



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería – Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención
en Ingeniería Civil

**INCERTIDUMBRE EN EL RETROCÁLCULO DE
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE CURVAS VERTICALES
OBTENIDOS CON UAV**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Civil

POR: GERARDO ANDRÉS ORTIZ MORALES

Profesor Guía: Dr. Tomás Echaveguren Navarro

Agosto, 2021
Concepción, Chile

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



RESUMEN

En caminos existentes habitualmente es necesario estimar coordenadas y elevación para retro - calcular la geometría del trazado horizontal, vertical y de la sección transversal. Esta información es útil cuando no se cuenta con planos as-built o cuando se requieren datos geométricos para elaborar, por ejemplo, modelos que relacionen la velocidad de operación con la geometría del camino. En caminos existentes las mantenciones y el deterioro introducen distorsiones en la continuidad de las cotas del trazado vertical y su geometría. Existen modelos para estimar la nueva geometría en base a algoritmos de optimización y suavización de alturas del eje longitudinal. Sin embargo, estos modelos utilizan generalmente espaciamientos de alturas fijos y un único algoritmo de suavización, ignorando la variabilidad que ocasiona en los parámetros geométricos la elección del espaciamiento, del algoritmo de suavización y sus parámetros. Por tanto, estiman un valor único de parámetros geométricos sin conocer el error de estimación.

Este trabajo analiza el efecto del espaciamiento de los puntos topográficos del alineamiento vertical obtenidos mediante fotogrametría, combinado con el efecto de la elección de diversos métodos y parámetros de suavización sobre los parámetros de curvatura (K en m), deflexión (A en %) y longitud (L en m) de las curvas verticales (KAL). Se realizó un levantamiento fotogramétrico de una curva vertical utilizando un UAV (Unmanned Aerial Vehicle por sus siglas en inglés) y se construyó un modelo digital de superficie, del cual se extrajeron datos de elevación cada 2, 5 y 10 m.

Se construyeron diagramas de pendiente, para posteriormente aplicar suavización exponencial simple (SES), doble (DES) y triple (TES) para diversos parámetros de nivel, tendencia y estacionalidad. Se realizó un análisis de variabilidad con los métodos boosting regression (BR), ANOVA y K-Nearest Neighbor (KNN). Finalmente se concluyó que el tipo de suavizador y sus parámetros explican entre un 85 y 89 % la variabilidad de los parámetros KAL y que, con un 95 % de nivel de confianza, el espaciamiento, suavizador y su combinación afectan significativamente la media de los parámetros KAL .

AGRADECIMIENTOS



TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Hipótesis	4
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivo General.....	4
1.3.2	Objetivos específicos.....	4
1.4	Metodología.....	4
1.5	Principales resultados y conclusiones.....	5
1.6	Alcance del trabajo	6
1.7	Organización de la Tesis.....	6
CAPÍTULO 2	MÉTODOS DE RETRO CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA DE CURVAS VERTICALES	7
2.1	Introducción.....	7
2.2	Geometría de las curvas verticales	7
2.3	Métodos de retro - cálculo de geometría vertical	8
2.4	Conclusiones.....	11
CAPÍTULO 3	ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	12
3.1	Introducción.....	12
3.2	Procedimiento de trabajo	12
3.2.1	Ubicación del tramo de estudio	12
3.3	Levantamiento de información en terreno.....	13
3.4	Procesamiento de los datos de terreno.....	15
3.5	Retro cálculo de los parámetros geométricos	16
3.6	Análisis de los parámetros KAL.....	21
3.7	Conclusiones.....	24
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
4.1	Introducción.....	25
4.2	Sensibilidad de los parámetros KAL al espaciamiento y suavizadores.....	25
4.3	Análisis del efecto conjunto del espaciamiento y suavizador	26
4.4	Análisis de varianza de los parámetros KAL	26
4.5	Análisis de clasificación de los parámetros KAL.....	28
4.6	Conclusiones.....	31
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES	32

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros del vuelo fotogramétrico con UAV	13
Tabla 3.2: Rango de parámetros de suavización y numero de suavizaciones según espaciamiento de datos	17
Tabla 3.3: Estadígrafos de los parámetros KAL para cada suavizador y espaciamiento de datos	23
Tabla 4.1: Efecto del espaciamiento y suavizador en los parámetros KAL mediante Boosting Regression (BR)	26
Tabla 4.2: ANOVA de los parámetros KAL respecto del espaciamiento y tipo de suavizador....	27
Tabla 4.3: Métrica de evaluación de curvas ROC según espaciamiento.....	29



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Elementos de una curva vertical en cresta aislada y su diagrama de pendientes.....	7
Figura 3.1: Emplazamiento del tramo en estudio.....	13
Figura 3.2: DSM del proceso fotogramétrico.....	15
Figura 3.3: Datos altimétricos anómalos identificados a ojo desnudo	16
Figura 3.4: Puntos singulares de la CVC en el diagrama de pendientes	17
Figura 3.5: Conjunto de diagramas de pendientes con datos crudos (rojo) y suavizados para espaciamientos de 2, 5 y 10 m (gris)	20
Figura 3.6: Parámetros KAL clasificados por espaciamiento y tipo de suavizador	22
Figura 4.1: Curvas ROC de suavizado obtenidas con el algoritmo de clasificación KNN	30



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La geometría de caminos existentes en planta, elevación y sección transversal es relevante para proyectar mejoramientos geométricos del alineamiento; calcular índices de seguridad; modelar relaciones velocidad - geometría; calcular umbrales de consistencia del diseño geométrico; y mantener un inventario actualizado de la geometría de las carreteras. En cualquiera de estas aplicaciones, los datos comunes necesarios son los parámetros geométricos y la distancia. En el alineamiento horizontal es necesario conocer el radio de curvatura, la deflexión, la longitud de las curvas aisladas y la longitud de las tangentes que separan curvas sucesivas. En el alineamiento vertical es necesario conocer la longitud e inclinación de tramos con pendiente uniforme, la magnitud de los cambios de pendiente y la curvatura de las curvas verticales. Cuando la geometría del camino es desconocida y se deben proyectar mejoras que consideren la consistencia del diseño geométrico actual del camino es que los parámetros geométricos son fundamentales para dicho estudio; además, es importante contar con la información de la geometría para analizar también, por ejemplo, modelos que relacionen la velocidad de operación con la geometría del camino.

El cálculo de parámetros geométricos en el alineamiento horizontal y sección transversal se encuentra profusamente desarrollado, principalmente para modelar la consistencia del diseño geométrico. Por el contrario, el cálculo de parámetros geométricos del alineamiento vertical se encuentra menos desarrollado. Easa et al. (1998), Easa (1999), Hu et al. (2004), Ben Arie et al. (2004), Easa (2008), Castro et al. (2006), DiMascio et al. (2012) y Holgado-Barco et al. (2014), propusieron procedimientos para reconstituir el perfil del alineamiento vertical. Easa et al. (2008), Easa y Kikuchi (2009), Easa (2009), Karamanou et al. (2009), Easa y Wang (2010), Higuera de Frutos y Castro (2017), Pu et al. (2019) y Song et al. (2021), propusieron procedimientos para retro-calcular los parámetros geométricos de curvas verticales. Cartes et al. (2021) utilizaron un procedimiento similar al de Holgado-Barco et al. (2014) para estimar la geometría de curvas verticales en cresta y modelar velocidad de operación.

El procedimiento genérico de retro - cálculo de geometría vertical se resume en: relevamiento de eje longitudinal, preparación de los diagramas de pendientes y cálculo de los parámetros de curvatura y longitud. En cada uno de estos procesos existen fuentes de incertidumbre que no se han estudiado en el estado del arte. En los diagramas de pendientes existe variabilidad en las pendientes ocasionada por el procedimiento de extracción de puntos topográficos y por el espaciamiento entre puntos topográficos a lo largo del eje longitudinal. Asimismo, el uso de diversos suavizadores introduce variabilidad en el cálculo de pendientes, longitud y curvatura de las curvas verticales.

