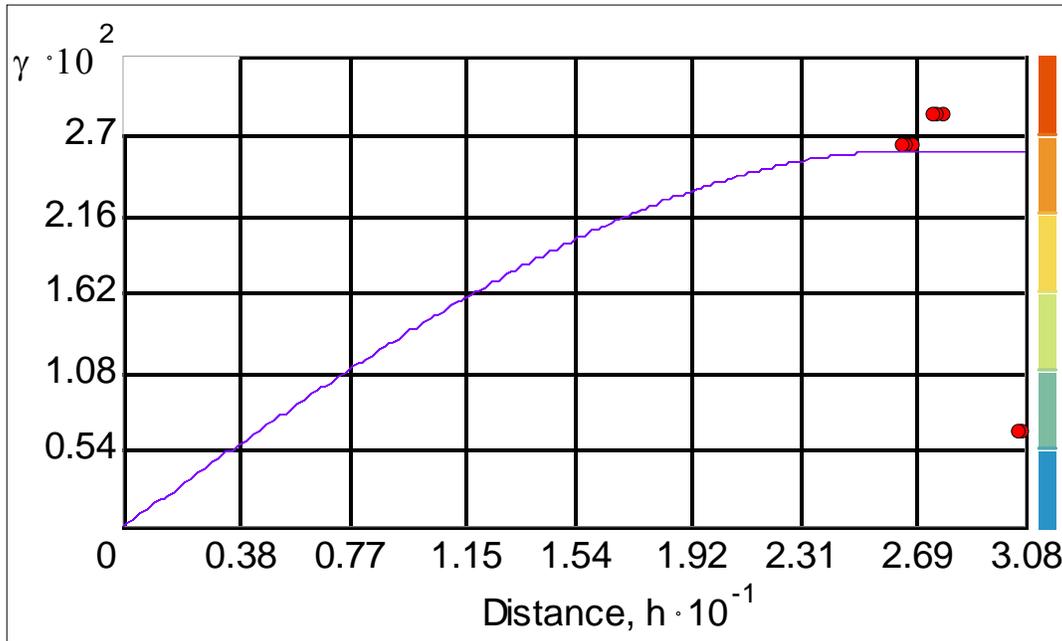


Figura 8.84. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

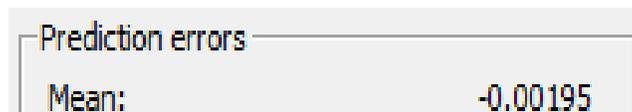


Figura 8.85. Resultado de la media del error de predicción.

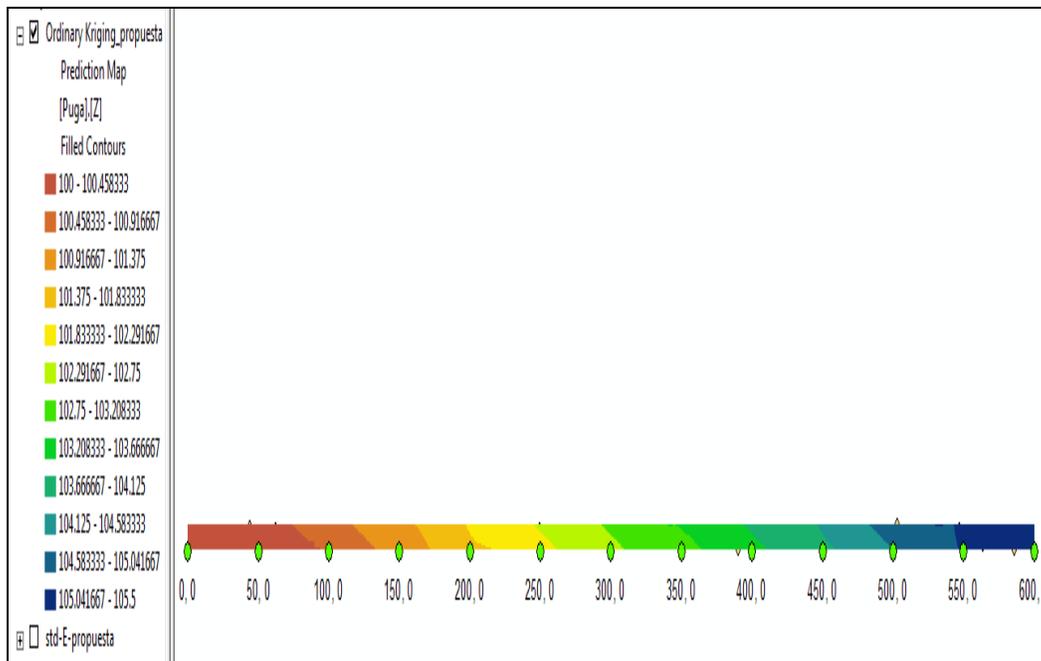
Décimo caso.

Tabla 8.34. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				10	Nº de pruebas:		12	Fecha:		
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 0+000			Km2: 0+600		Longitud del tramo: L= 600.00	Ancho del tramo	A=	11	
	Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba (Km <sub>s</sub> )	A (a)	B (b)					Factor distancia longitudinal (a x s)
0	0+000									
1	0+050	50	0.38	0.27	19	2.97	0+019.00	-2.53		
2	0+100	50	0.912	0.582	45.6	6.402	0+095.60	0.902		
3	0+150	50	0.939	0.162	46.95	1.782	0+146.95	-3.718		
4	0+200	50	0.485	0.321	24.25	3.531	0+174.25	-1.969		
5	0+250	50	0.104	0.576	5.2	6.336	0+205.20	0.836		
6	0+300	50	0.65	0.038	32.5	0.418	0+282.50	-5.082		
7	0+350	50	0.976	0.046	48.8	0.506	0+348.80	-4.994		
8	0+400	50	0.546	0.468	27.3	5.148	0+377.30	-0.352		
9	0+450	50	0.843	0.497	42.15	5.467	0+442.15	-0.033		
10	0+500	50	0.416	0.543	20.8	5.973	0+470.80	0.473		
11	0+550	50	0.838	0.675	41.9	7.425	0+541.90	1.925		
12	0+600	50	0.073	0.612	3.65	6.732	0+553.65	1.232		

**Tabla 8.35. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
19.00	2.970	100.0
95.60	6.402	100.5
146.95	1.782	101.0
174.25	3.531	101.5
205.20	6.336	102.0
282.50	0.418	102.5
348.80	0.506	103.0
377.30	5.148	103.5
442.15	5.467	104.0
470.80	5.973	104.5
541.90	7.425	105.0
553.65	6.732	105.5

**Figura 8.86. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.**

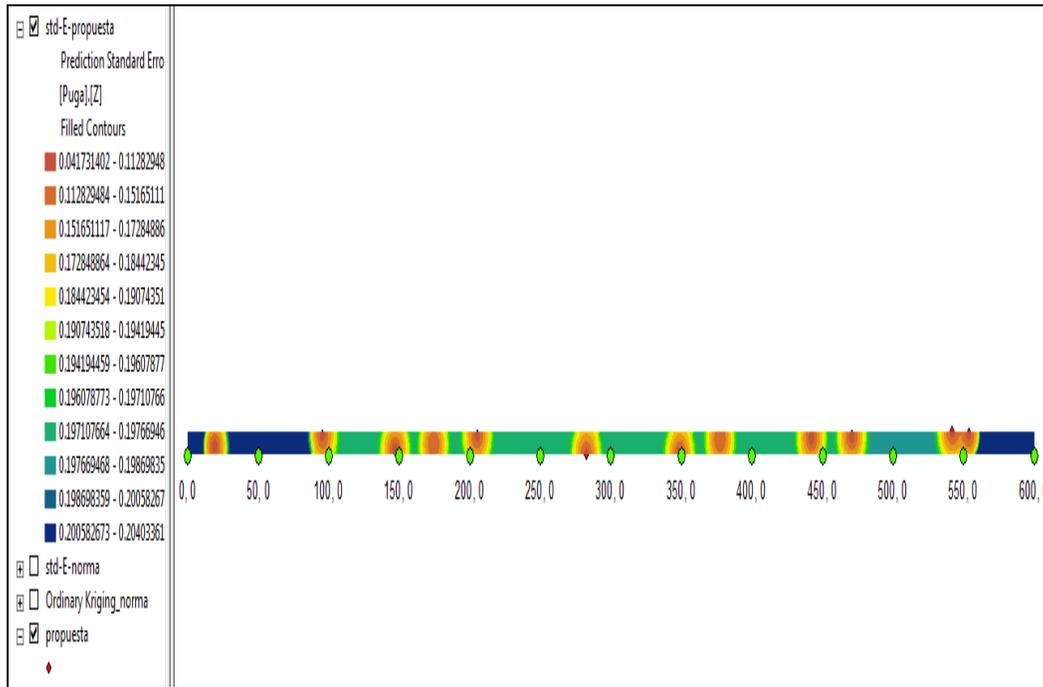


Figura 8.87. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.

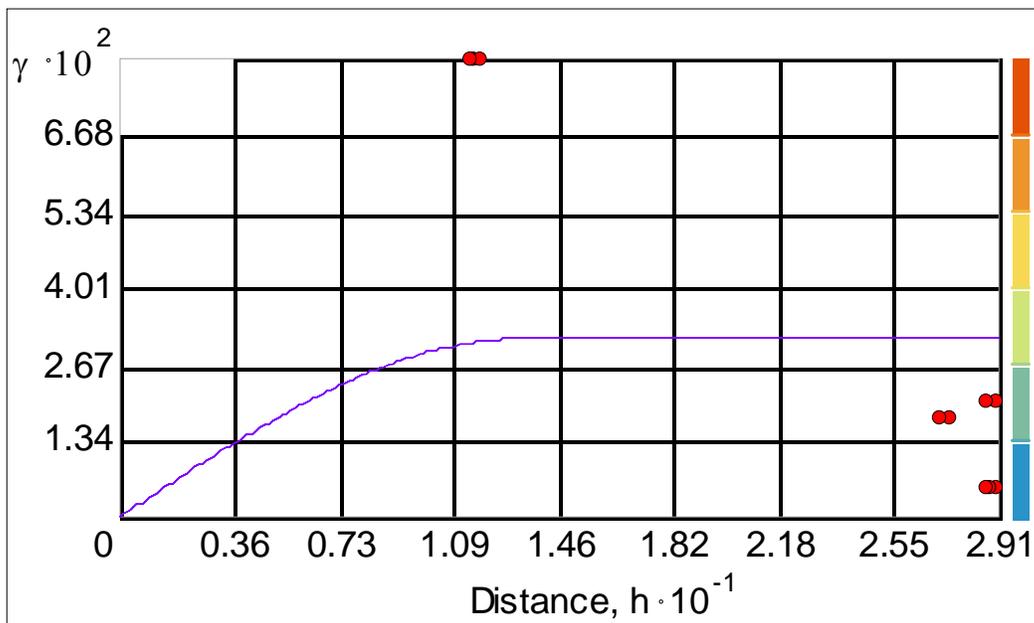


Figura 8.88. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido transversal.

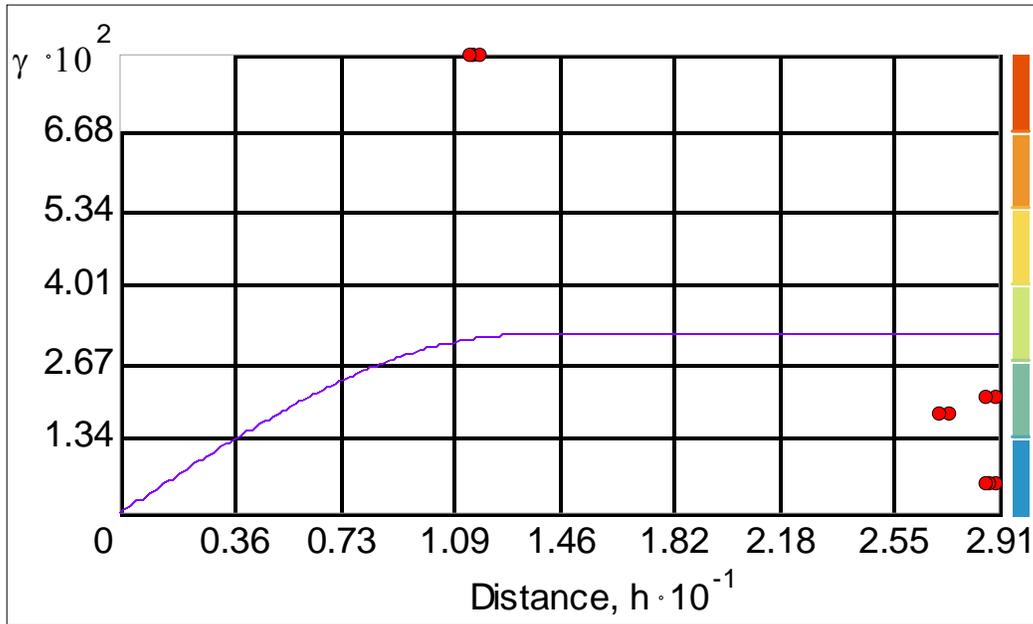


Figura 8.89. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.



Figura 8.90. Resultado de la media del error de predicción.

## 8.2 Tramo real.

Datos obtenidos, para cinco casos, de la selección del número, ubicación y resultados de los puntos de muestreo para el desarrollo y análisis superficies representadas por la Normativa y por la distribución propuesta, con valores reales del grado de compactación obtenidos de una sección de 600 metros de longitud y 3.60 metros de ancho de construcción de un tramo de subbase.

Tabla36. Parámetros estadísticos del atributo, en Normativa SCT y Propuesta.

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL ATRIBUTOS REALES	
N° de Datos	12
Valor mínimo	100.2
Valor máximo	101.7
Rango	1.5
Media	100.92
Mediana	100.95
Moda	101.1
Desviación estándar	0.47641337
Varianza	0.2269697
Coficiente de variación	0.0047193

### 8.2.1 Normativa.

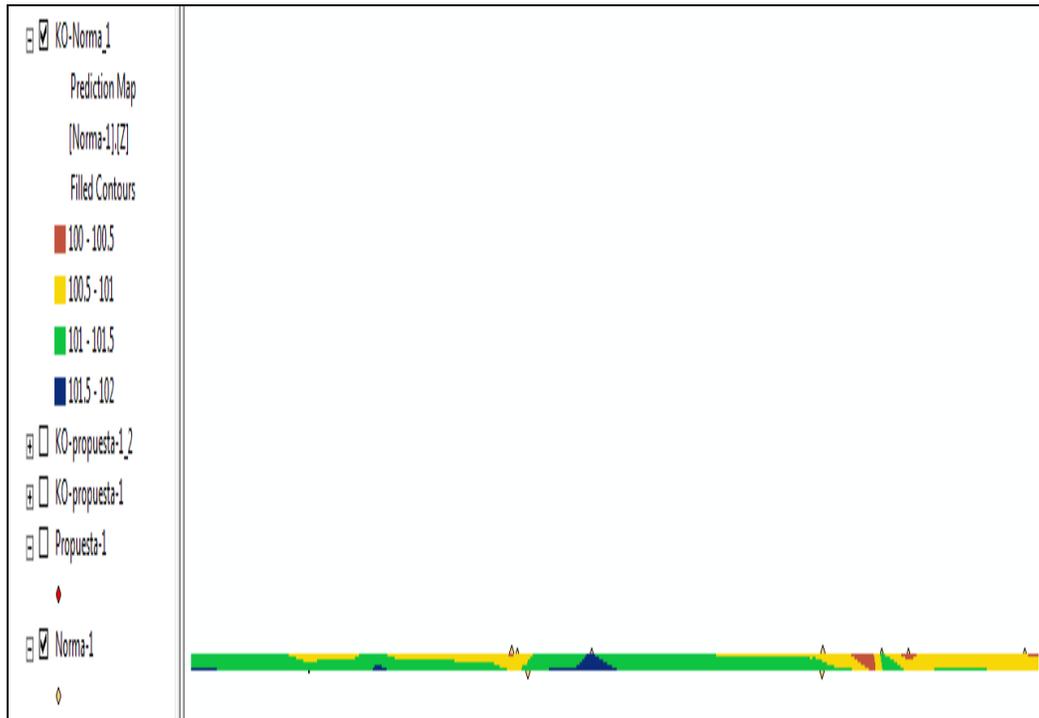
Primer caso.

Tabla 8.37. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				1	N° de pruebas:	12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 21+400	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 22+000	Longitud del tramo:	L = 600.00	Ancho del tramo	A =	3.6
N°	A	B	Distancia longitudinal (m), $dL$ (a x L)	Distancia transversal (m), $dA$ (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) ( Km1 + $dL$ )	Distancia transversal al eje (m), $dA'$ ( $dA-A/2$ )	Lado	
	(a)	(b)						
0								
1	0.473	0.738	283.8	2.6568	21+683.80	0.8568		
2	0.397	0.001	238.2	0.0036	21+638.20	-1.7964		
3	0.983	0.753	589.8	2.7108	21+989.80	0.9108		
4	0.745	0.967	447	3.4812	21+847.00	1.6812		
5	0.846	0.823	507.6	2.9628	21+907.60	1.1628		
6	0.378	0.989	226.8	3.5604	21+626.80	1.7604		
7	0.385	0.831	231	2.9916	21+631.00	1.1916		
8	0.139	0.262	83.4	0.9432	21+483.40	-0.8568		
9	0.802	0.491	481.2	1.7676	21+881.20	-0.0324		
10	0.815	0.814	489	2.9304	21+889.00	1.1304		
11	0.219	0.421	131.4	1.5156	21+531.40	-0.2844		
12	0.744	0.014	446.4	0.0504	21+846.40	-1.7496		

**Tabla 8.38. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
83.40	0.94	101.1
131.40	1.52	101.5
226.80	3.56	100.4
231.00	2.99	100.8
238.20	0.00	101.1
283.80	2.66	101.7
446.40	0.05	101.4
447.00	3.48	100.7
481.20	1.77	100.2
489.00	2.93	101.1
507.60	2.96	100.4
589.80	2.71	100.6



**Figura 8.91. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

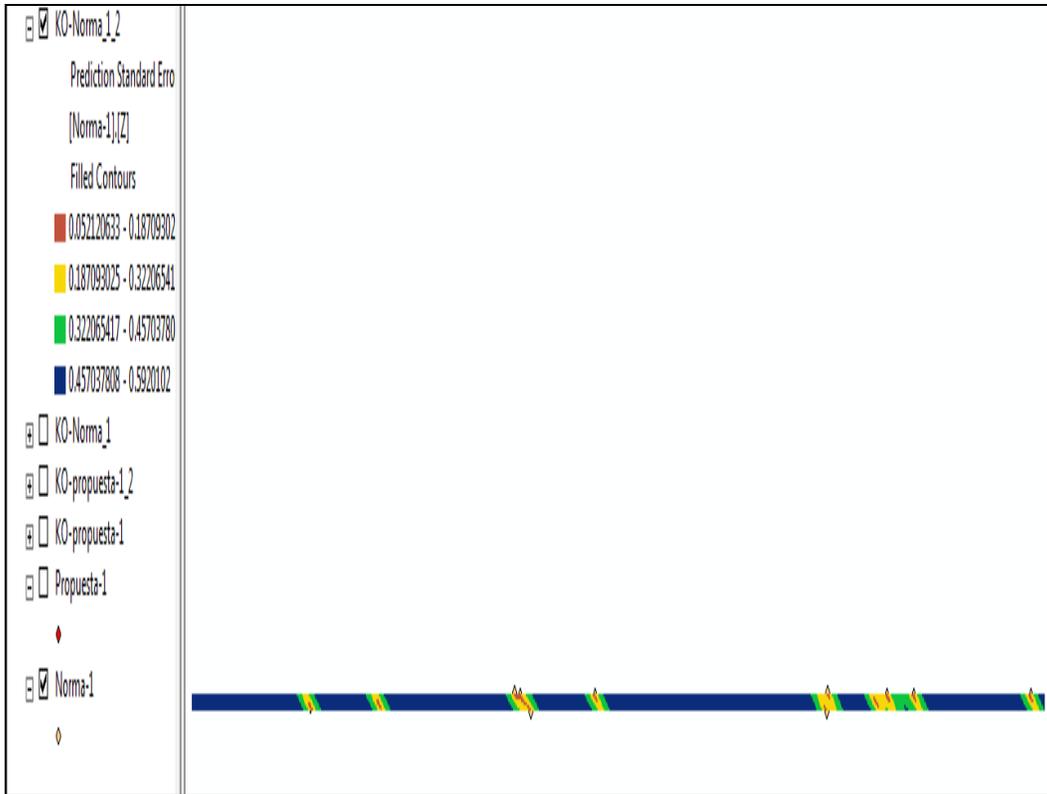


Figura 8.92. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

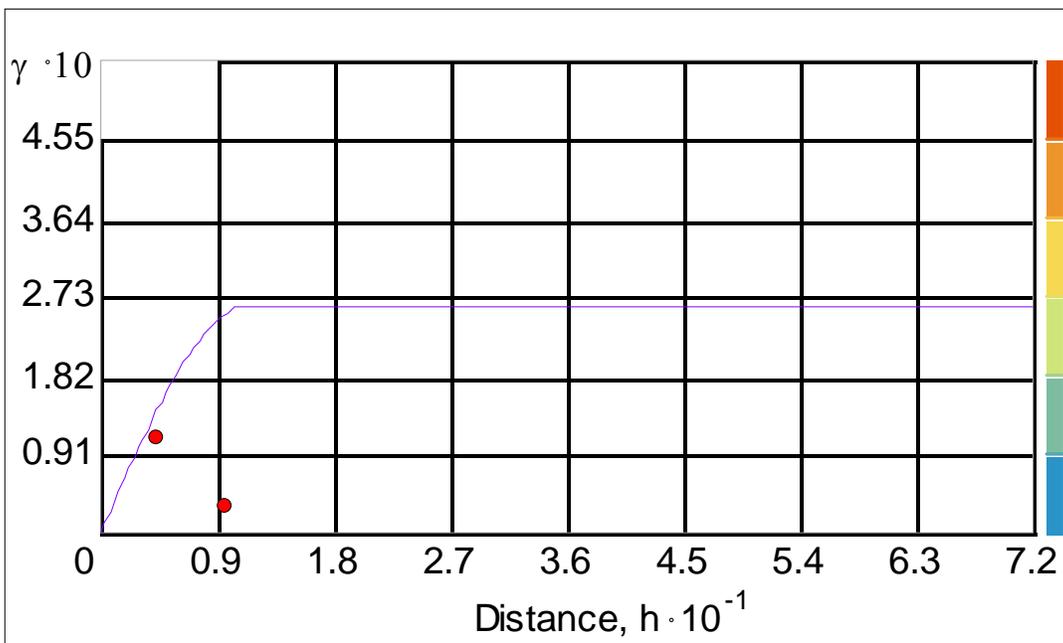


Figura 8.93. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

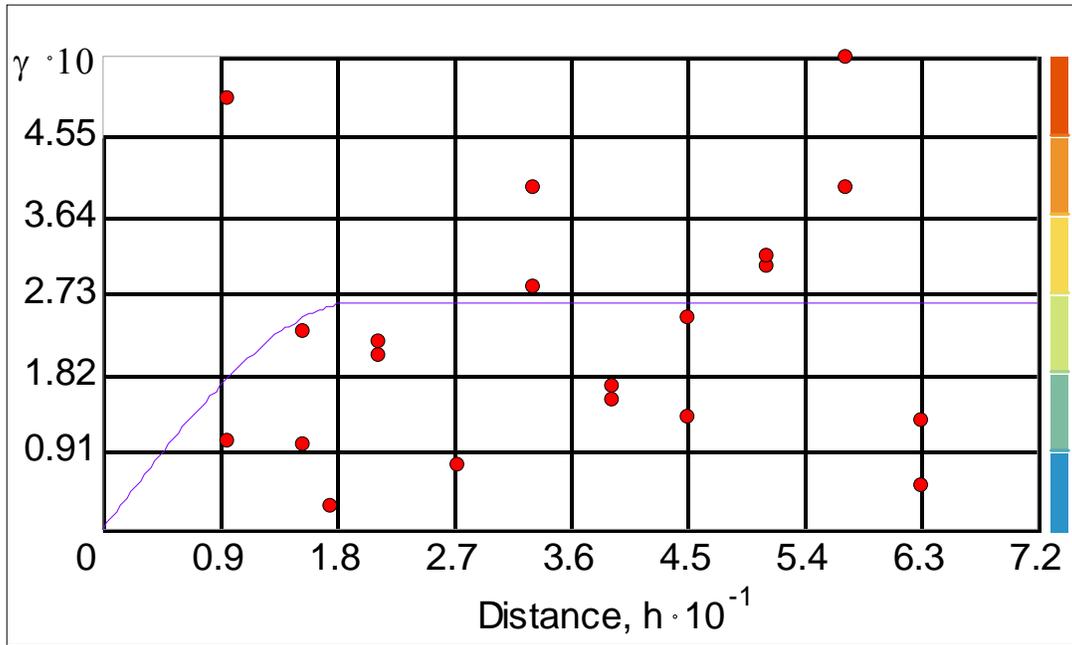


Figura 8.94. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.95. Resultado de la media del error de predicción.

## Segundo caso.

Tabla 8.39. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				3		Nº de pruebas:	12		Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 21+400	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 22+000	Longitud del tramo:	L= 600.00	Ancho del tramo	A=			
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), $dL$	Distancia transversal (m), $dA$	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km)	Distancia transversal al eje (m), $dA'$	Lado			
	(a)	(b)	(a x L)	(b x A)	( Km1 + $dL$ )	( $dA - A/2$ )				
0										
1	0.316	0.914	189.6	3.2904	21+589.60	1.4904				
2	0.731	0.648	438.6	2.3328	21+838.60	0.5328				
3	0.494	0.294	296.4	1.0584	21+696.40	-0.7416				
4	0.841	0.47	504.6	1.692	21+904.60	-0.108				
5	0.973	0.252	583.8	0.9072	21+983.80	-0.8928				
6	0.361	0.043	216.6	0.1548	21+616.60	-1.6452				
7	0.436	0.316	261.6	1.1376	21+661.60	-0.6624				
8	0.652	0.329	391.2	1.1844	21+791.20	-0.6156				
9	0.911	0.504	546.6	1.8144	21+946.60	0.0144				
10	0.064	0.893	38.4	3.2148	21+438.40	1.4148				
11	0.417	0.088	250.2	0.3168	21+650.20	-1.4832				
12	0.562	0.095	337.2	0.342	21+737.20	-1.458				

Tabla 8.40. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
38.40	3.2148	101.1
189.60	3.2904	101.7
216.60	0.1548	101.1
250.20	0.3168	101.4
261.60	1.1376	100.2
296.40	1.0584	100.8
337.2	0.342	101.5
391.20	1.1844	101.1
438.60	2.3328	100.7
504.60	1.692	100.4
546.60	1.8144	100.4
583.80	0.9072	100.6