Estas fuentes de incerteza no son consideradas en el retro - cálculo de parámetros geométricos, puesto que se utiliza un espaciamiento fijo de puntos topográficos y un único suavizador. Por tanto, se obtiene un valor único de pendientes, longitud y curvatura de las curvas verticales sin conocer su varianza. Debido a esto, tampoco es posible estimar el efecto de estas incertezas en el resultado de las modelaciones que usan estos parámetros como datos de entrada, por ejemplo, en la distancia de visibilidad disponible en carretera.

El propósito de este trabajo es analizar el efecto de la incerteza en el cálculo de parámetros geométricos de una curva vertical en cresta (CVC), ocasionado por el espaciamiento de los puntos topográficos en el eje longitudinal y por el uso de diferentes suavizadores en la confección de los diagramas de pendientes. Para ello, se revisaron las técnicas de retro - cálculo de parámetros de curvatura vertical existentes en la literatura, identificando las etapas del proceso completo. Se diseñó un experimento para la recolección de datos y generación de puntos topográficos a partir de fotogrametría digital utilizando un UAV y se construyeron diagramas de pendientes para aplicar SES, DES y TES con diversas combinaciones de parámetros de nivel, tendencia y estacionalidad. Luego se calcularon los diagramas de pendientes suavizados y se obtuvieron distribuciones de probabilidades del ángulo de deflexión, longitud y curvatura de la curva vertical analizada.

Finalmente se analizó la variabilidad de los resultados obtenidos con análisis de varianza y herramientas de aprendizaje de máquina para identificar el efecto conjunto sobre los parámetros

KAL del espaciamento entre datos, del tipo de suavizador y diversas combinaciones de parámetros de suavización



1.2 Hipótesis

El valor de los parámetros geométricos retro calculados de una curva vertical, depende del espaciamiento de las cotas del perfil longitudinal, del tipo de suavizador y de los parámetros de suavización.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar el efecto de la incerteza en el cálculo de parámetros geométricos de una curva vertical.

1.3.2 Objetivos específicos

- 
- a) Analizar las técnicas de retro - cálculo de parámetros geométricos de curvatura vertical.
 - b) Diseñar un método de levantamiento de datos de terreno que permita estimar los parámetros geométricos de la curva vertical.
 - c) Identificar el efecto conjunto sobre los parámetros KAL determinado por la elección del espaciamiento entre datos, del tipo de suavizador y diversas combinaciones de parámetros de suavización.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se definió una metodología basada en las siguientes etapas: La primera etapa consistió en una revisión de los métodos de retro - cálculo de parámetros geométricos de curvas verticales identificando las etapas de estos procesos. Luego se realizó un levantamiento fotogramétrico de una curva vertical con un UAV y se construyó un modelo digital de superficie, del cual se extrajeron datos de elevación cada 2, 5 y 10 m. Se construyeron diagramas de pendiente, para posteriormente aplicar suavización exponencial simple, doble y

triple para diversos parámetros de nivel, tendencia y estacionalidad. Se realizó un análisis de variabilidad con los métodos Boosting Regression (BR), análisis de la varianza (ANOVA) y K-Nearest Neighbor (KNN).

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se analizó la incertidumbre incluida en los parámetros geométricos retro – calculados de la CVC por los diferentes tipos y parámetros de suavizado y diferentes espaciamientos entre datos.

El análisis realizado muestra que el tipo de suavizador y sus parámetros explican entre un 85 y 89 % la variabilidad de los parámetros KAL y que, con un 95 % de nivel de confianza, el espaciamiento, suavizador y su combinación afectan significativamente la media de los parámetros KAL.

Dependiendo del espaciamiento, tipo de suavizador y parámetros de suavización: la media del parámetro K varía entre 23,9 y 26,8 m/% y su desviación estándar entre 0,5 y 1,34 m/%; la media del parámetro A varía entre 4,1 y 4,5 % y su desviación estándar entre 0,01 y 0,19 %; y la media del parámetro L varía entre 104,3 y 112,0 m y su desviación estándar entre 0,9 y 5,8 m. Los resultados del retro-cálculo de los parámetros geométricos, considerando la elección del espaciado o el tipo de suavizado, evidencia una alta incerteza en el proceso, inclusive. Estos datos son importantes puesto que para una valor de K, por ejemplo se pueden obtener diferentes resultados también en el análisis de consistencia o el cálculo de la distancia de parada en curvas verticales. Importante para la seguridad de la ruta.

Finalmente se concluyó que la elección arbitraria de cualquiera distanciamiento, tipo y parámetro de suavizador condiciona significativamente el resultado, por lo que su elección debe ir precedida de un análisis de sensibilidad que permita contextualizar los resultados con una incerteza asociada a cada uno de los parámetros KAL y que el análisis no debería realizarse por separado, si no analizando todas las decisiones en conjunto.

1.6 Alcance del trabajo

En este trabajo se utilizó una metodología de levantamiento de información mediante fotogrametría utilizando un UAV y planificando un vuelo a una altura 40 m sobre la cresta de la curva vertical; se desarrolla en un tramo recto de carretera bidireccional pavimentada. Este método es que permite obtener un DSM y extraer los datos desde un único levantamiento a diferentes espaciamientos. No se sensibilizaron los resultados de los parámetros KAL por ejecutar vuelos a diferentes alturas, utilizando diferentes valores de superposición de imágenes o la elección de un camino no pavimentado.

1.7 Organización de la Tesis

Este informe está dividido en cinco capítulos. En el Capítulo 1, de introducción, se presenta la motivación, la hipótesis, los objetivos, el alcance de la tesis, la metodología de trabajo y los principales resultados y conclusiones. En el Capítulo 2 se describen los elementos geométricos de la CVC y se elabora una reseña de la literatura existente de los métodos de retro cálculo de geometría de curvas verticales. En el Capítulo 3 se presenta el proceso de obtención de los datos de terreno a diferentes espaciamientos para elaborar los diagramas de pendientes que posteriormente fueron sujeto de diferentes tipos y parámetros de suavizado; para la obtención de los parámetros geométricos de la CVC. En el Capítulo 4 se muestran los principales análisis de resultados que permiten identificar la variabilidad en los parámetros geométricos finales de la CVC; ya sea por el espaciamiento de los datos de terreno, los diferentes tipos de suavizado y/o los diferentes parámetros de suavización. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de los análisis estadísticos realizados.

CAPÍTULO 2 MÉTODOS DE RETRO CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA DE CURVAS VERTICALES

2.1 Introducción

En este capítulo se describen los elementos geométricos de la CVC y se elabora una reseña de la literatura existente de los métodos de retro cálculo de geometría de curvas verticales.

2.2 Geometría de las curvas verticales

El alineamiento vertical de una carretera es una sucesión de pendientes uniformes enlazadas por curvas verticales en cresta (CVC) o valle (SVC). Las curvas verticales proporcionan una transición suave cuando existen cambios en la pendiente longitudinal a lo largo del trazado. La Figura 1 muestra los elementos de una CVC y su diagrama de pendientes teórico. Una CVC consta de una tangente de aproximación de longitud L_1 (P_1 a P_2), un arco de longitud L (P_2 a P_4) y una tangente de salida de longitud L_2 (P_4 a P_5). El perfil longitudinal muestra que la tangente de aproximación es de pendiente constante positiva i_1 , el arco es de pendiente variable desde i_1 hasta i_2 , e i_2 es la pendiente constante negativa de la tangente de salida. La cresta de la CVC (P_3) es el punto de altura máxima y, por lo tanto, de pendiente igual a cero. (Ver Figura 2.1).