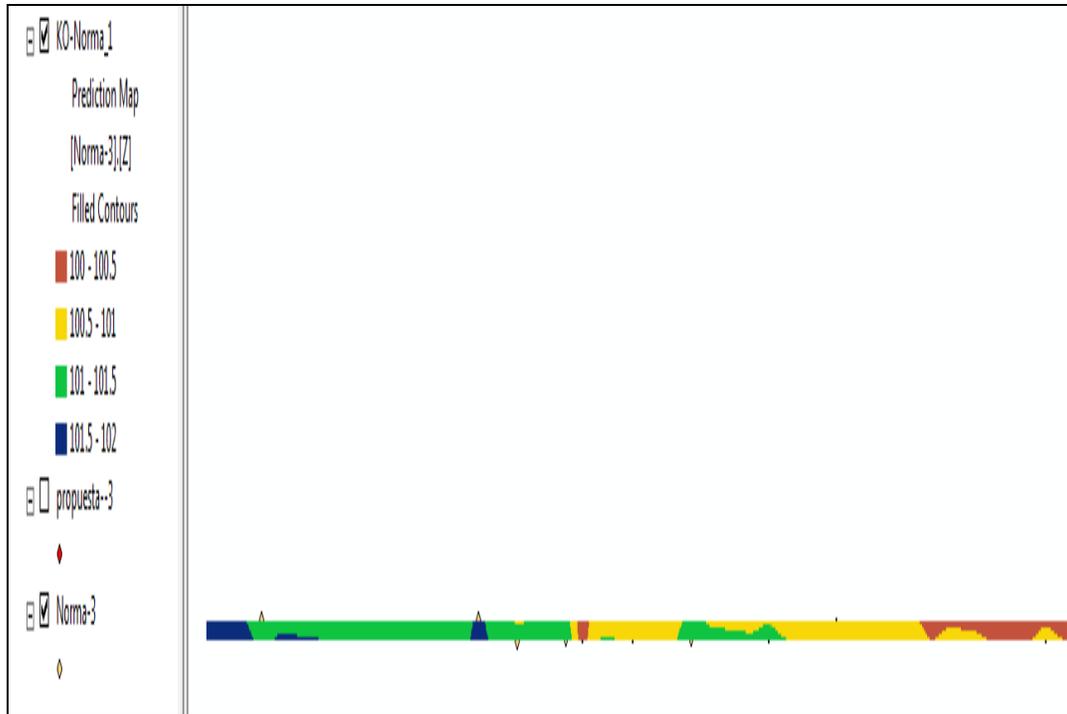


Figura 8.96. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

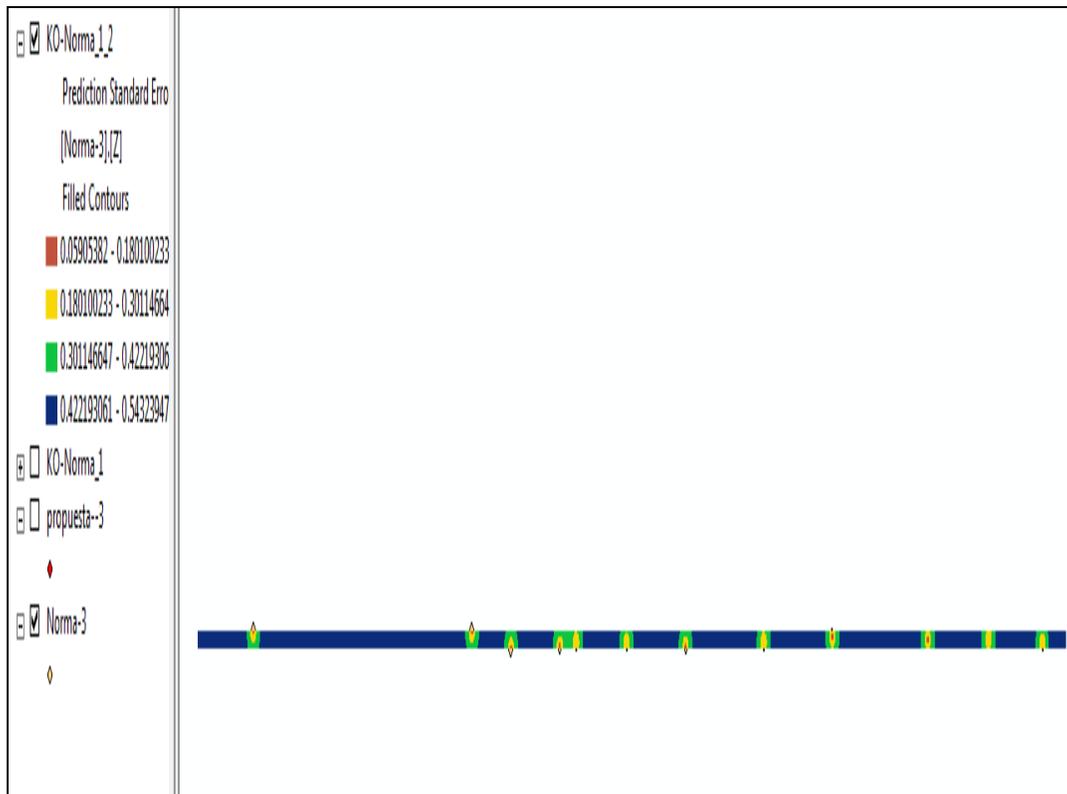


Figura 8.97. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

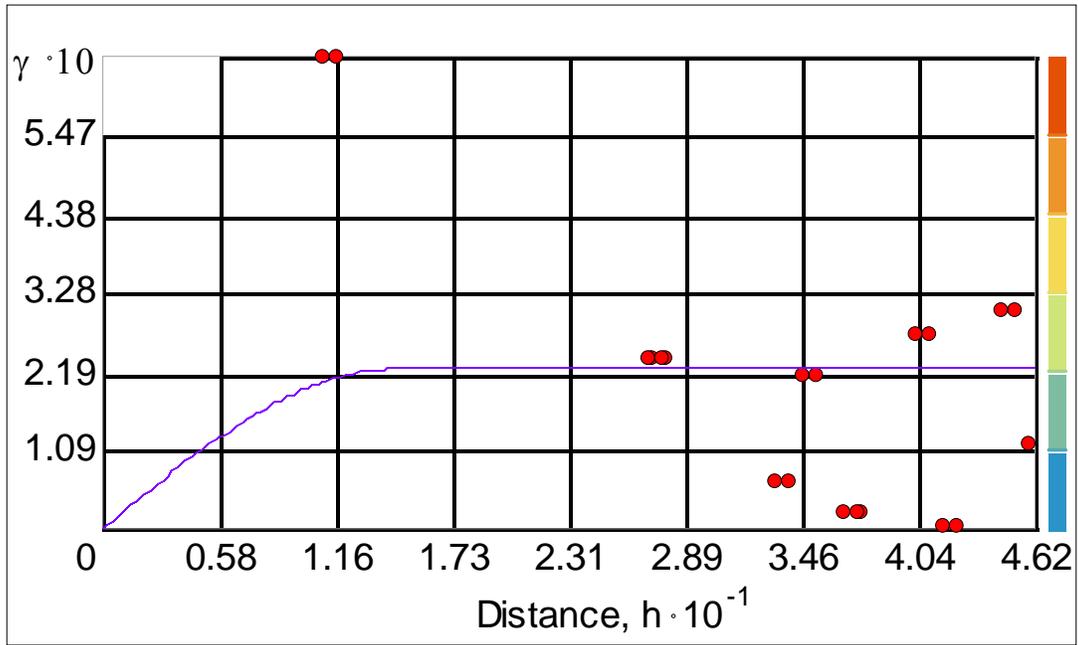


Figura 8.98. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

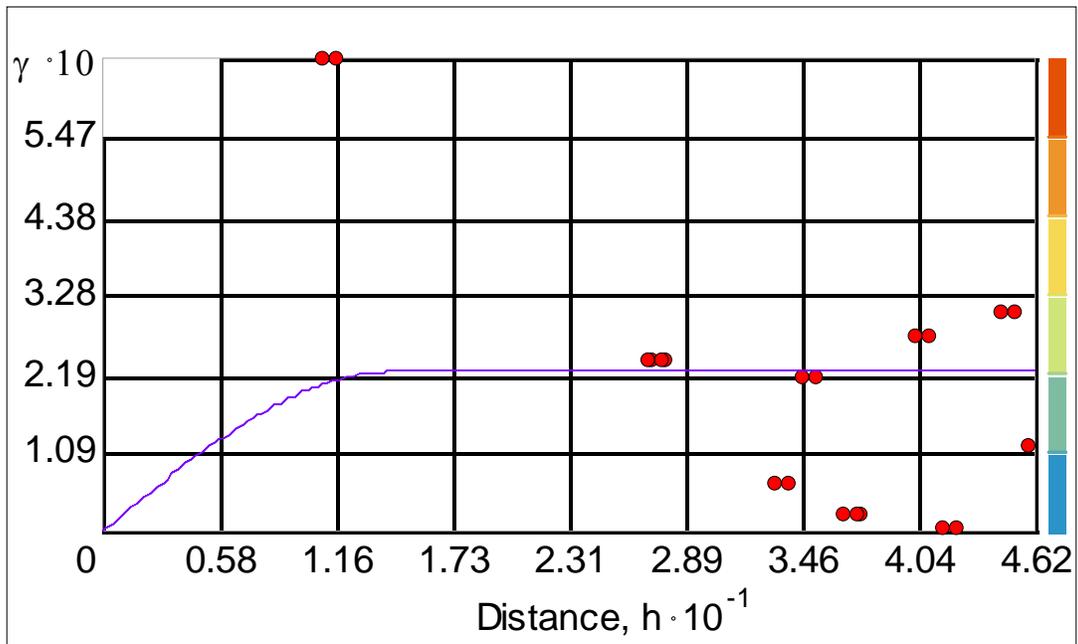


Figura 8.99. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.

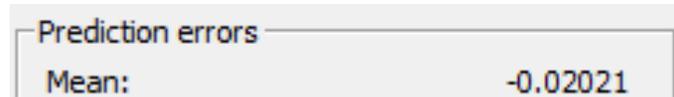


Figura 8.100. Resultado de la media del error de predicción.

Tercer caso.

Tabla 8.41. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				5	Nº de pruebas:	12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 21+400	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 22+000	Longitud del tramo:	L = 600.00	Ancho del tramo	A =	3.6
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), $dL$	Distancia transversal (m), $dA$	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km)	Distancia transversal al eje (m), $dA'$	Lado	
	(a)	(b)	(a x L)	(b x A)	( Km1 + $dL$ )	( $dA-A/2$ )		
0								
1	0.51	0.357	306	1.2852	21+706.00	-0.5148		
2	0.797	0.89	478.2	3.204	21+878.20	1.404		
3	0.165	0.658	99	2.3688	21+499.00	0.5688		
4	0.88	0.327	528	1.1772	21+928.00	-0.6228		
5	0.54	0.893	324	3.2148	21+724.00	1.4148		
6	0.24	0.323	144	1.1628	21+544.00	-0.6372		
7	0.128	0.157	76.8	0.5652	21+476.80	-1.2348		
8	0.61	0.29	366	1.044	21+766.00	-0.756		
9	0.919	0.002	551.4	0.0072	21+951.40	-1.7928		
10	0.809	0.534	485.4	1.9224	21+885.40	0.1224		
11	0.259	0.182	155.4	0.6552	21+555.40	-1.1448		
12	0.467	0.78	280.2	2.808	21+680.20	1.008		

Tabla 8.42. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
76.80	0.5652	101.1
99.00	2.3688	100.4
144.00	1.1628	100.2
155.40	0.6552	100.4
280.2	2.808	101.4
306.00	1.2852	100.7
324.00	3.2148	101.1
366.00	1.044	101.1
478.20	3.204	100.8
485.40	1.9224	101.7
528.00	1.1772	101.5
551.40	0.0072	100.6

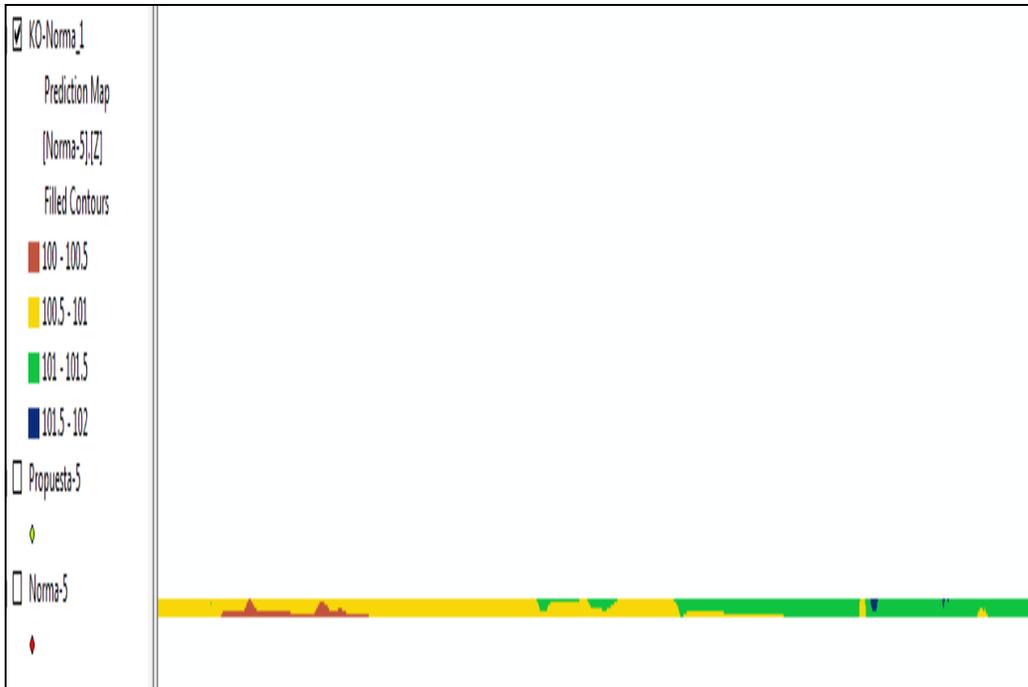


Figura 8.101. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

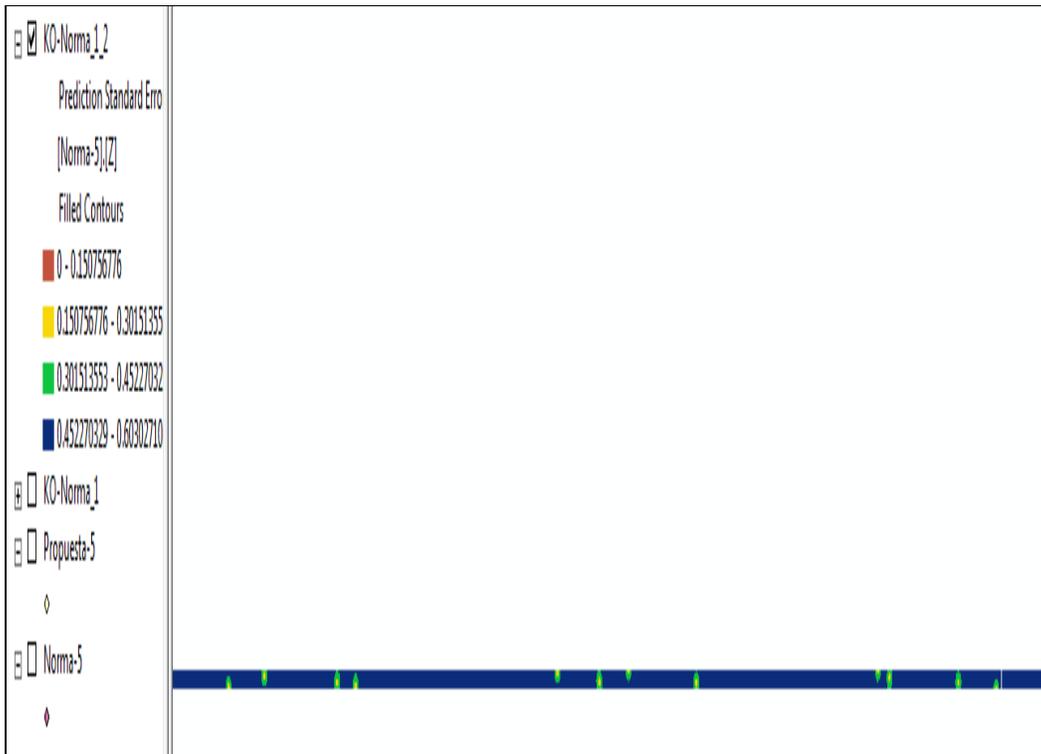


Figura 8.102. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

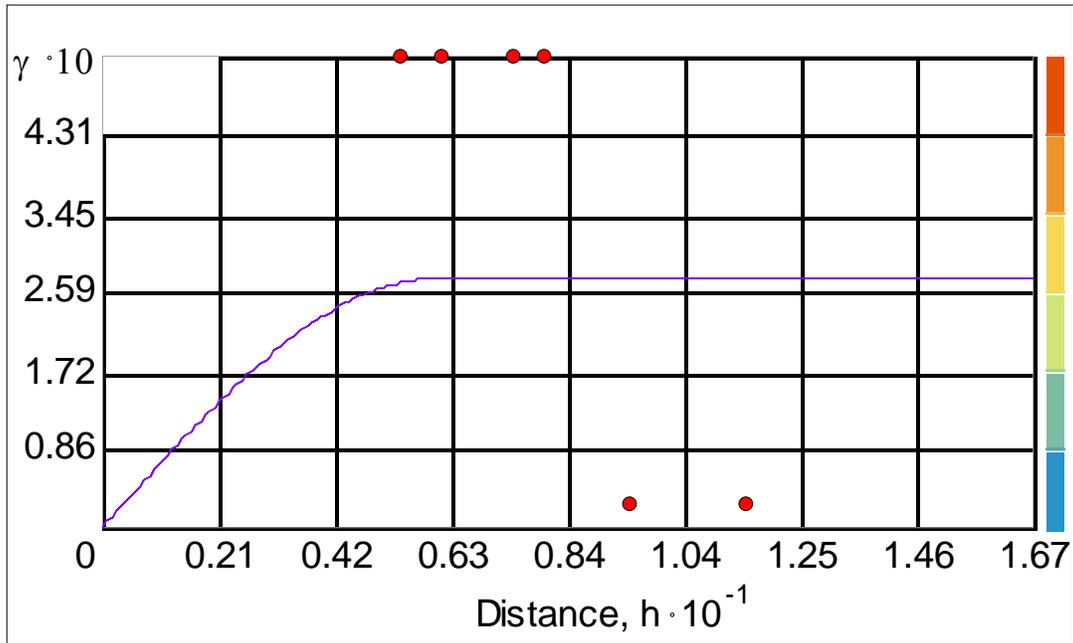


Figura 8.103. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

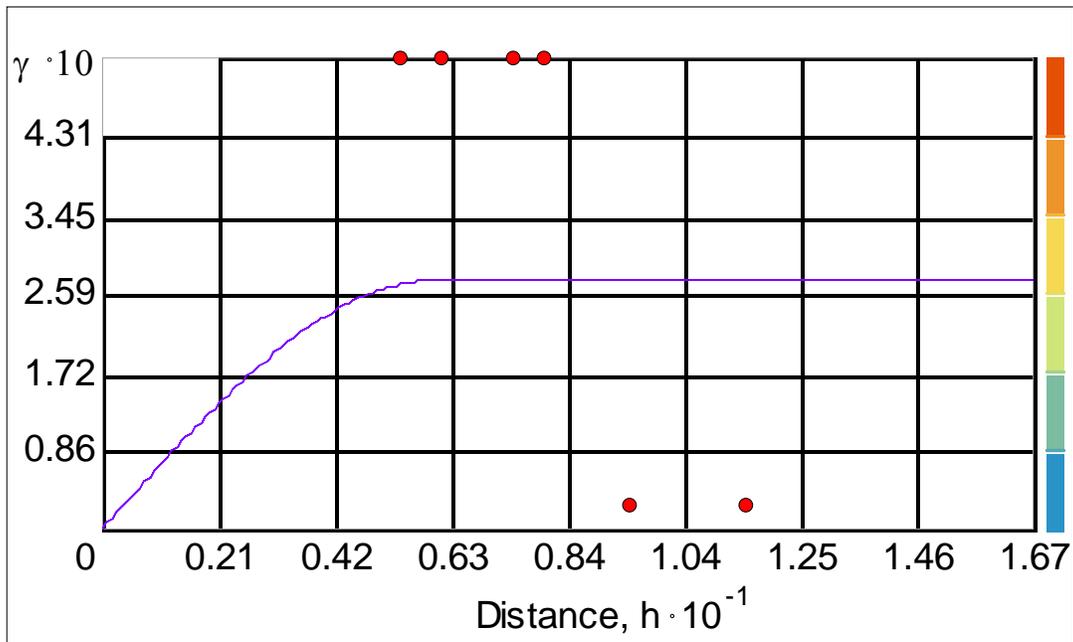


Figura 8.104. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.105. Resultado de la media del error de predicción.

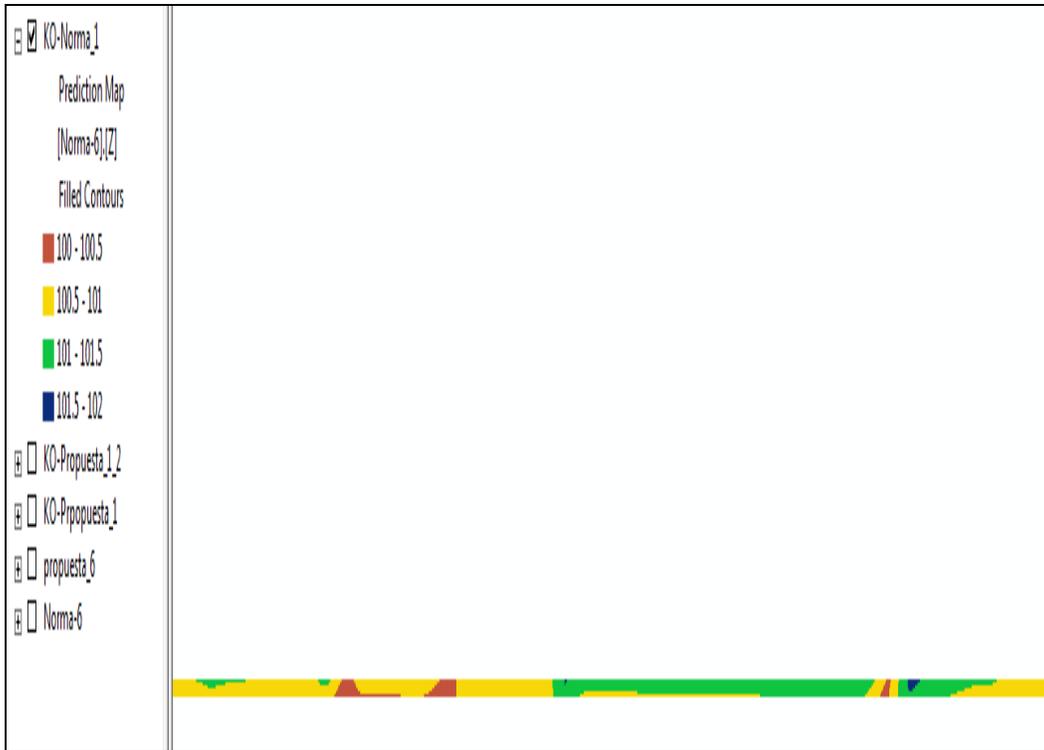
Cuarto caso.

Tabla 8.43. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

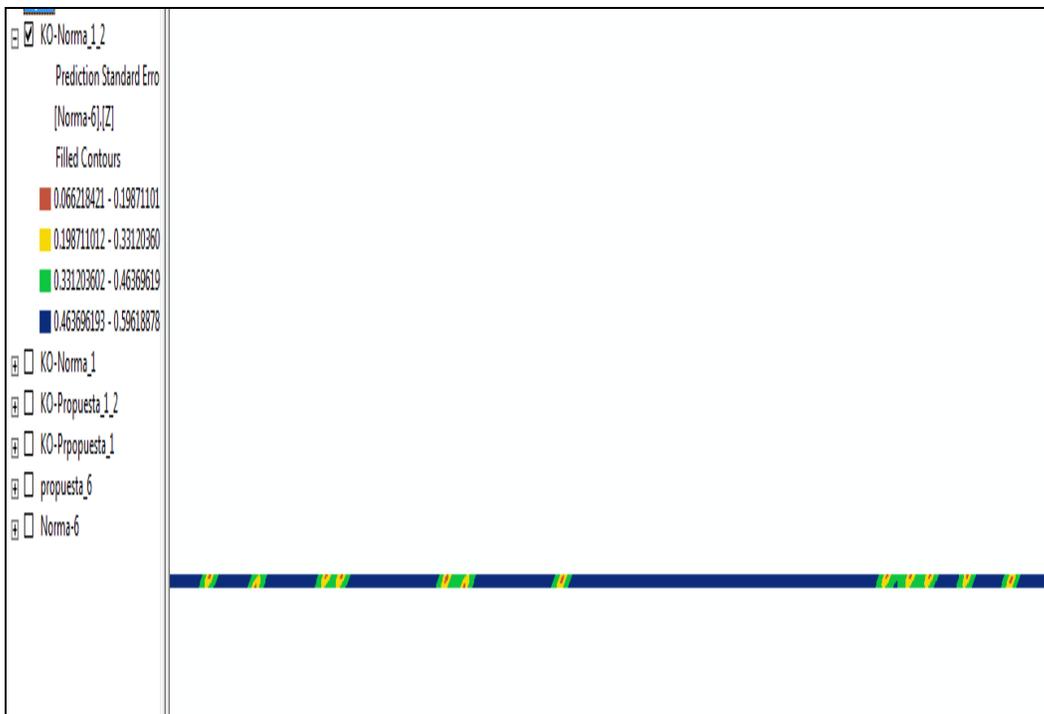
Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				6	Nº de pruebas:	12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 21+400	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 22+000	Longitud del tramo:	L = 600.00	Ancho del tramo	A =	3.6
	(a)	(b)						
0								
1	0.175	0.097	105	0.3492	21+505.00	-1.4508		
2	0.26	0.898	156	3.2328	21+556.00	1.4328		
3	0.816	0.872	489.6	3.1392	21+889.60	1.3392		
4	0.475	0.603	285	2.1708	21+685.00	0.3708		
5	0.362	0.655	217.2	2.358	21+617.20	0.558		
6	0.245	0.925	147	3.33	21+547.00	1.53		
7	0.835	0.925	501	3.33	21+901.00	1.53		
8	0.872	0.932	523.2	3.3552	21+923.20	1.5552		
9	0.379	0.118	227.4	0.4248	21+627.40	-1.3752		
10	0.131	0.876	78.6	3.1536	21+478.60	1.3536		
11	0.793	0.904	475.8	3.2544	21+875.80	1.4544		
12	0.914	0.582	548.4	2.0952	21+948.40	0.2952		

Tabla 8.44. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
78.60	3.15	101.1
105.00	0.35	100.7
147.00	3.33	101.1
156.00	3.23	100.4
217.20	2.36	100.2
227.40	0.42	100.8
285.00	2.17	101.5
475.80	3.25	100.4
489.60	3.14	101.7
501.00	3.33	101.4
523.20	3.36	101.1
548.40	2.10	100.6



**Figura 8.106.** Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.



**Figura 8.107.** Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.

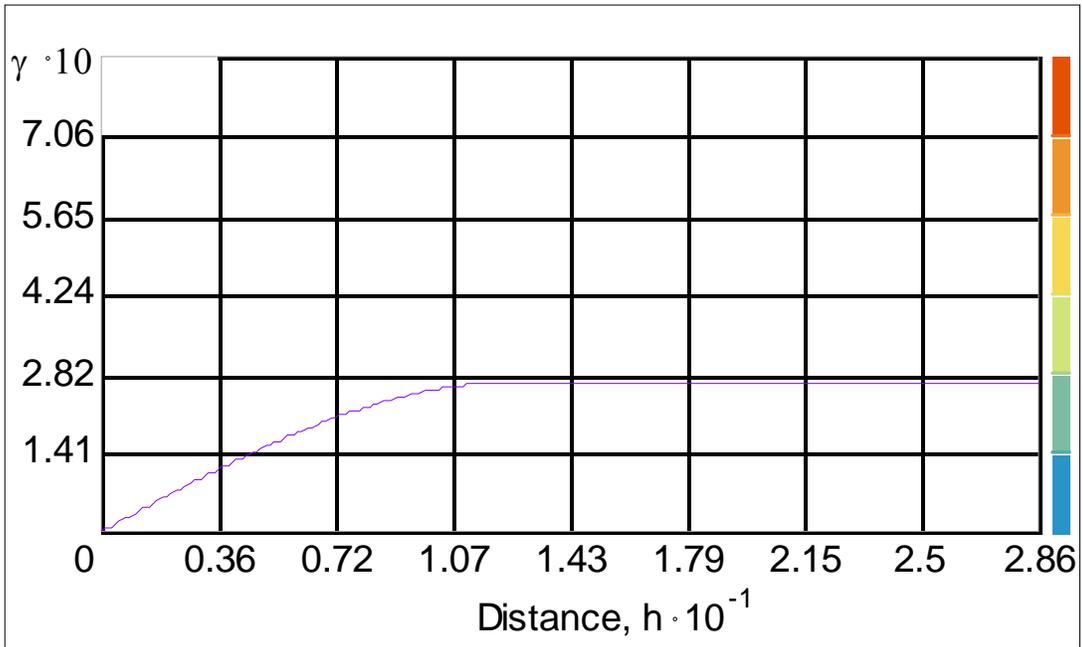


Figura 8.108. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

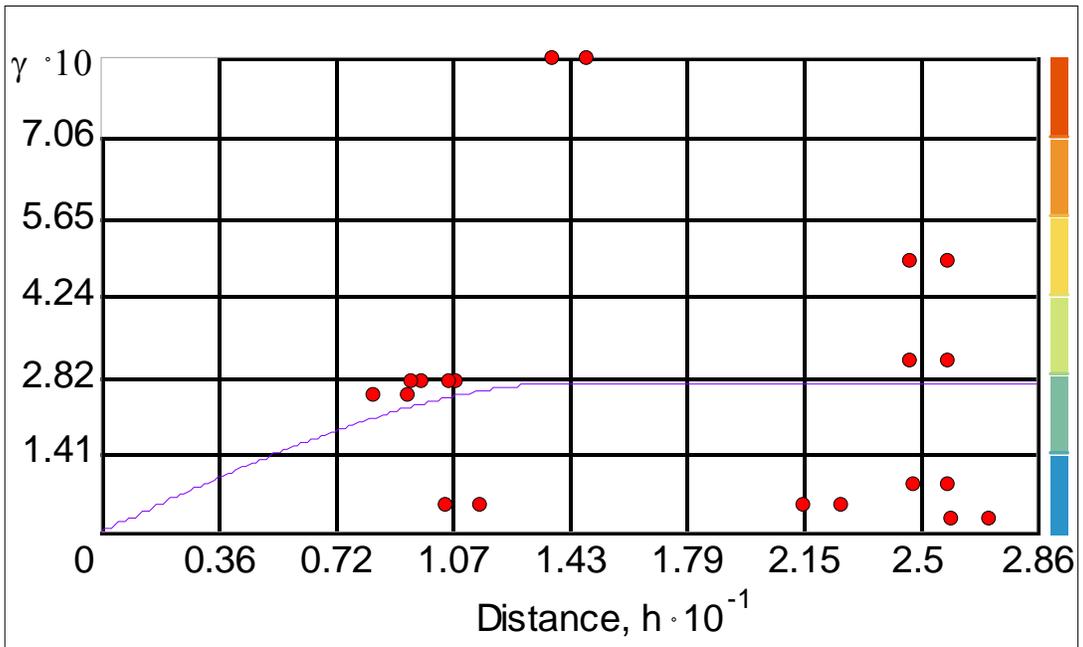


Figura 8.109. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.110. Resultado de la media del error de predicción.

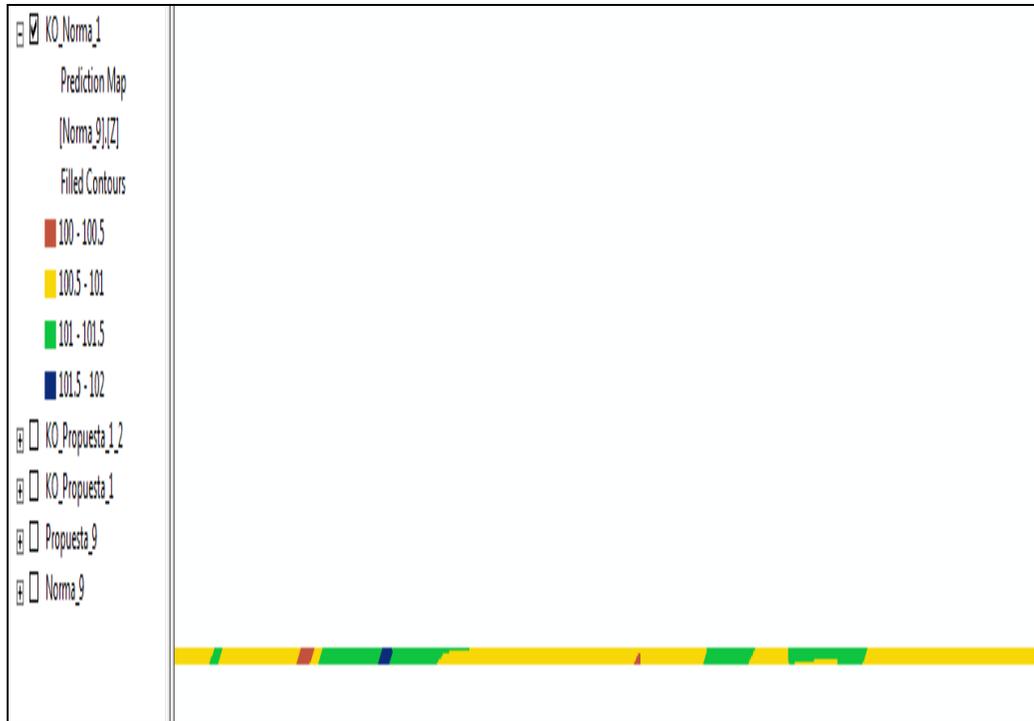
Quinto caso.

Tabla 8.45. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según Normativa SCT.

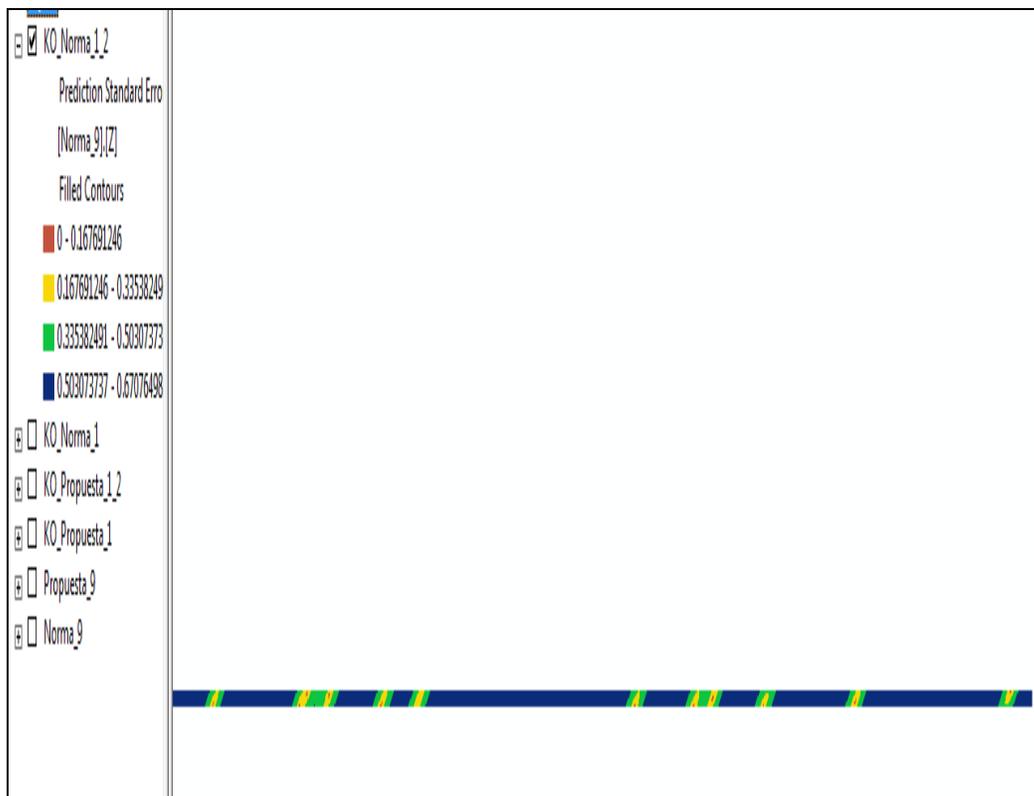
Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				9	Nº de pruebas:	12	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 21+400	Cadenamiento al término del tramo	Km2: 22+000	Longitud del tramo:	L = 600.00	Ancho del tramo	A = 3.6	
Nº	A	B	Distancia longitudinal (m), $dL$ (a x L)	Distancia transversal (m), $dA$ (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado (Km) (Km1 + $dL$ )	Distancia transversal al eje (m), $dA'$ ( $dA - A/2$ )	Lado	
	(a)	(b)						
0								
1	0.287	0.216	172.2	0.7776	21+572.20	-1.0224		
2	0.705	0.049	423	0.1764	21+823.00	-1.6236		
3	0.629	0.112	377.4	0.4032	21+777.40	-1.3968		
4	0.65	0.519	390	1.8684	21+790.00	0.0684		
5	0.205	0.767	123	2.7612	21+523.00	0.9612		
6	0.806	0.299	483.6	1.0764	21+883.60	-0.7236		
7	0.977	0.962	586.2	3.4632	21+986.20	1.6632		
8	0.564	0.089	338.4	0.3204	21+738.40	-1.4796		
9	0.102	0.159	61.2	0.5724	21+461.20	-1.2276		
10	0.328	0.457	196.8	1.6452	21+596.80	-0.1548		
11	0.23	0.715	138	2.574	21+538.00	0.774		
12	0.197	0.101	118.2	0.3636	21+518.20	-1.4364		