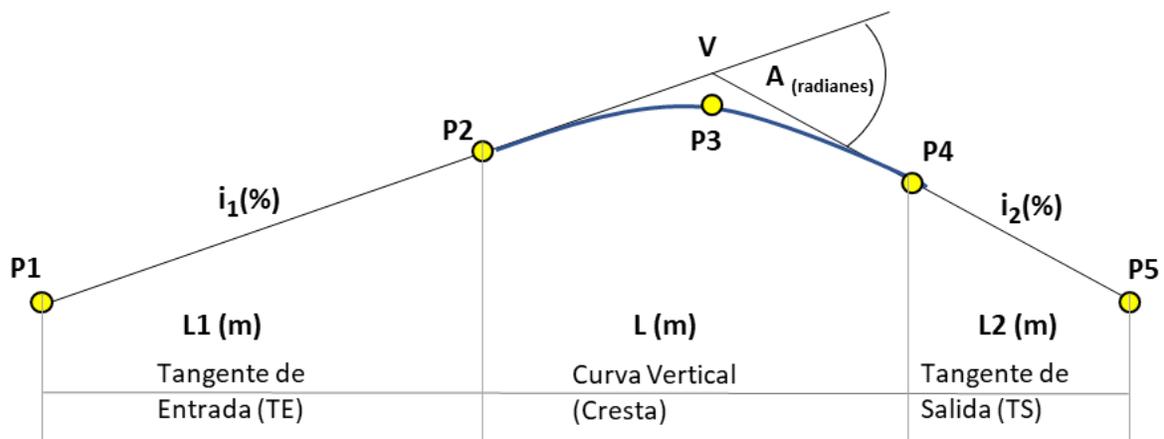


Figura 2.1: Elementos de una curva vertical en cresta aislada y su diagrama de pendientes

La curvatura de la CVC (K en $m/\%$) depende de su longitud (L en m) y del valor absoluto de la diferencia algebraica entre las pendientes de las tangentes de aproximación y de salida (A en $\%$), como muestran las Ecuaciones 2.1 y 2.2 (AASHTO, 2018).

$$A = |I_1 - I_2| \quad (2.1)$$

$$K = \frac{L}{|I_1 - I_2|} = \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

2.3 Métodos de retro - cálculo de geometría vertical

El retro - cálculo de los parámetros geométricos se realiza con ayuda de métodos de regresión paramétrica y no paramétrica. Los métodos paramétricos asumen una forma definida de una función de regresión, con la cual estiman pendientes longitudinales y longitud de las curvas. Entre estos métodos se encuentra el de mínimos cuadrados. Los métodos no paramétricos utilizan funciones de suavización para obtener curvas continuas que intentan replicar los datos. Entre estos métodos se encuentran la familia de curvas spline y los suavizadores.

Easa et al. (1998) propusieron un método de cálculo de la geometría vertical de un camino que consideró dos pasos: la identificación de los puntos de inicio y término de la curva vertical y el ajuste de rectas y curvas mediante regresión lineal y spline cúbica, respectivamente. Utilizaron datos obtenidos mediante topografía tradicional con datos espaciados entre 0,5 y 20 m para representar con la menor cantidad de datos posibles las cotas del alineamiento utilizado como ejemplo de cálculo. Posteriormente, Easa (1999) aplicó el modelo de Easa et al. (1998) a curvas verticales aisladas para estimar sus parámetros. Utilizó una distancia fija de 5 m y obtuvo el principio y fin de la curva de manera visual. Para estimar la geometría de la curva vertical utilizó optimización lineal para minimizar la diferencia entre datos de elevación de terreno y la elevación que se obtiene del diseño geométrico de la curva vertical. Hu et al. (2004) mejoraron el algoritmo de optimización de Easa (1999), pero no estimaron los parámetros de las curvas verticales. Posteriormente, Easa (2008) introdujo una variable binaria para corregir el problema

de discontinuidad entre la curva y sus tangentes de entrada y salida presentes en los algoritmos de Easa (1999) y Hu et al. (2004).

Ben-Arieh et al. (2004) calcularon el perfil longitudinal de un camino utilizando regresión de mínimos cuadrados y lo ajustaron a una función spline bicúbica. Utilizaron datos de campo obtenidos con un vehículo instrumentado con receptor GNSS que circuló a 100 km/h. Extrajeron datos cada 1 s con distancia variable, para luego estimar la distancia y la altura absoluta. Castro et al. (2006) calcularon el perfil longitudinal de un camino utilizando una función de suavización spline cúbica. Utilizaron datos de campo obtenidos con un vehículo instrumentado con GPS que circuló a 80 km/h. Extrajeron datos cada 20 m y estimaron la distancia y altura absolutas.

Easa y Kikuchi (2009) aplicaron un modelo generalizado de optimización lineal que involucró la elevación del inicio y final de la curva vertical y pendiente de las tangentes de entrada y salida para obtener la geometría de curvas verticales. El método se basó en la minimización del error cuadrático medio entre el perfil estimado y los datos de campo. Bajo la lógica de los modelos de Easa et al. (2008), Easa (2009) estimó el largo de la curva vertical, el largo y pendiente de las tangentes y la curvatura vertical de curvas verticales aisladas simétricas, aisladas asimétricas y sucesivas. Utilizó datos con una distancia fija de 20 m. Karamanou et al. (2009) calcularon el perfil longitudinal de un camino utilizando diagramas de pendiente ajustados mediante mínimos cuadrados. Utilizaron datos de campos obtenidos con un vehículo instrumentado con GPS. Estimaron el inicio y fin de las tangentes y las curvas verticales, la pendiente de las tangentes y el largo de las curvas verticales (convexas y cóncavas).

Easa y Wang (2010) calcularon la geometría de un alineamiento vertical minimizando el error cuadrático medio entre el perfil estimado y los datos de campo. Utilizaron datos obtenidos con un vehículo instrumentado con GPS a una distancia fija de 20 m. Desarrollaron un modelo para curvas verticales aisladas donde estimaron el largo de cada curva y un modelo para el perfil longitudinal donde estimaron los parámetros óptimos de las curvas verticales y sus tangentes para garantizar la continuidad del trazado geométrico.

Di Mascio et al. (2012) calcularon la geometría de curvas horizontales y verticales mediante mínimos cuadrados. Utilizaron datos obtenidos con un vehículo instrumentado con un receptor GNSS. En el alineamiento vertical, estimaron el perfil longitudinal del camino identificando el largo y la curvatura de las curvas verticales y el largo de las tangentes.

Holgado-Barco et al. (2014) utilizaron datos obtenidos con un vehículo instrumentado con un receptor GNSS y LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), con el cual obtuvieron una nube de puntos con las cotas de la calzada. Luego los segmentaron cada 1 m usando un análisis de componentes principales, para luego construir un diagrama de pendientes y peraltes. Identificaron el eje de la ruta y a partir de dicho eje obtuvieron un diagrama de pendiente suavizado LOWESS. Finalmente obtuvieron cotas, peraltes y longitudes, pero no los parámetros de las curvas verticales.

Higuera de Frutos y Castro (2017) estimaron los parámetros de curvas verticales minimizando el error cuadrático medio entre las cotas verdaderas y las cotas derivadas de interpolación entre puntos vecinos. Aplicaron su procedimiento con datos obtenidos con un vehículo instrumentado con un odómetro óptico (distancia), un clinómetro (pendiente longitudinal) y un receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) instalado en un vehículo que circuló a una velocidad entre 50 y 80 km/h. Obtuvieron datos cada 10 m con odómetro y clinómetro cada 0,9 y 2 m con el receptor GNSS. Estimaron en base a diagramas de pendientes la longitud de las tangentes, largo de curva y curvatura vertical.

Pu et al. (2019) desarrollaron un método analítico iterativo donde estimaron la geometría vertical de alineamientos ferroviarios mediante mínimos cuadrados. Identificaron curvas verticales y tangentes a partir del cambio de curvatura. Estimaron la elevación, curvatura vertical y longitud de curvas verticales y la elevación, pendiente y longitud de tangentes.

Cartes et al. (2021) siguieron un procedimiento similar al de Holgado-Barco et al. (2014) aplicado a curvas verticales convexas. Construyeron diagramas de pendientes, para posteriormente aplicar una suavización exponencial simple. Song et al. (2021) desarrollaron un método de segmentación para identificar los elementos verticales de un camino y determinar sus

parámetros geométricos usando mínimos cuadrados. Utilizaron los mismos datos que Hu et al. (2004). Estimaron la longitud de la curva vertical, la altura y pendiente de las tangentes de las curvas verticales aisladas y sucesivas.