Tabla 8.46. Distribución del muestreo establecido al aplicar la Normativa, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
61.20	0.5724	101.1
118.20	0.3636	100.4
123.00	2.7612	100.2
138.00	2.574	101.4
172.20	0.7776	101.7
196.80	1.6452	101.1
338.40	0.3204	100.4
377.40	0.4032	100.7
390.00	1.8684	101.5
423.00	0.1764	100.8
483.60	1.0764	101.1
586.20	3.4632	100.6



**Figura 8.111. Mapa de la superficie, compactada del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**



**Figura 8.112. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo según Normativa SCT. Analizada con Geoestadística.**

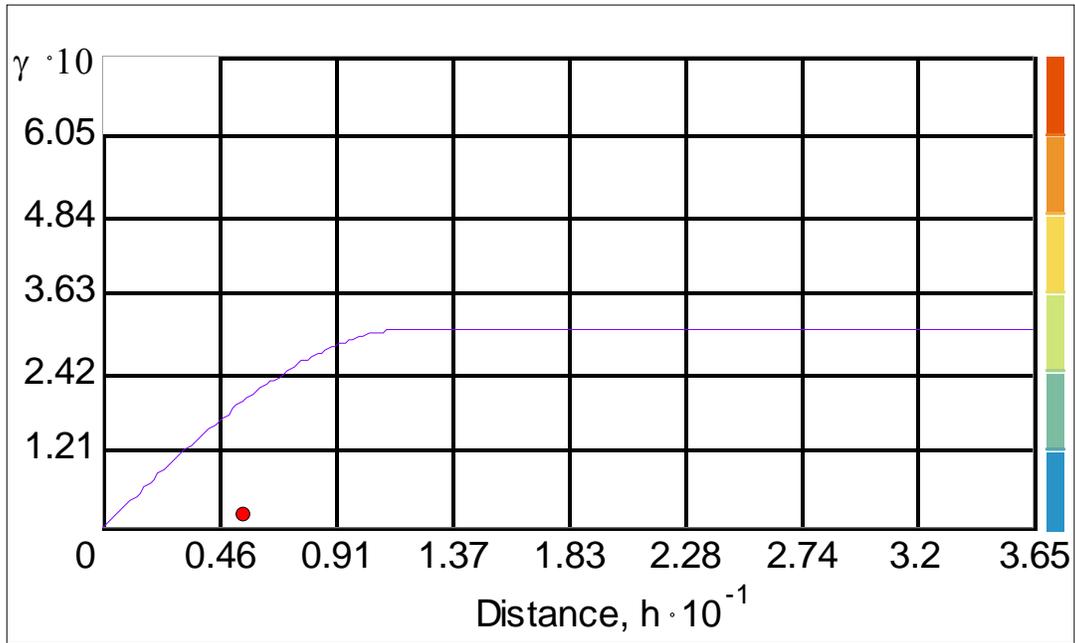


Figura 8.113. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido transversal.

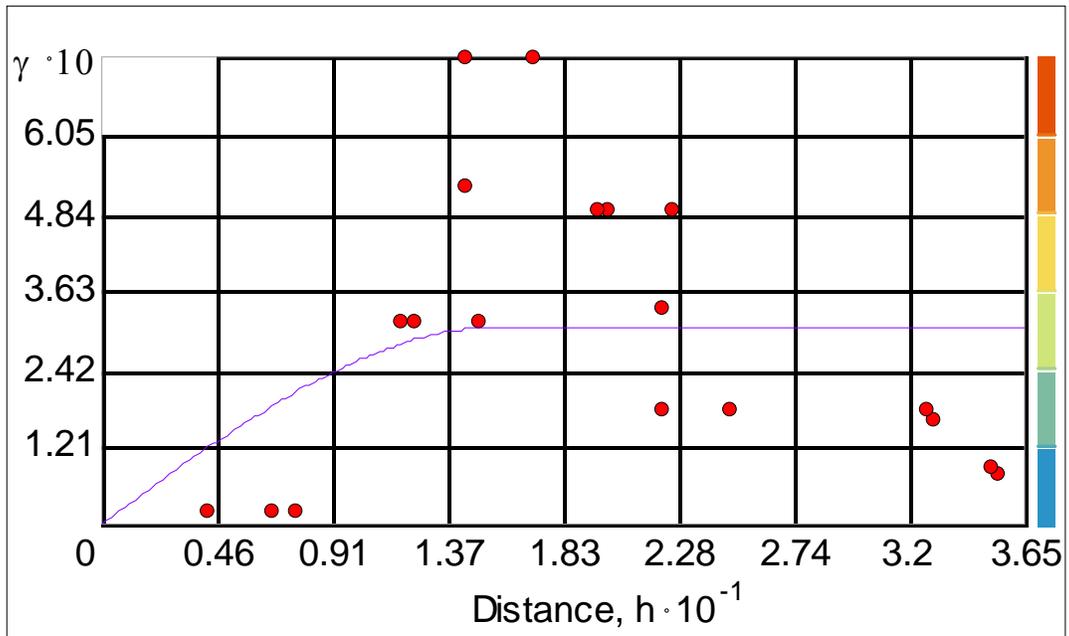


Figura 8.114. Variograma de la superficie del muestreo según Normativa SCT, en sentido longitudinal.



Figura 8.115. Resultado de la media del error de predicción.

## 8.2.2 Muestreo Propuesto.

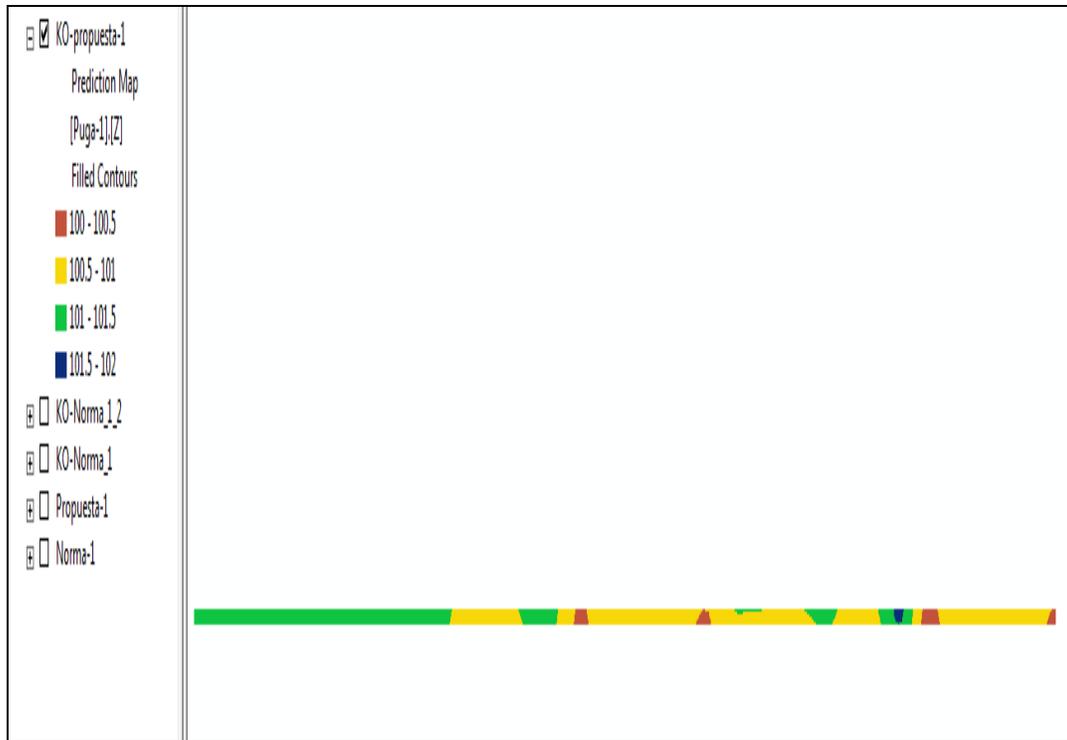
Primer caso.

Tabla 8.47. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

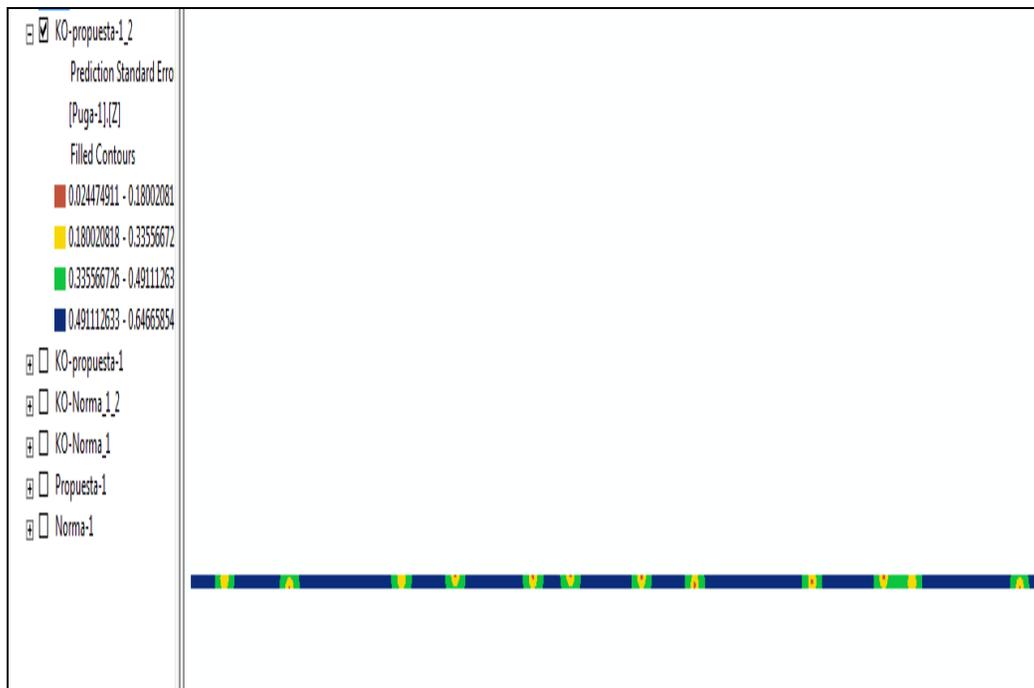
Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:	Ancho del tramo	Fecha:			
Km1: 21+400		Km2: 22+000		L= 600.00	A=	3.6			
Nº	cadenamiento acumulado (Km) (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	A (a)	B (b)	Distancia longitudinal (m), dL (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) (Km <sub>n</sub> + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA-A/2)	Lado
0	21+400								
1	21+450	50	0.473	0.738	23.65	2.6568	21+423.65	0.8568	
2	21+500	50	0.397	0.001	19.85	0.0036	21+469.85	-1.7964	
3	21+550	50	0.983	0.753	49.15	2.7108	21+549.15	0.9108	
4	21+600	50	0.745	0.967	37.25	3.4812	21+587.25	1.6812	
5	21+650	50	0.846	0.823	42.3	2.9628	21+642.30	1.1628	
6	21+700	50	0.378	0.989	18.9	3.5604	21+668.90	1.7604	
7	21+750	50	0.385	0.831	19.25	2.9916	21+719.25	1.1916	
8	21+800	50	0.139	0.262	6.95	0.9432	21+756.95	-0.8568	
9	21+850	50	0.802	0.491	40.1	1.7676	21+840.10	-0.0324	
10	21+900	50	0.815	0.814	40.75	2.9304	21+890.75	1.1304	
11	21+950	50	0.219	0.421	10.95	1.5156	21+910.95	-0.2844	
12	22+000	50	0.744	0.014	37.2	0.0504	21+987.20	-1.7496	

Tabla 8.48. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
23.65	2.66	101.1
69.85	0.00	101.4
149.15	2.71	101.1
187.25	3.48	100.8
242.30	2.96	101.5
268.90	3.56	100.4
319.25	2.99	100.7
356.95	0.94	100.4
440.10	1.77	101.1
490.75	2.93	101.7
510.95	1.52	100.2
587.20	0.05	100.6



**Figura 8.116.** Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.



**Figura 8.117.** Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

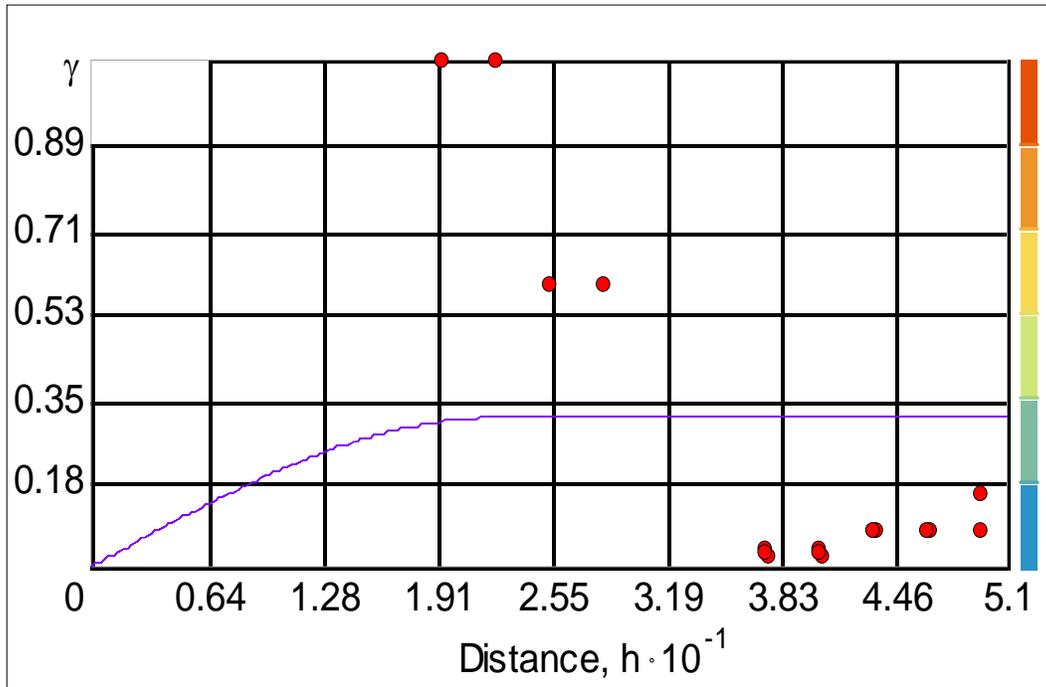


Figura 8.118. Variograma de la superficie del muestreo propuesto SCT, en sentido transversal.

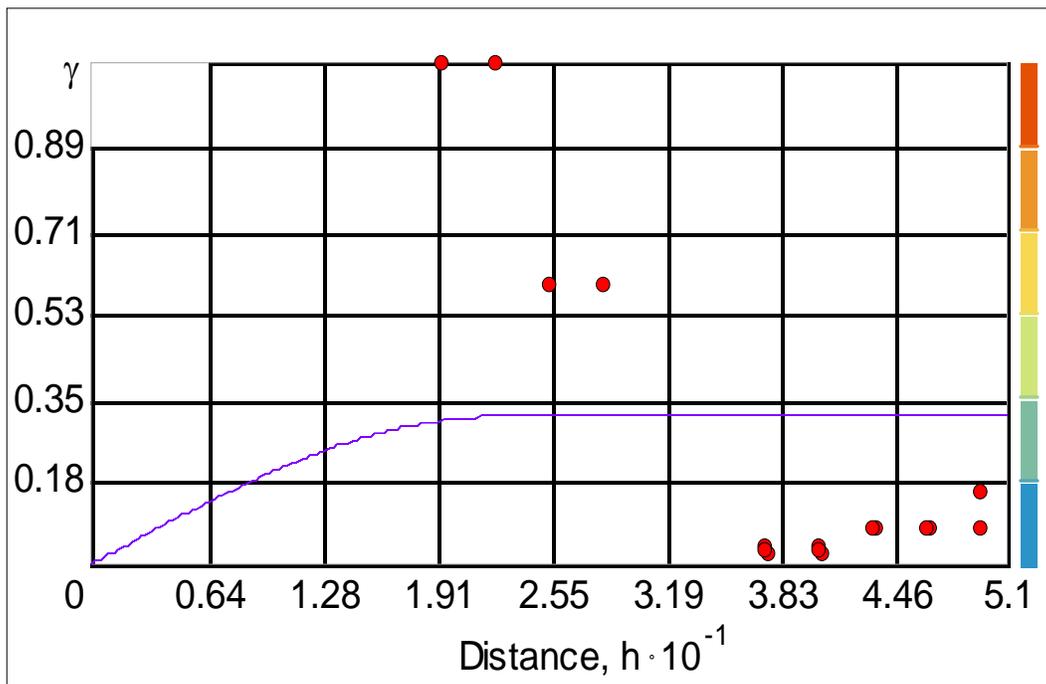


Figura 8.119. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.



Figura 8.120. Resultado de la media del error de predicción.

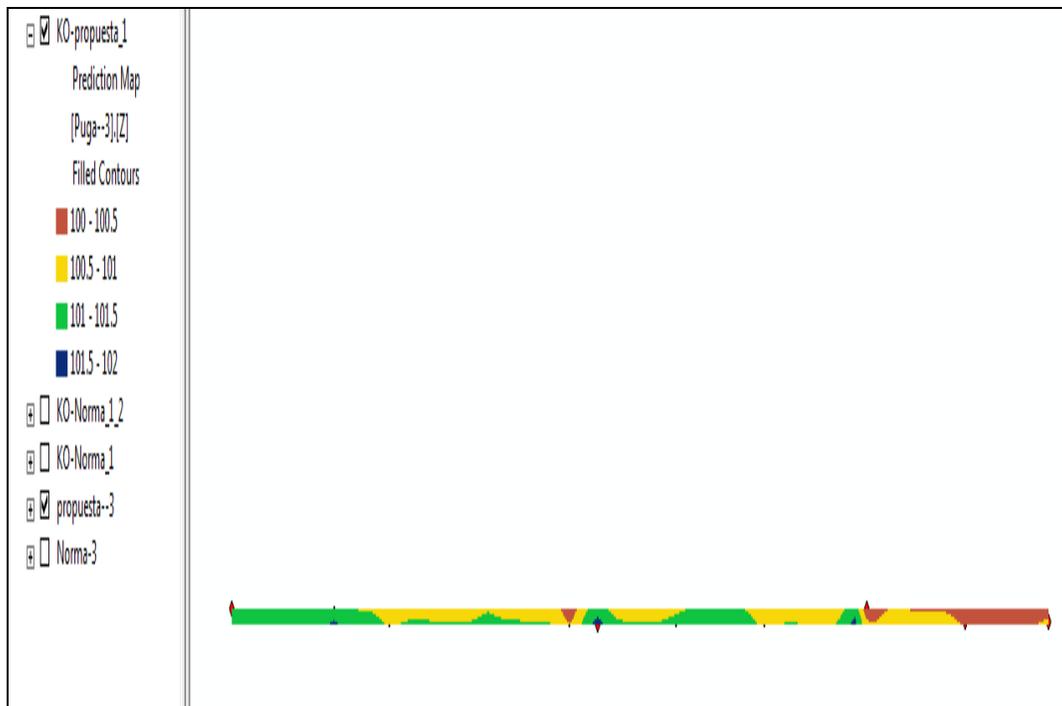
Segundo caso.

Tabla 8.49. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

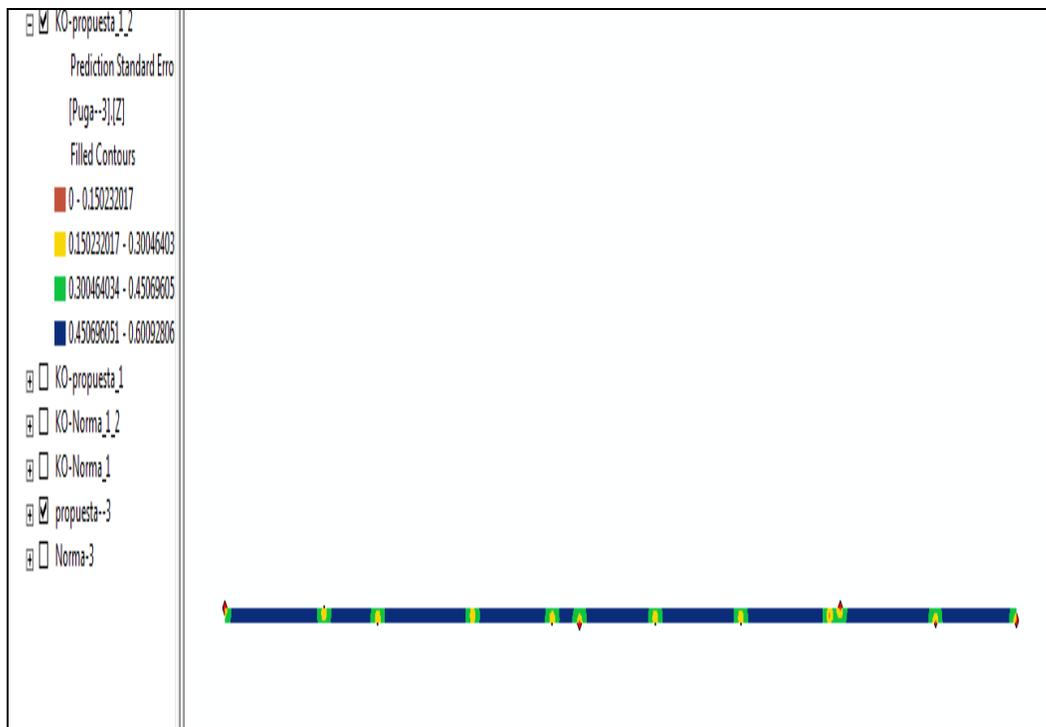
Cadenamiento del origen del tramo		Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:	Ancho del tramo:	Fecha:			
Km1: 21+400		Km2: 22+000		L= 600.00	A=	3.6			
Nº	cadenamiento acumulado (Km) (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	A (a)	B (b)	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) (Km <sub>n</sub> + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA - A/2)	Lado
0	21+400								
1	21+450	50	0.316	0.914	15.8	3.2904	21+415.80	1.4904	
2	21+500	50	0.731	0.648	36.55	2.3328	21+486.55	0.5328	
3	21+550	50	0.494	0.294	24.7	1.0584	21+524.70	-0.7416	
4	21+600	50	0.841	0.47	42.05	1.692	21+592.05	-0.108	
5	21+650	50	0.973	0.252	48.65	0.9072	21+648.65	-0.8928	
6	21+700	50	0.361	0.043	18.05	0.1548	21+668.05	-1.6452	
7	21+750	50	0.436	0.316	21.8	1.1376	21+721.80	-0.6624	
8	21+800	50	0.652	0.329	32.6	1.1844	21+782.60	-0.6156	
9	21+850	50	0.911	0.504	45.55	1.8144	21+845.55	0.0144	
10	21+900	50	0.064	0.893	3.2	3.2148	21+853.20	1.4148	
11	21+950	50	0.417	0.088	20.85	0.3168	21+920.85	-1.4832	
12	22+000	50	0.562	0.095	28.1	0.342	21+978.10	-1.458	

Tabla 8.50. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
15.80	3.29	101.1
86.55	2.33	101.4
124.70	1.06	100.8
192.05	1.69	101.1
248.65	0.91	100.4
268.05	0.15	101.7
321.80	1.14	101.1
382.60	1.18	100.7
445.55	1.81	101.5
453.20	3.21	100.2
520.85	0.32	100.4
578.10	0.34	100.6



**Figura 8.121. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**



**Figura 8.122. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**

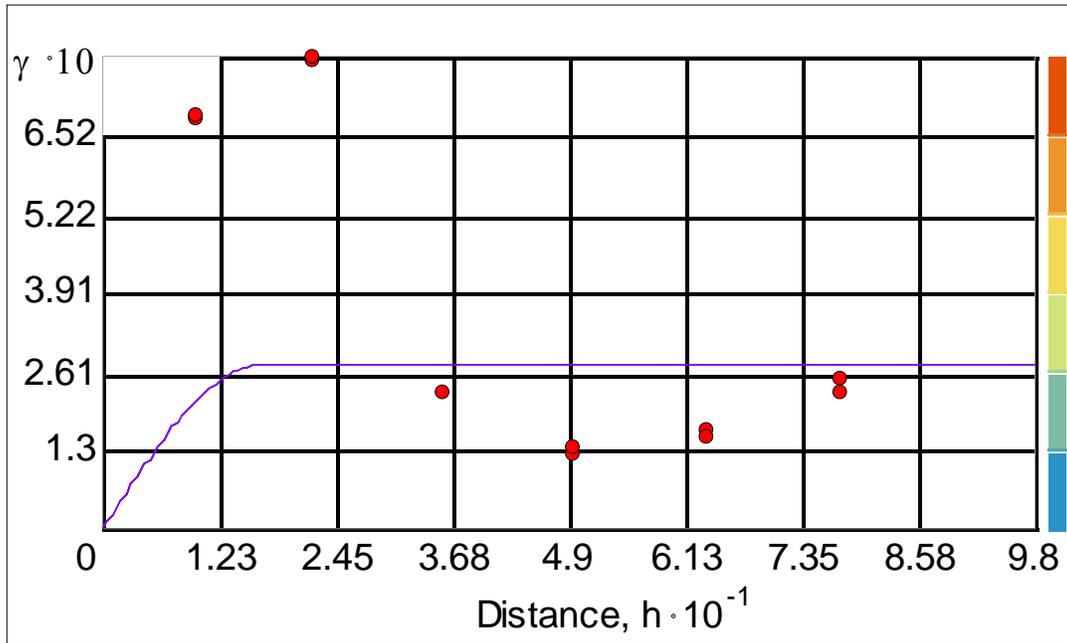


Figura 8.123. Variograma de la superficie del muestreo propuesto SCT, en sentido transversal.

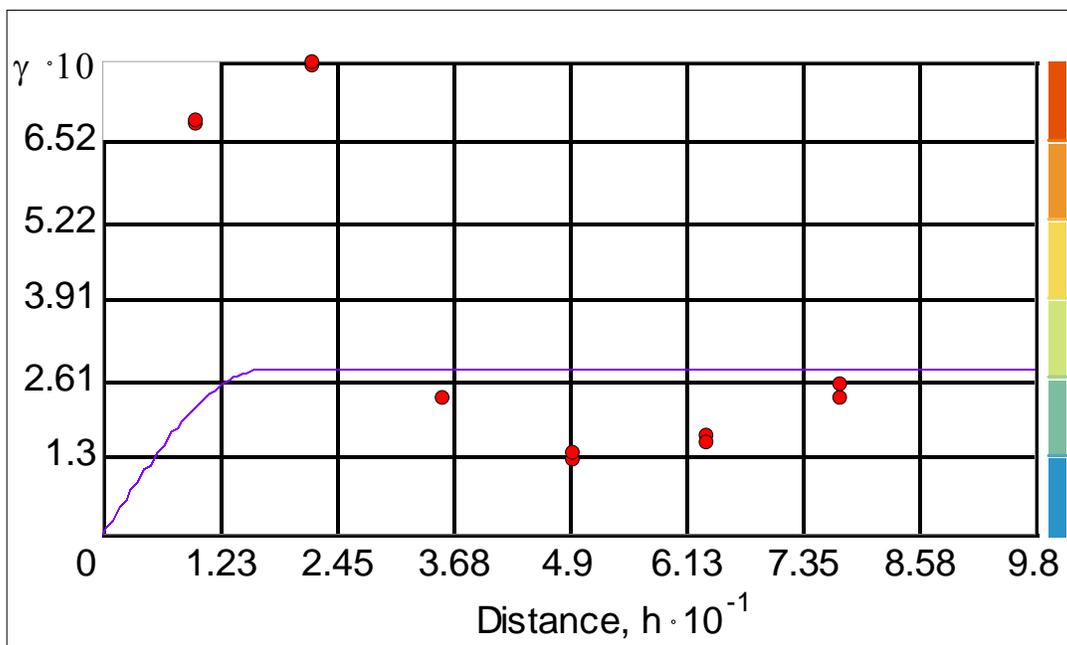


Figura 8.124. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.



Figura 8.125. Resultado de la media del error de predicción.

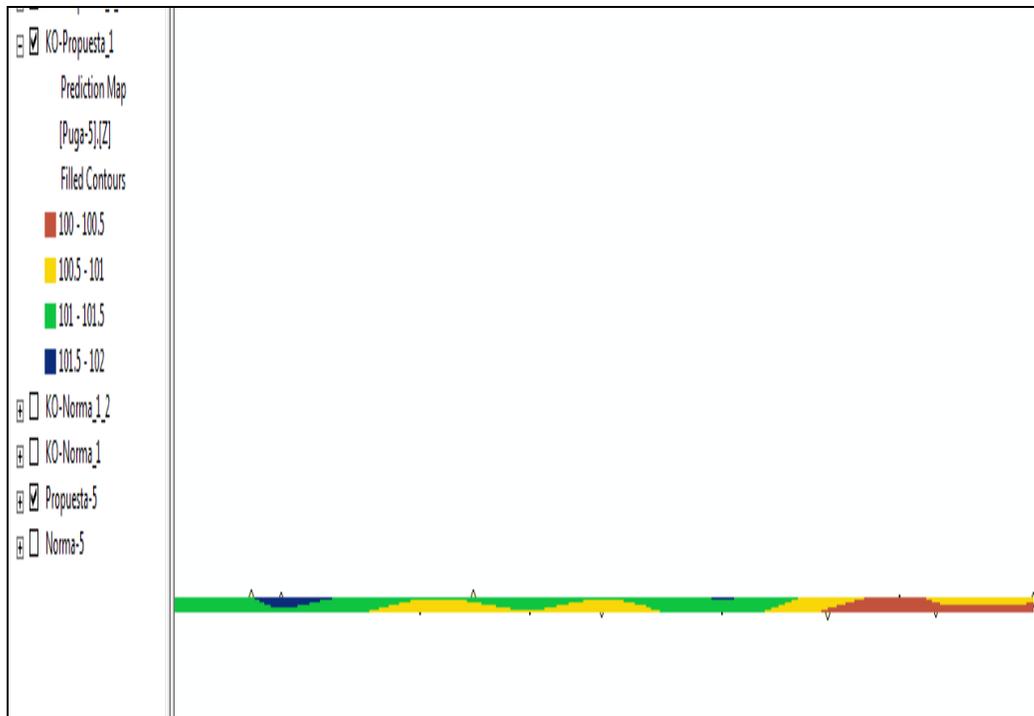
## Tercer caso.