2.4 Conclusiones

La literatura presenta dos enfoques para el análisis del trazado vertical en base a datos de terreno: uno, la obtención de las cotas del alineamiento vertical, en que las variables de interés son las cotas del perfil, la pendiente longitudinal y la localización de curvas verticales; y otro la obtención de los parámetros geométricos de las curvas verticales.

Los autores utilizan espaciamientos fijos de puntos de terreno entre 0,5 y 20 m, no se encontraron trabajos que analicen en función de distintos espaciamientos de los puntos topográfico y aplicación de diferentes tipos y constantes de suavizado. Los datos son obtenidos mediante regresión paramétrica y no paramétrica y se aplican técnicas de suavizado. Los primeros aplican técnicas de mínimos cuadrados para estimar expresiones analíticas y los segundos usan suavizadores.

Si bien estos métodos optimizan el error entre los datos de terreno y un eje longitudinal y vertical continuo, no incorporan la variabilidad producto de las fuentes de incertidumbre de los parámetros. Así mismo, al utilizar una única función de suavización, no analizan la variabilidad ocasionada por la elección del suavizador y de los parámetros de suavización.

No se encontraron trabajos de campo para el levantamiento de la información de terreno utilizando fotogrametría con UAV que permite la selección de distintos espaciamientos en un único levantamiento y proceso fotogramétrico, entregando una nube de puntos densa.

CAPÍTULO 3 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

3.1 Introducción

Este capítulo muestra las características del tramo de estudio; el procedimiento utilizado para el levantamiento de información de terreno; la estimación de los parámetros geométricos (KAL) y finalmente un análisis de los resultados de los parámetros KAL de la CVC.

3.2 Procedimiento de trabajo

3.2.1 Ubicación del tramo de estudio

La ubicación del tramo en estudio se encuentra en la Ruta N-50 que une las comunas de San Nicolás y Ninhue; en las provincias del Itata y Punilla, respectivamente; en la Región de Ñuble, Chile.

La elección del tramo fue un camino bidireccional pavimentado de 7,0 m de ancho. En él se identifica una CVC, contenida en un tramo recto de 863 m de largo. En la Figura 3.2 se muestra el emplazamiento del tramo en estudio.

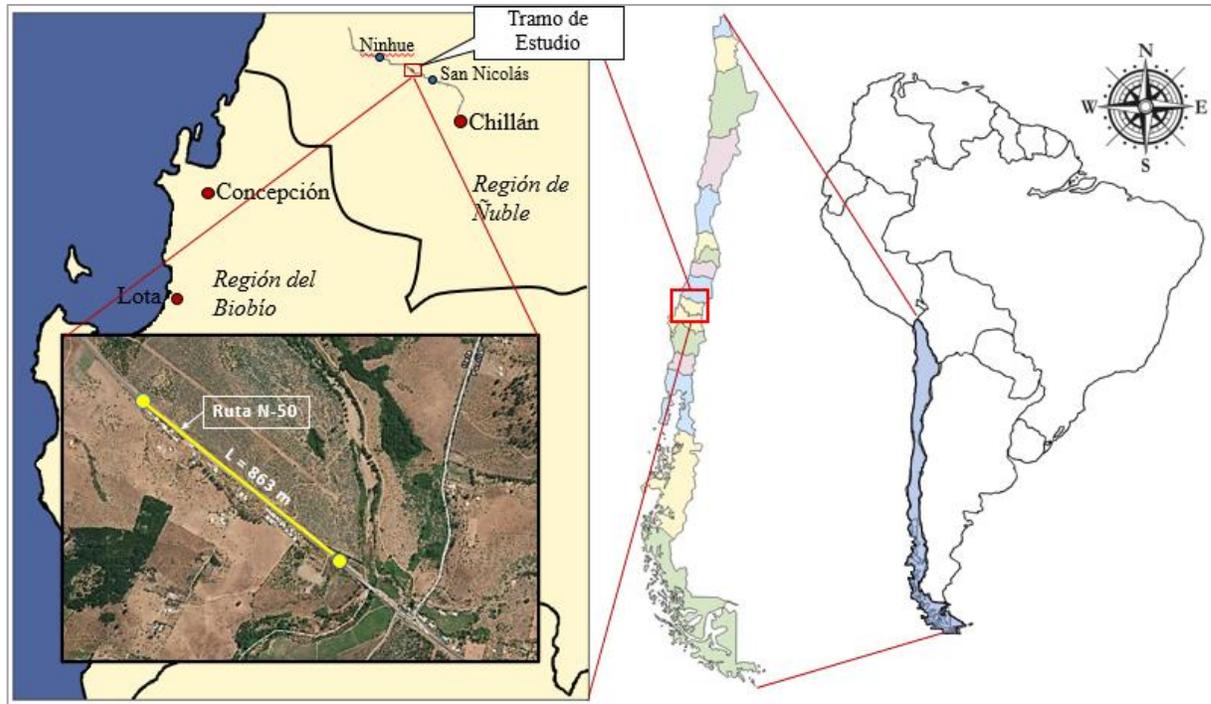


Figura 3.1: Emplazamiento del tramo en estudio

3.3 Levantamiento de información en terreno

El procedimiento para levantar los datos de terreno se dividió en cuatro pasos. Primero se determinó el tramo a levantar sobre una calzada pavimentada, con demarcación en el eje en buen estado; que sea una recta y que contenga una curva vertical en cresta (CVC).

Se planificó un vuelo fotogramétrico utilizando un UAV en una faja de 863 m de largo y 95 m de ancho, donde está contenida la CVC. Se utilizaron 3 líneas de vuelo. La línea central se trazó por el eje de la calzada y las otras dos a la izquierda y a la derecha de la línea central. La altura del vuelo fue de 40 m (ver Tabla 3.1), considerando que la incerteza se reduce cuando la altura es superior a 10 m (Daponte et al., 2017). Esto permitió tener imágenes orto rectificadas del terreno con una precisión (Ground Sample Distance, GSD por sus siglas en inglés) de 2 cm para el bloque fotogramétrico (ortofotomosaico). El vuelo tuvo una duración de 11 min y se obtuvieron 375 imágenes georreferenciadas; cubriendo una superficie de 10,8 hectáreas.

Tabla 3.1: Parámetros del vuelo fotogramétrico con UAV

Parámetro de configuración	Valor
Altura de Vuelo (m)	40
Traslape Longitudinal (%)	60
Traslape Transversal (%)	70
Sentido de Vuelo	Longitudinal al eje de la calzada
Cantidad de Líneas de Vuelo	3 (Borde Izquierdo; Eje; Borde Derecho)

Las imágenes se procesaron mediante un software de procesamiento de imágenes para fotogrametría digital. Este software utiliza un ajuste de bloque para reconstruir la posición y orientación exacta de la cámara para cada imagen adquirida. El software también verifica los puntos de coincidencia y calcula las coordenadas 3D (x, y, z). Con estos puntos se formó una red irregular triangulada con el fin de obtener el DSM (Digital Surface Model, por sus siglas en inglés), en la Figura 3.2 se muestra una porción del DSM.





Figura 3.2: DSM del proceso fotogramétrico

Luego, se importó el archivo de la nube de puntos del DSM a un software de diseño asistido por computadora (CAD) y se elaboró un perfil longitudinal de terreno por el eje de la carretera. Esto permitió extraer los datos de desplazamiento longitudinal (D_m , en m) y elevaciones (en m) cada 2, 5 y 10 m.

3.4 Procesamiento de los datos de terreno

El DSM contiene 25.289.815 de puntos 3D, distribuidos en el área del terreno levantado (ver Figura 3.2). Se procedió a trabajar en un software CAD, el que permitió importar el DSM y elaborar una superficie para luego identificar el eje de la calzada para obtener un perfil longitudinal por el eje del tramo definido. Sobre este perfil longitudinal se extraen las cotas del terreno para los espaciamientos de 2, 5 y 10 m.

En los perfiles longitudinales se identificaron y eliminaron los datos altimétricos anómalos, identificados a ojo desnudo (ver Figura 3.3). Estas anomalías se producen por la calidad de la

imagen, el objeto fotografiado y el método de coincidencia en el proceso fotogramétrico digital (Rosnell y Honkavaara, 2012).

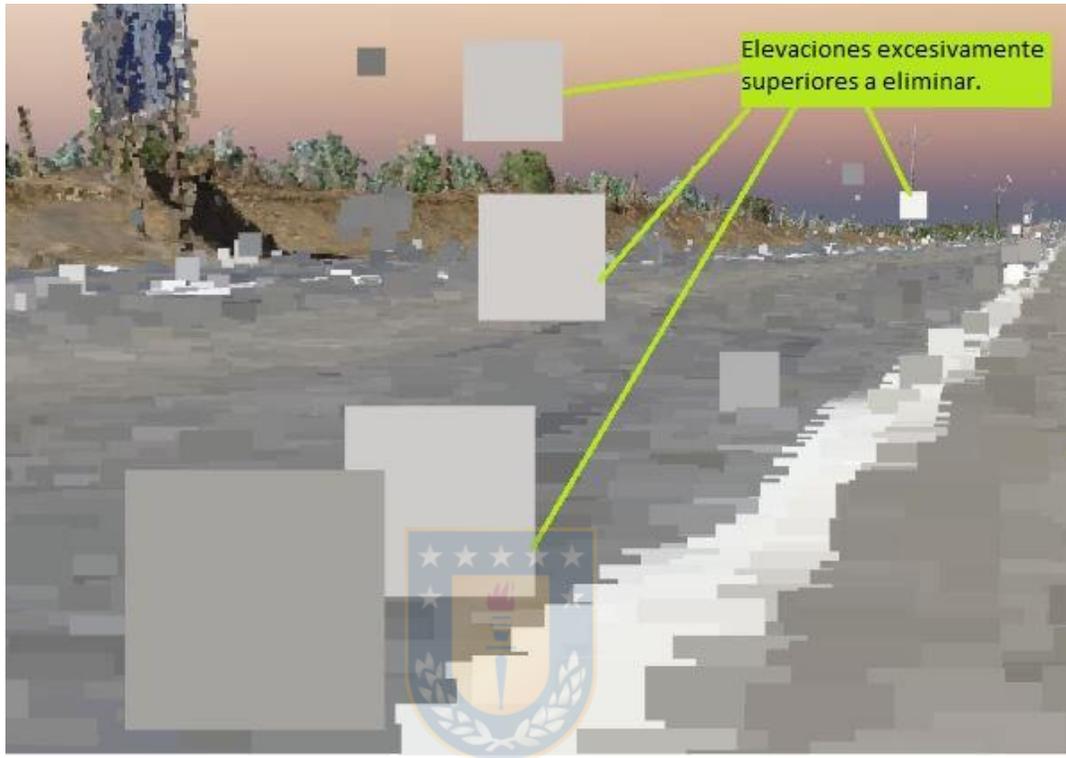


Figura 3.3: Datos altimétricos anómalos identificados a ojo desnudo

Para cada uno de los Dm y elevaciones se calculó la pendiente entre pares de puntos y se elaboraron los diagramas de pendiente (Ver Figura 3.4).

3.5 Retro cálculo de los parámetros geométricos

Para estimar los parámetros geométricos de la CVC se construyeron diagramas de pendientes y se aplicó SES, DES y TES con diversas combinaciones de parámetros de nivel, tendencia y estacionalidad. Los diagramas de pendientes se obtienen a partir del perfil longitudinal de terreno en el eje de la calzada.

Para calcular los parámetros geométricos K, A y L (KAL), primero se identificaron los puntos singulares P₁, P₂, P₃, P₄ y P₅. (Ver Figura 3.4). Estos puntos permiten delimitar la tangente de entrada (L₁ = P₁ a P₂), la longitud de la curva (L = P₂ a P₄), la tangente de salida (L₂ = P₄ a P₅).

La longitud de la curva (L en m) se determinó mediante la línea de tendencia en el tramo (L) del diagrama de pendiente suavizado. En cada diagrama de pendientes se obtuvieron las pendientes de aproximación (I₁) y salida (I₂). Luego se obtuvo el parámetro A mediante la Ecuación 2.1 y el parámetro K con la Ecuación 2.2.

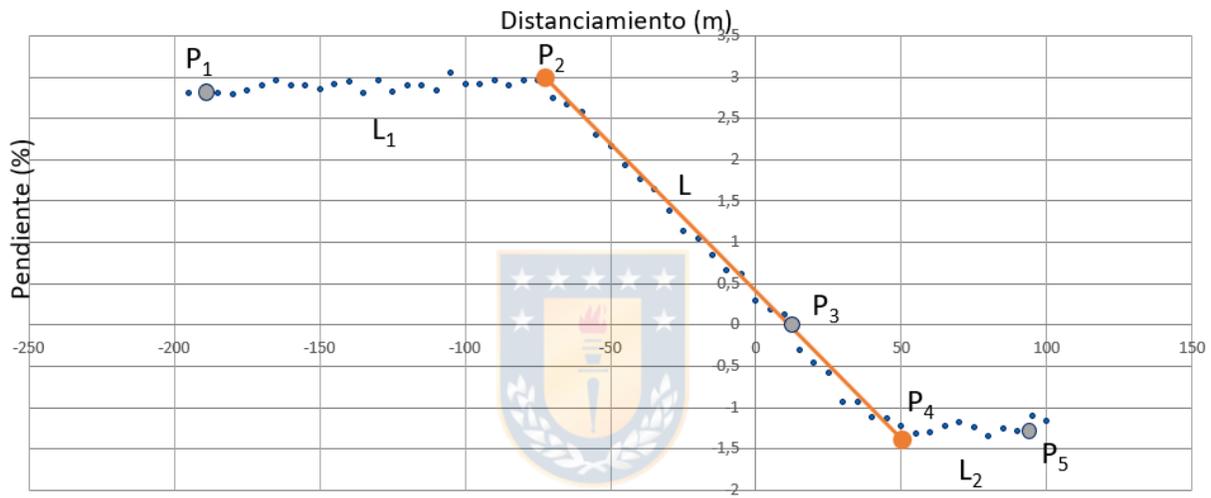


Figura 3.4: Puntos singulares de la CVC en el diagrama de pendientes

Los diagramas de pendientes se suavizaron con los suavizadores SES, DES y TES de las Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 (Buja et al. 1985; Gardner, 1985).

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(X_{t-1} - F_{t-1}) \tag{3.1}$$

$$FT_t = S_{t-1} + T_{t-1} \quad ; \quad S_t = FT_t + \alpha(X_t - FT_t) \quad ; \quad T_t = \beta(FT_t - FT_{t-1} - T_{t-1}) \tag{3.2}$$

$$F_{t+m} = (S_t + T_t m)I_{t-L-m} \quad ; \quad S_t = \alpha \frac{X_t}{I_{t-1}} + (1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1}) \tag{3.3}$$

$$T_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad ; \quad I_t = \gamma \frac{X_t}{S_t} + (1 - \gamma)I_{t-1}$$