**Tabla 8.51. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.**

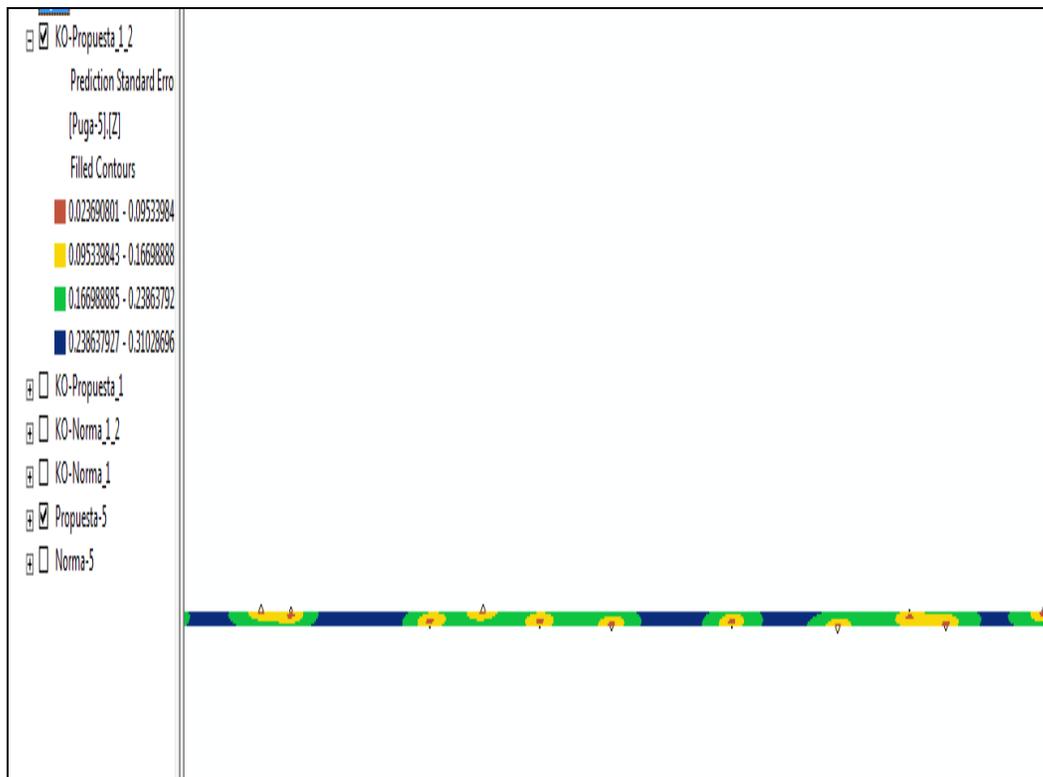
Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				5	Nº de pruebas:	12	Fecha:		
Cadenamiento del origen del tramo			Cadenamiento al término del tramo		Longitud del tramo:		Ancho del tramo		
	Km1: 21+400			Km2: 22+000	L= 600.00		A =	3.6	
Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba	A	B	Factor distancia longitudinal	Distancia transversal (m), $dA$	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km)	Distancia transversal al eje (m), $dA'$	Lado
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)	(a x s)	(b x A)	( Km <sub>n</sub> + $dL$ )	( $dA - A/2$ )	
0	21+400								
1	21+450	50	0.51	0.357	25.5	1.2852	21+425.50	-0.5148	
2	21+500	50	0.797	0.89	39.85	3.204	21+489.85	1.404	
3	21+550	50	0.165	0.658	8.25	2.3688	21+508.25	0.5688	
4	21+600	50	0.88	0.327	44	1.1772	21+594.00	-0.6228	
5	21+650	50	0.54	0.893	27	3.2148	21+627.00	1.4148	
6	21+700	50	0.24	0.323	12	1.1628	21+662.00	-0.6372	
7	21+750	50	0.128	0.157	6.4	0.5652	21+706.40	-1.2348	
8	21+800	50	0.61	0.29	30.5	1.044	21+780.50	-0.756	
9	21+850	50	0.919	0.002	45.95	0.0072	21+845.95	-1.7928	
10	21+900	50	0.809	0.534	40.45	1.9224	21+890.45	0.1224	
11	21+950	50	0.259	0.182	12.95	0.6552	21+912.95	-1.1448	
12	22+000	50	0.467	0.78	23.35	2.808	21+973.35	1.008	

**Tabla 8.52. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
25.50	1.2852	101.1
89.85	3.204	101.5
108.25	2.3688	101.7
194.00	1.1772	100.8
227.00	3.2148	101.1
262.00	1.1628	101.1
306.40	0.5652	100.7
380.50	1.044	101.4
445.95	0.0072	100.4
490.45	1.9224	100.2
512.95	0.6552	100.4
573.35	2.808	100.6



**Figura 8.126. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.**



**Figura 8.127. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.**

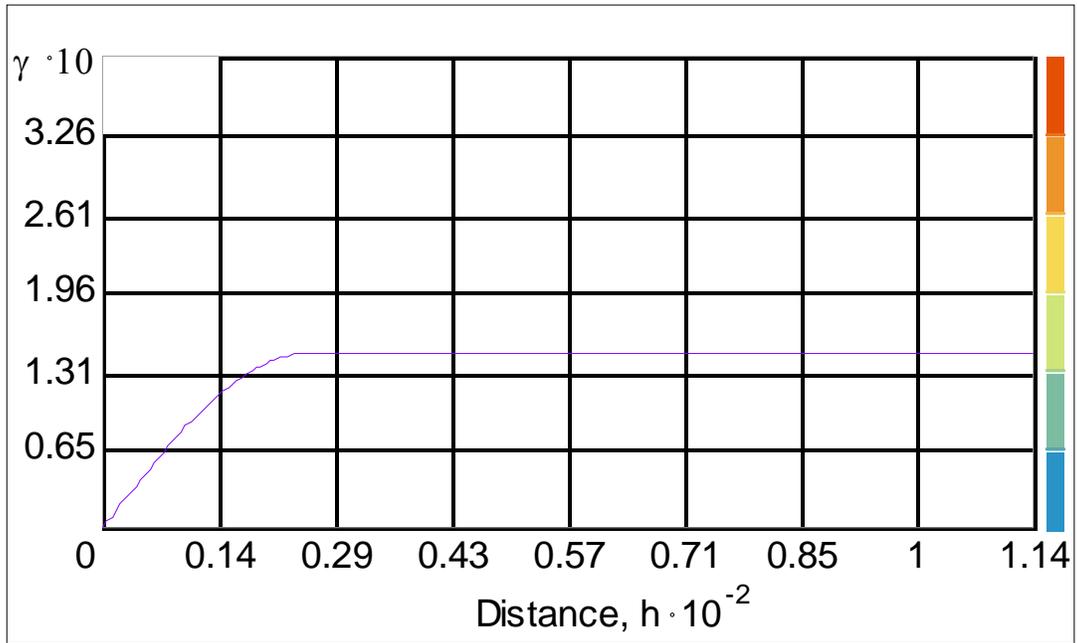


Figura 8.128. Variograma de la superficie del muestreo propuesto SCT, en sentido transversal.

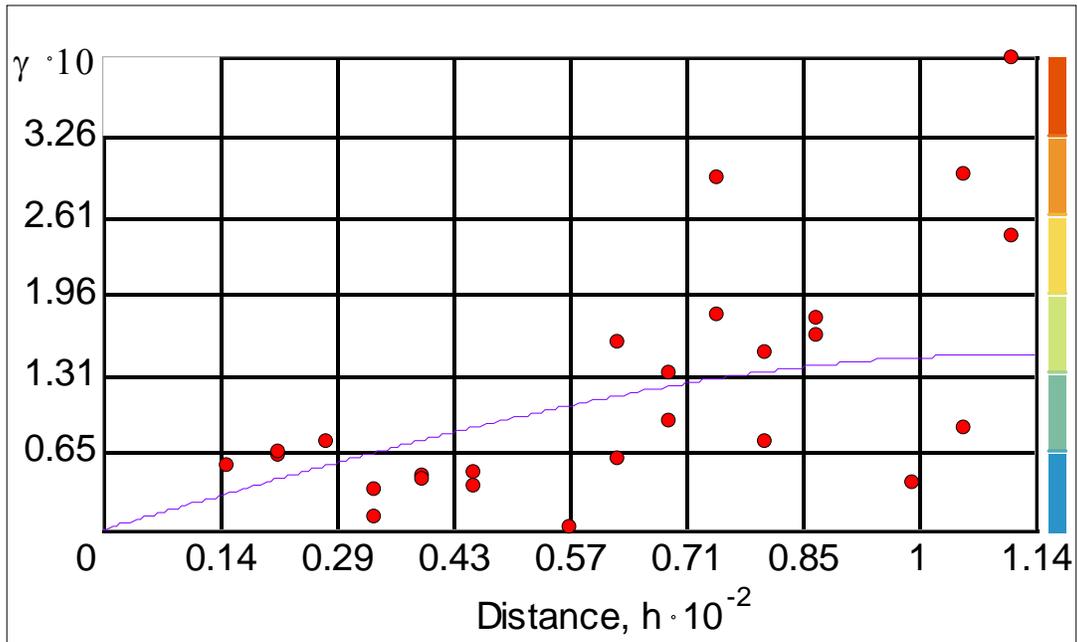


Figura 8.129. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

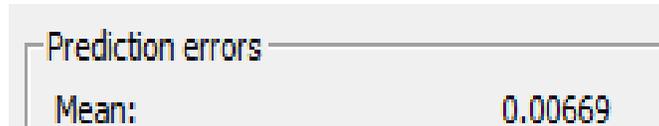


Figura 8.130. Resultado de la media del error de predicción.

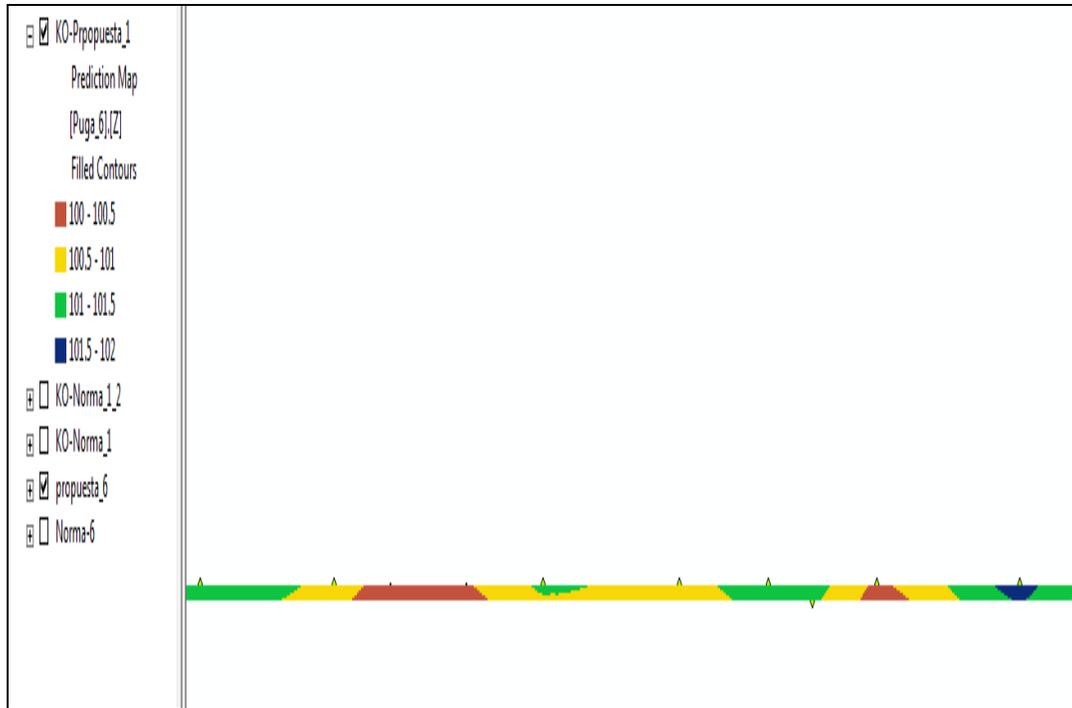
Cuarto caso.

Tabla 8.53. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.

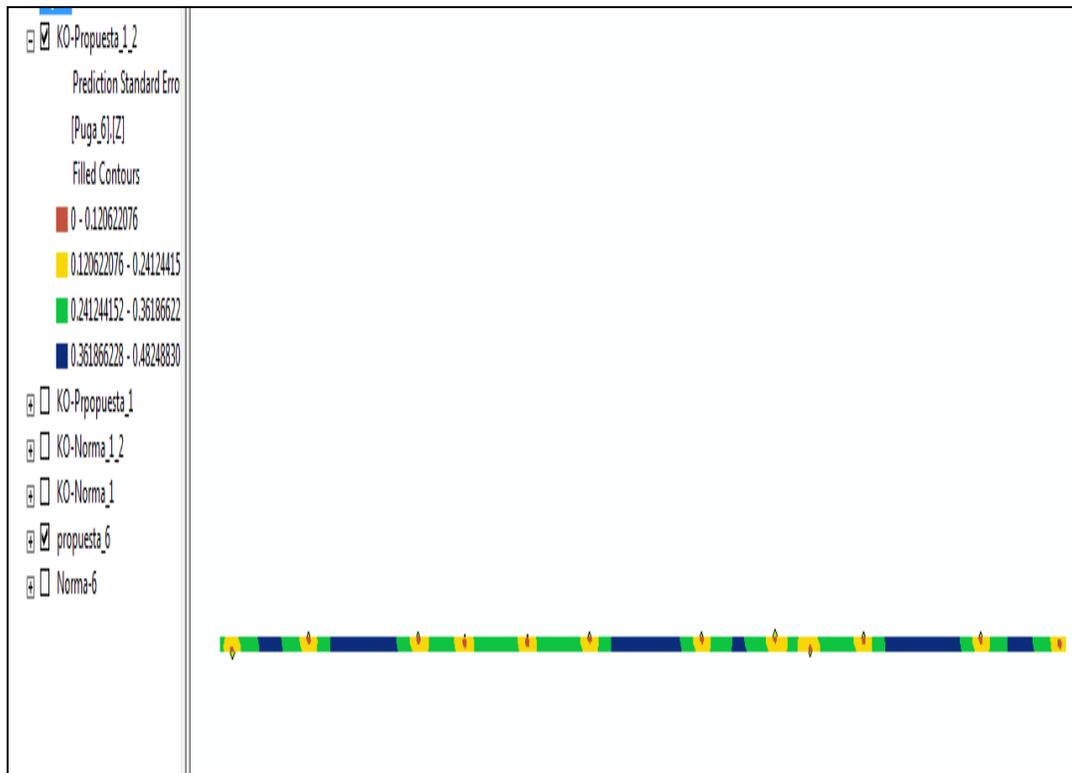
Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				6	Nº de pruebas:		24	Fecha:	
Cadenamiento del origen del tramo	Cadenamiento al término del tramo			Longitud del tramo:	Ancho del tramo	L= 600.00	A =	3.6	
	Km1: 21+400	Km2: 22+000							
Nº	cadenamiento acumulado (Km)	Sección de prueba	A	B	Factor distancia longitudinal	Distancia transversal (m), dA	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km)	Distancia transversal al eje (m), dA'	Lado
	(Km <sub>n</sub> )	s	(a)	(b)	(a x s)	(b x A)	( Km <sub>n</sub> + dL)	(dA - A/2)	
0	21+400								
1	21+450	50	0.175	0.097	8.75	0.3492	21+408.75	-1.4508	
2	21+500	50	0.26	0.898	13	3.2328	21+463.00	1.4328	
3	21+550	50	0.816	0.872	40.8	3.1392	21+540.80	1.3392	
4	21+600	50	0.475	0.603	23.75	2.1708	21+573.75	0.3708	
5	21+650	50	0.362	0.655	18.1	2.358	21+618.10	0.558	
6	21+700	50	0.245	0.925	12.25	3.33	21+662.25	1.53	
7	21+750	50	0.835	0.925	41.75	3.33	21+741.75	1.53	
8	21+800	50	0.872	0.932	43.6	3.3552	21+793.60	1.5552	
9	21+850	50	0.379	0.118	18.95	0.4248	21+818.95	-1.3752	
10	21+900	50	0.131	0.876	6.55	3.1536	21+856.55	1.3536	
11	21+950	50	0.793	0.904	39.65	3.2544	21+939.65	1.4544	
12	22+000	50	0.914	0.582	45.7	2.0952	21+995.70	0.2952	

Tabla 8.54. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).