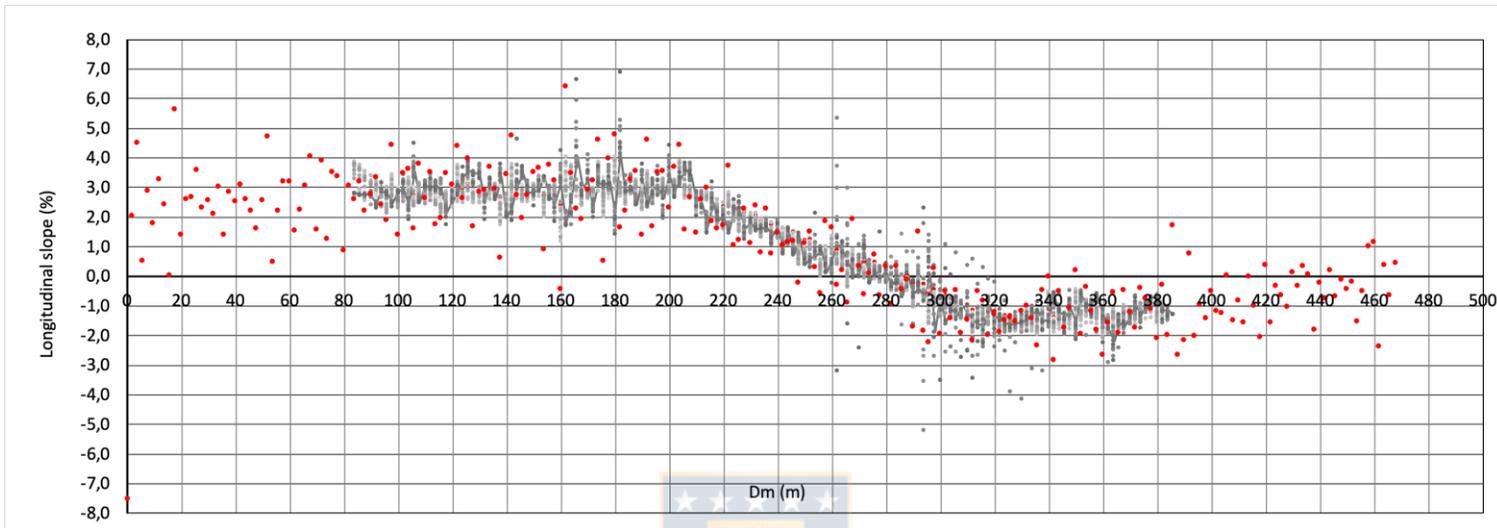
En las Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3; F_t es el pronóstico de la variable X en el período t; F_{t-1} es el pronóstico de la variable “x” en el período anterior a t; X_t es el valor a suavizar en el período t; FT_t es la componente de tendencia en el período t; S_t es el valor medio del pronóstico en el período t; T_t es la estimación de tendencia en el período t; L es el número de períodos del patrón estacional; m es el número de períodos futuros a pronosticar; I_t es la estimación estacional en el período t; α , β y γ son parámetros de suavización de cada método.

En cada suavización se aplicaron múltiples combinaciones de los parámetros α , β y γ según el tipo de suavizador. Se obtuvieron 144 diagramas de pendientes suavizados. La Tabla 3.2 resume el rango de parámetros empleados y el número de suavizaciones realizadas según el espaciamiento de los datos.

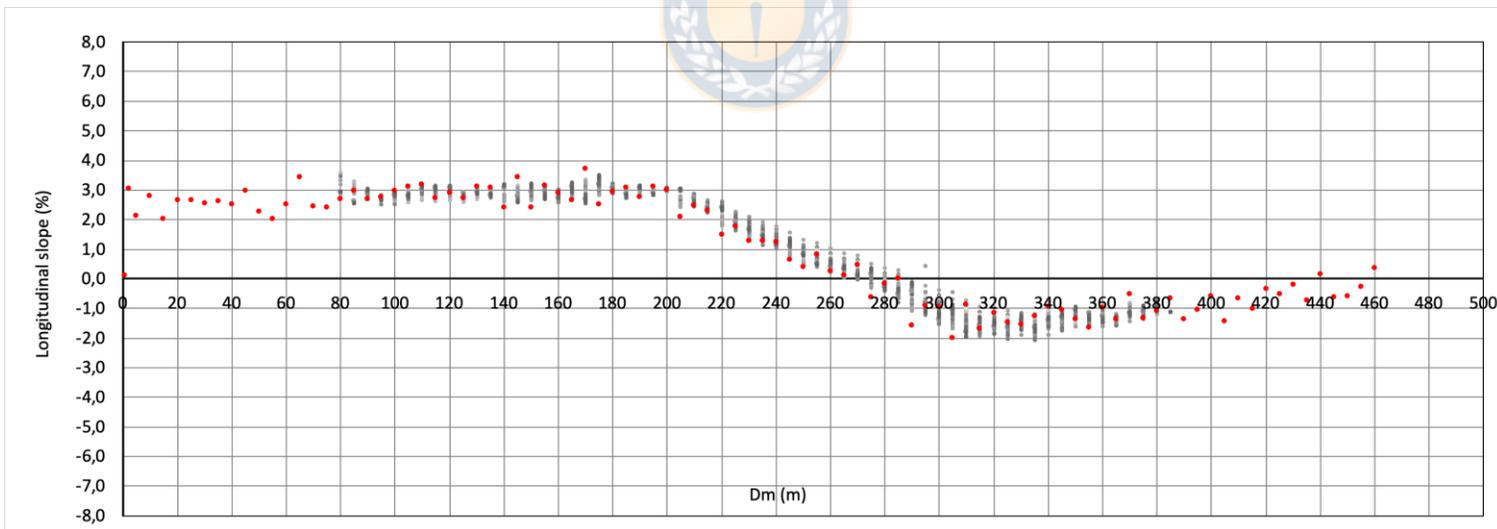
Tabla 3.2: Rango de parámetros de suavización y número de suavizaciones según el espaciamiento de los datos

Suavizador	Parámetros de los suavizadores			Número de suavizaciones según espaciamiento de datos		
	Constante (α)	De tendencia (β)	Estacionalidad (γ)	2 m	5 m	10 m
SES	0,15 – 1,90	-----	-----	10	10	14
DES	0,10 – 1,00	0,05 – 0,90	-----	10	10	10
TES	0,20 – 0,60	0,10 – 0,60	0,10 – 0,60	10	40	30

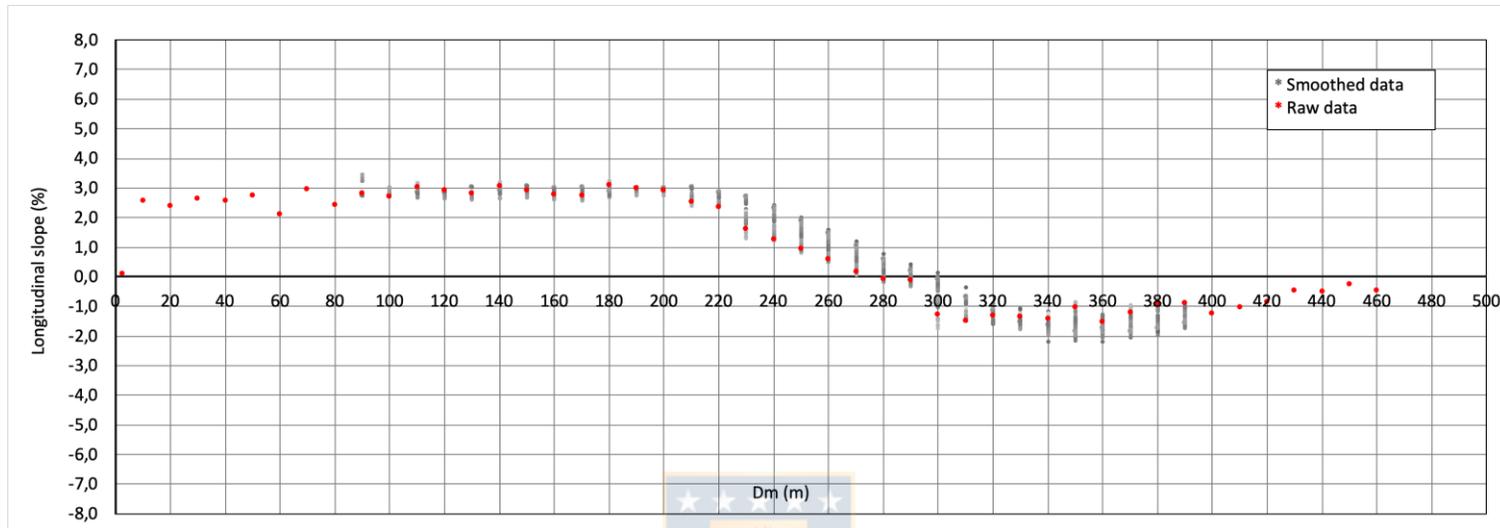
En la Tabla 3.2 se aprecia que para un espaciamiento de 2 m se obtuvieron 30 suavizaciones; 10 SES, 10 DES y 10 TES. Para el espaciamiento de 5 m se obtuvieron 60 suavizaciones; 1° SES, 10 DES y 40 TES y para el espaciamiento de 10 m se obtuvieron 54 suavizaciones; 14 SES, 10 DES y 30 TES. Se graficaron los datos obtenidos por suavización y espaciamiento; esto se muestra en la Figura 3.6, donde se ven los datos en bruto para cada espaciamiento (rojo), y los puntos suavizados obtenidos una vez aplicados los tres suavizadores (gris).



a) Diagrama de pendiente con espaciamiento de datos a 2 m



b) Diagrama de pendiente con espaciamiento de datos a 5 m

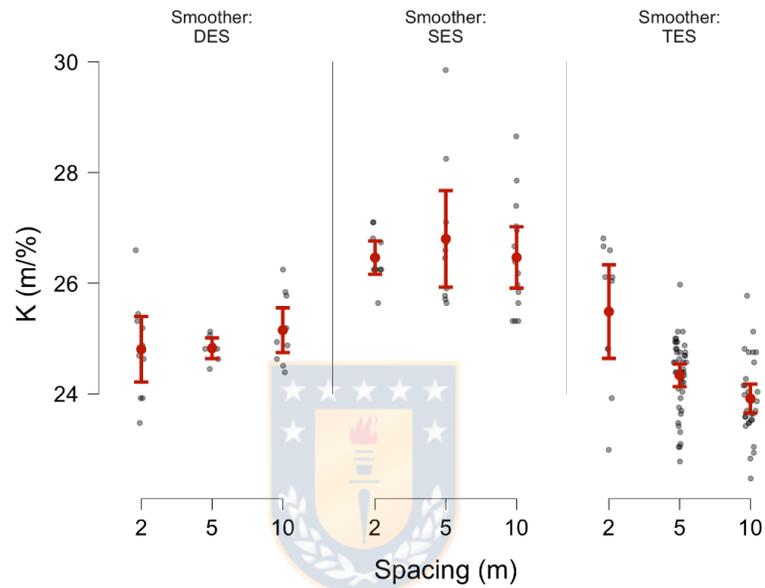


c) Diagrama de pendiente con espaciamiento de datos a 10 m

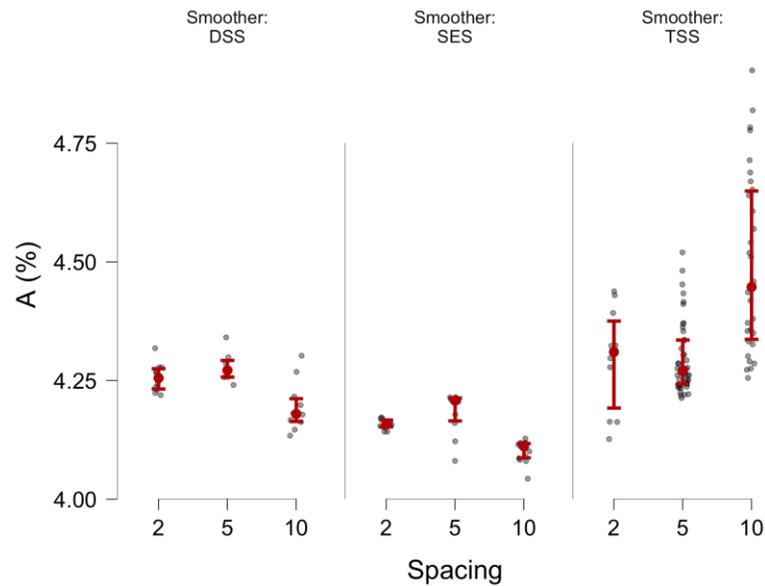
Figura 3.5: Conjunto de diagramas de pendientes con datos crudos (rojo) y suavizados para espaciamientos de 2, 5 y 10 m (gris)

3.6 Análisis de los parámetros KAL

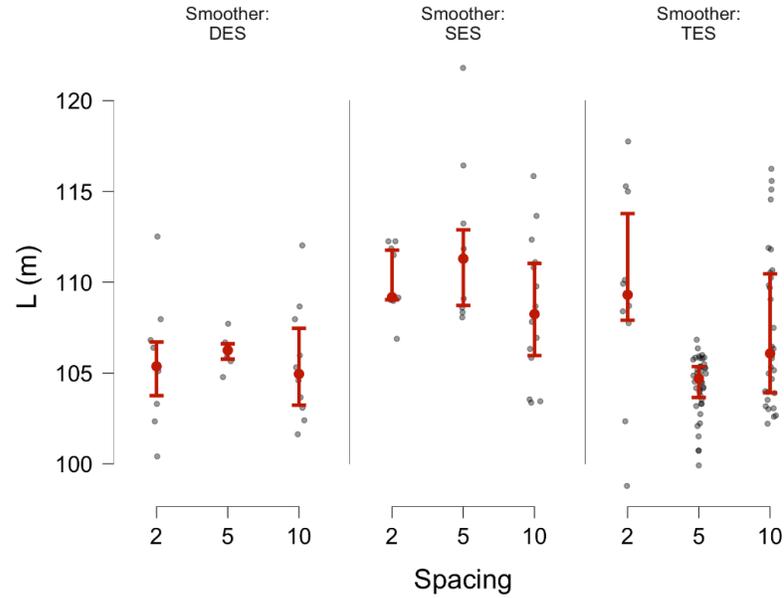
Los resultados obtenidos para los parámetros KAL se muestran en la Figura 3.7. Se aprecia que tanto el espaciamiento como la elección del tipo de suavizador poseen efectos combinados en el valor estimado de los parámetros KAL y en su varianza.



a) Valores del parámetro K (m/%)



b) Valores del parámetro A (%)



c) Valores del parámetro L (m)

Figura 3.6: Parámetros KAL clasificados por espaciamento y tipo de suavizador

Se estimó la estadística descriptiva de los parámetros KAL desagregada por suavizador y espaciamento. La Tabla 3.3 muestra los estadígrafos de los parámetros KAL para estos tres casos. Se aplicó la prueba de normalidad de Jarque – Bera (JB), que considera los factores de forma curtosis (Ck) y asimetría (Cs), usando la Ecuación 3.4 (Jarque y Bera, 1987). El estadístico J-B se distribuye Chi-cuadrado con 2 grados de libertad. La hipótesis de normalidad se verifica si J-B es mayor que el valor crítico (JBc). Para muestras menores a 500 datos, el parámetro JBc se obtiene con el polinomio de Lawford (2005) para un nivel de confianza del 95 % según la Ecuación 3.5. En la Ecuación 3.5, $q^\alpha(n)$ es JBc para un tamaño de muestra “n” y un nivel de confianza “ α ”, q_∞^α es el valor asintótico de JBc, β_k son los coeficientes de calibración de Lawford (2005) y “u” es el término de error.

$$JB = \frac{n}{6} \left[Cs^2 + \frac{1}{4} (Ck - 3)^2 \right] \tag{3.4}$$

$$q^\alpha(n) = q_\infty^\alpha + \sum_{k=1}^9 \beta_k n^{-k} + u \tag{3.5}$$

Tabla 3.3: Estadígrafos de los parámetros KAL para cada suavizador y espaciamiento de datos