X	Y	Z
8.75	0.35	101.1
63.00	3.23	101.5
140.80	3.14	100.8
173.75	2.17	100.2
218.10	2.36	100.4
262.25	3.33	101.1
341.75	3.33	100.7
393.60	3.36	101.4
418.95	0.42	101.1
456.55	3.1536	100.4
539.65	3.2544	101.7
595.7	2.0952	100.6



**Figura 8.131. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**



**Figura 8.132. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geoestadística.**

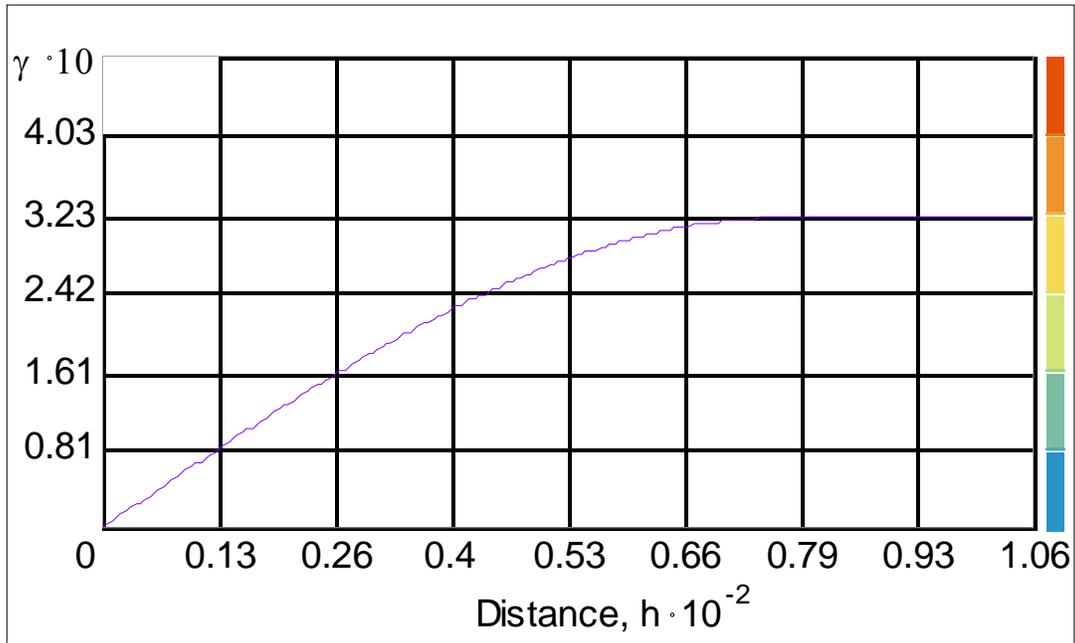


Figura 8.133. Variograma de la superficie del muestreo propuesto SCT, en sentido transversal.

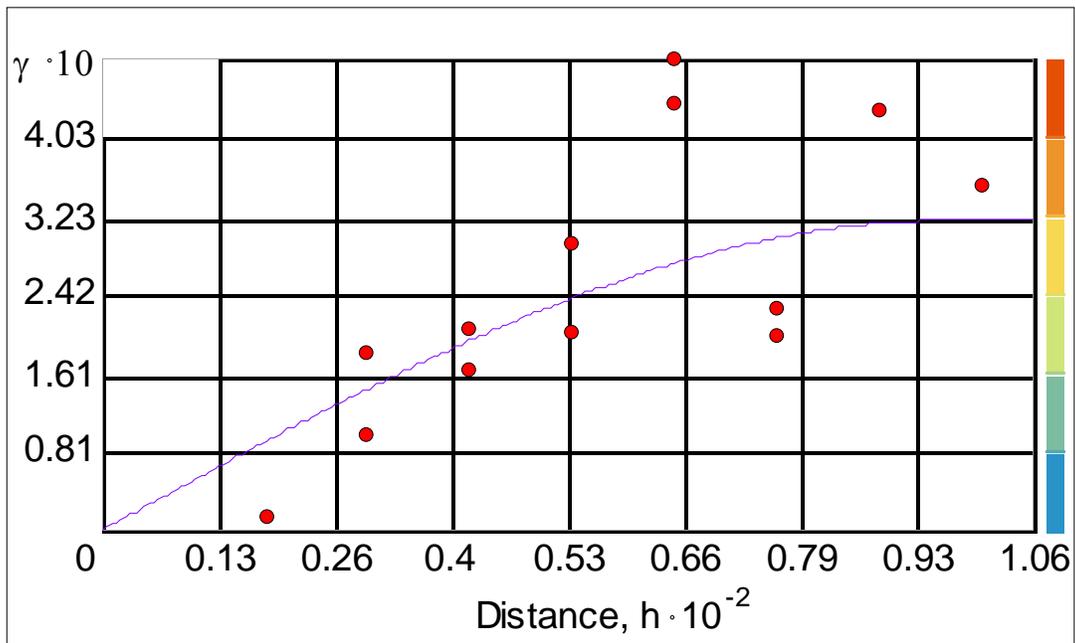


Figura 8.134. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.



Figura 8.135. Resultado de la media del error de predicción.

Quinto caso.

**Tabla 8.55. Selección del número y ubicación de los puntos de muestreo, según muestreo propuesto.**

Columna de números aleatorios compuesta para compactación:				Nº de pruebas:		Fecha:			
				9	12				
Cadenamiento del origen del tramo	Km1: 21+400		Cadenamiento al término del tramo	Km2: 22+000		Longitud del tramo: L= 600.00	Ancho del tramo		
							A =	3.6	
Nº	cadenamiento acumulado (Km) (Km <sub>n</sub> )	Sección de prueba s	A (a)	B (b)	Factor distancia longitudinal (a x s)	Distancia transversal (m), dA (b x A)	Cadenamiento del sitio seleccionado, ubicación (Km) (Km <sub>n</sub> + dL)	Distancia transversal al eje (m), dA' (dA - A/2)	Lado
0	21+400								
1	21+450	50	0.287	0.216	14.35	0.7776	21+414.35	-1.0224	
2	21+500	50	0.705	0.049	35.25	0.1764	21+485.25	-1.6236	
3	21+550	50	0.629	0.112	31.45	0.4032	21+531.45	-1.3968	
4	21+600	50	0.65	0.519	32.5	1.8684	21+582.50	0.0684	
5	21+650	50	0.205	0.767	10.25	2.7612	21+610.25	0.9612	
6	21+700	50	0.806	0.299	40.3	1.0764	21+690.30	-0.7236	
7	21+750	50	0.977	0.962	48.85	3.4632	21+748.85	1.6632	
8	21+800	50	0.564	0.089	28.2	0.3204	21+778.20	-1.4796	
9	21+850	50	0.102	0.159	5.1	0.5724	21+805.10	-1.2276	
10	21+900	50	0.328	0.457	16.4	1.6452	21+866.40	-0.1548	
11	21+950	50	0.23	0.715	11.5	2.574	21+911.50	0.774	
12	22+000	50	0.197	0.101	9.85	0.3636	21+959.85	-1.4364	

**Tabla 8.56. Distribución del muestreo propuesto, así como su grado de compactación (Z).**

X	Y	Z
14.35	0.78	101.1
85.25	0.18	100.2
131.45	0.40	100.4
182.50	1.87	101.4
210.25	2.76	100.4
290.30	1.08	100.8
348.85	3.46	101.7
378.20	0.32	101.1
405.10	0.57	101.1
466.40	1.65	100.7
511.50	2.57	101.5
559.85	0.36	100.6

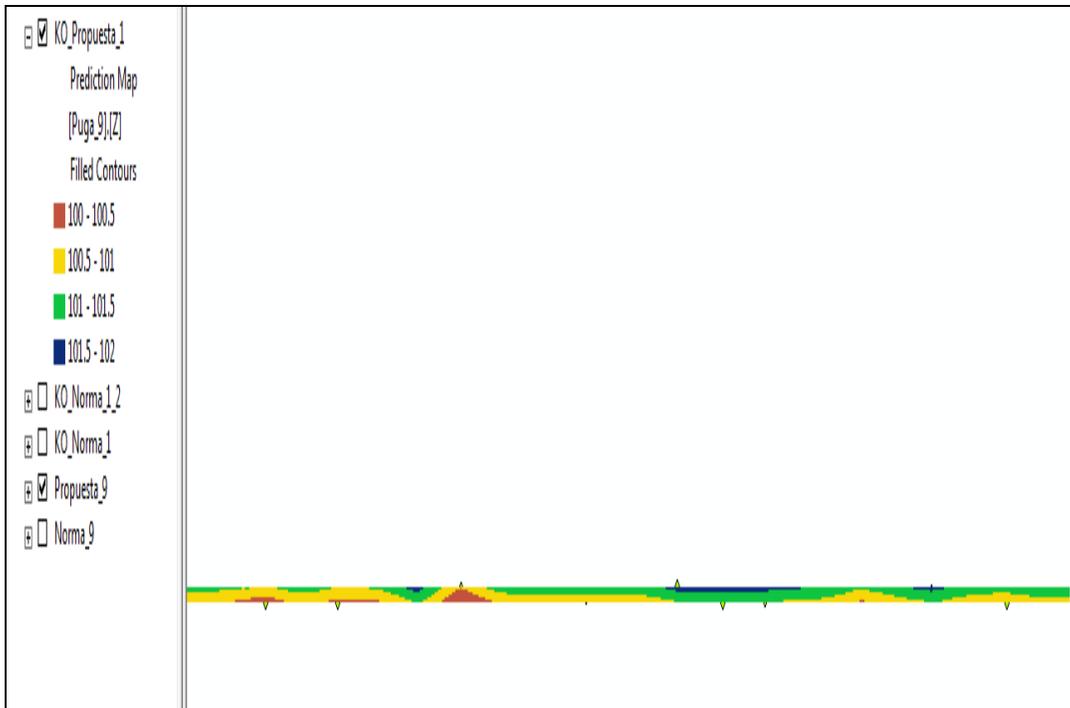


Figura 8.136. Mapa de la superficie, compactada del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

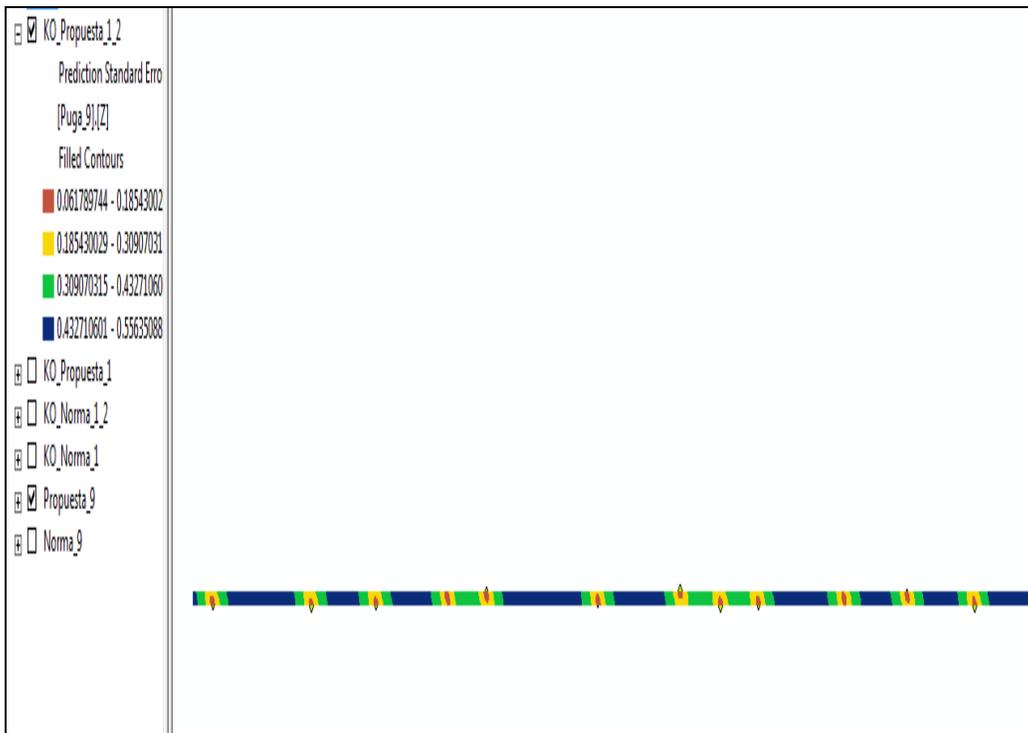


Figura 8.137. Mapa de la superficie, error estándar del muestreo propuesto. Analizada con Geostatística.

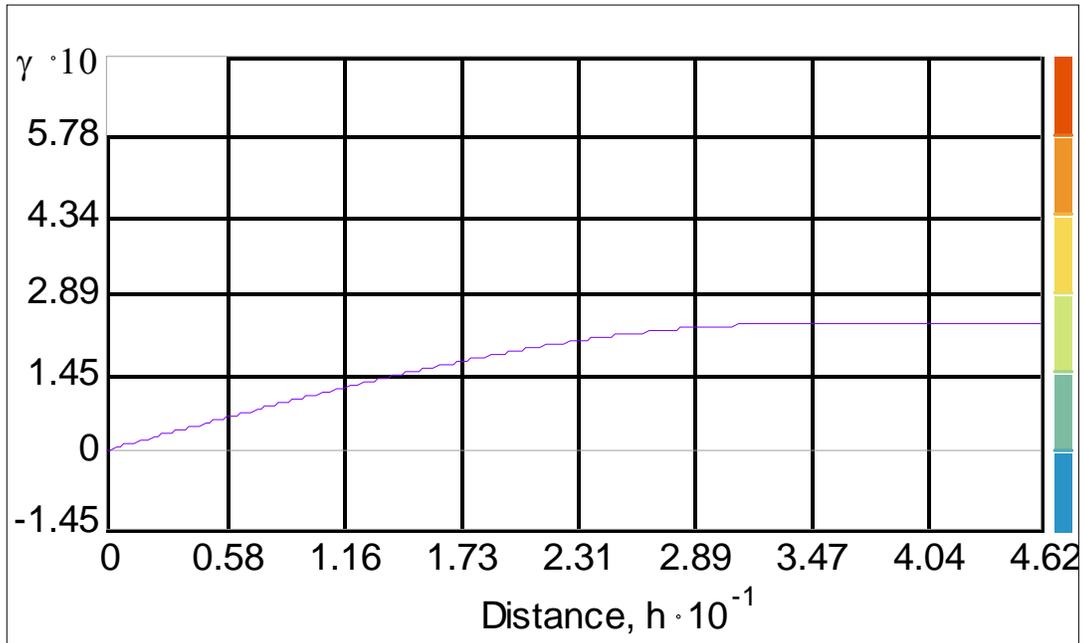


Figura 8.138. Variograma de la superficie del muestreo propuesto SCT, en sentido transversal.

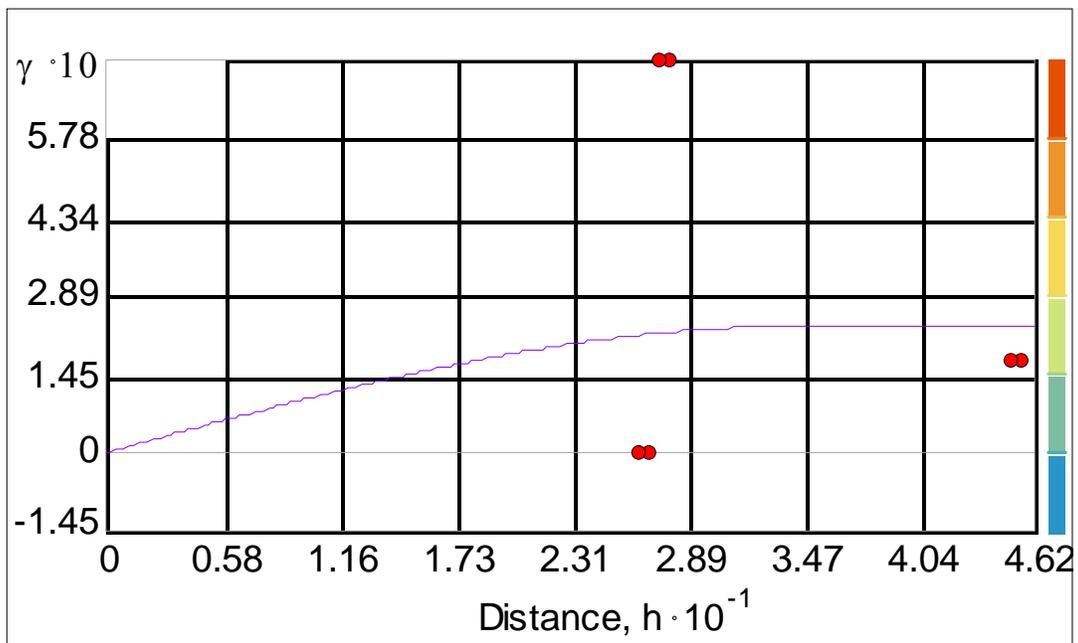


Figura 8.139. Variograma de la superficie del muestreo propuesto, en sentido longitudinal.

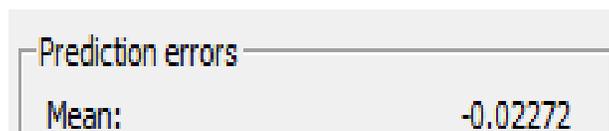


Figura 8.140. Resultado de la media del error de predicción.