Variable	Tip Suavizador	Espac. (m)	N° Muestras	Mediana	Desv. St.	Mínimo	Q1	Median	Q3	Max	Range	Skewness	Kurtosis	JB	JBc	Conclusión
K (m/%)	SES	2	10	26,5	0,46	25,6	26,2	26,2	26,9	27,1	1,5	0,050	-0,528	5,2	2,5	Normal
	DES	2	10	24,8	0,91	23,5	23,9	24,8	25,3	26,6	3,1	0,481	0,492	3,0	2,5	Normal
	TES	2	10	25,5	1,29	23,0	24,6	26,1	26,6	26,8	3,8	-0,875	-0,330	5,9	2,5	Normal
	SES	5	10	26,8	1,34	25,6	25,8	26,5	27,4	29,9	4,2	-0,347	-0,322	4,8	2,5	Normal
	DES	5	7	24,8	0,23	24,5	24,6	24,8	25,1	25,1	0,7	1,556	2,238	3,0	2,5	Normal
	TES	5	43	24,3	0,68	22,8	23,9	24,5	24,8	26,0	3,2	-0,485	0,145	16,3	5,6	Normal
	SES	10	14	26,5	1,02	25,3	25,6	26,3	27,1	28,7	3,3	0,586	-0,770	9,1	3,2	Normal
	DES	10	10	25,2	0,62	24,4	24,6	25,0	25,8	26,2	1,9	0,739	-0,069	4,8	2,5	Normal
	TES	10	30	23,9	0,72	22,5	23,5	23,8	24,3	25,8	3,3	0,460	0,485	9,0	4,4	Normal
A (%)	SES	2	10	4,2	0,01	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	0,0	-1,779	1,406	6,3	2,5	Normal
	DES	2	10	4,3	0,03	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	0,1	0,000	-2,571	12,9	2,5	Normal
	TES	2	10	4,3	0,11	4,1	4,2	4,3	4,4	4,4	0,3	-0,610	-0,157	4,8	2,5	Normal
	SES	5	10	4,2	0,05	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2	0,1	1,054	1,070	3,4	2,5	Normal
	DES	5	7	4,3	0,03	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3	0,1	-1,432	1,132	3,4	2,5	Normal
	TES	5	43	4,3	0,08	4,2	4,2	4,3	4,3	4,5	0,3	1,281	0,938	19,4	4,9	Normal
	SES	10	14	4,1	0,02	4,0	4,1	4,1	4,1	4,1	0,1	1,089	0,487	6,5	3,2	Normal
	DES	10	10	4,2	0,05	4,1	4,2	4,2	4,2	4,3	0,2	-1,369	2,047	3,5	2,5	Normal
	TES	10	30	4,5	0,19	4,3	4,3	4,4	4,7	4,9	0,6	0,524	-0,934	20,7	4,4	Normal
L (m)	SES	2	10	110,0	1,82	106,9	109,0	109,2	112,0	112,3	5,4	-0,043	-1,062	6,9	2,5	Normal
	DES	2	10	105,6	3,31	100,4	103,1	105,4	107,1	112,5	12,1	0,638	1,445	1,7	2,5	Non-normal
	TES	2	10	109,4	5,81	98,8	106,4	109,3	115,1	117,8	19,0	0,410	-0,081	4,2	2,5	Normal
	SES	5	10	112,0	4,31	108,1	108,5	111,3	114,0	121,8	13,7	0,088	0,799	2,0	2,5	Non-normal
	DES	5	7	106,2	0,92	104,8	105,7	106,3	106,7	107,7	2,9	1,486	0,687	4,1	2,5	Normal
	TES	5	43	104,3	1,58	99,9	103,5	104,7	105,4	106,8	6,9	1,067	0,365	20,6	5,6	Normal
	SES	10	14	108,5	3,93	103,4	105,3	108,2	111,4	115,9	12,5	0,860	0,283	6,0	3,2	Normal
	DES	10	10	105,5	3,23	101,6	102,9	105,0	108,1	112,0	10,4	0,270	-0,790	6,1	2,5	Normal
	TES	10	30	107,5	4,33	102,2	103,8	106,1	110,6	116,3	14,0	0,652	-0,786	20,0	4,4	Normal

3.7 Conclusiones

Se obtuvieron los parámetros geométricos de la curva vertical para los espaciamientos de 2, 5 y 10 m y se identificaron los parámetros KAL para cada distanciamiento. La cantidad de suavizaciones obtenidas para 2 m, considerando el suavizado simple, doble y de Winters; fue de 30; para 5 m fue de 60; para 10 m fue de 54. Se obtuvieron 144 suavizaciones en total.

Al aumentar el espaciamiento se reduce el ruido de los datos de pendientes, pero se pierden datos para el cálculo de los parámetros geométricos de la curva vertical.

Se determinó que el parámetro K varía entre 22,5 m/% y 29,9 m/%, y su máxima desviación estándar es de 1,34 m/%; el parámetro A varía entre 4,0 y 4,9 %, y su máxima desviación estándar es de 0,19 %; el parámetro L varía entre 98,8 m y 121,8 m y su máxima desviación estándar es de 5,8 m; bajo el criterio de normalidad de Jarque – Bera prácticamente la totalidad de los parámetros KAL se ajustan a una distribución de probabilidades normal. Este resultado valida la aplicación del análisis de varianza. En base a estos resultados, se verificó que los valores de los parámetros KAL están influenciados por la elección de la técnica de suavización y el espaciamiento entre los datos de elevación.

Los resultados obtenidos en el retro - cálculo de los parámetros KAL evidencian que son sensibles al espaciamiento entre los datos de elevación y al método de suavización de los diagramas de pendientes

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se analiza primero el efecto conjunto del espaciamiento y suavizador con algoritmo Boosting Regression (BR). Se estima la estadística descriptiva de los parámetros KAL desagregada por suavizador y espaciamiento. Luego se realiza el análisis múltiple de varianza (ANOVA) para determinar el efecto individual y combinado del espaciamiento y tipo de suavizador sobre los parámetros KAL; y, finalmente se aplicó a los parámetros KAL el algoritmo de clasificación KNN para cada espaciamiento de los datos por separado para identificar el tipo de suavización que explica mejor los valores de los parámetros KAL.

4.2 Sensibilidad de los parámetros KAL al espaciamiento y suavizadores

Los resultados obtenidos en el retro - cálculo de los parámetros KAL evidencian que son sensibles al espaciamiento entre los datos de elevación y al método de suavización de los diagramas de pendientes. Por lo anterior, resulta necesario analizar la magnitud y naturaleza del efecto del espaciamiento y tipo de suavizador en los parámetros KAL. Para lograr este objetivo, se aplicaron los siguientes análisis: a) análisis de regresión de los parámetros KAL respecto del espaciamiento y tipo de suavizador mediante el método Boosting Regression (BR); b) análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto del espaciamiento entre los datos de elevación y el método de suavización sobre la media de los parámetros KAL; y c) análisis de clasificación de los parámetros KAL usando el método de K-Nearest Neighbors (KNN). El propósito de estos análisis fue determinar la importancia relativa del efecto sobre los parámetros KAL del espaciamiento entre los datos de elevación y el método de suavización seleccionado, y determinar cuál método de suavización elimina falsos positivos en la estimación de los parámetros KAL.

4.3 Análisis del efecto conjunto del espaciamiento y suavizador

Para analizar el efecto del espaciamiento y suavizador en los parámetros KAL, se realizó un análisis con el algoritmo de aprendizaje de máquina BR. Para ello se utilizó el 63,9 % de los datos para entrenar el algoritmo, el 16,7 % para validar y el 19,4 % restante para testear el algoritmo.

Tabla 4.1: Efecto del espaciamiento y suavizador en los parámetros KAL mediante Boosting Regression (BR)

Parámetro	Error medio cuadrático (MSE)	Importancia relativa	
		Suavizador	Espaciamiento
K (m/%)	0,644	89,1	10,9
A (%)	0,643	85,4	14,6
L (m)	0,716	85,9	14,1

De la Tabla 4.1 se concluyó que la influencia relativa del tipo de suavizador y sus parámetros sobre los parámetros KAL, oscila entre un 85 y 90 % y del espaciamiento entre un 10 y 15 %.

4.4 Análisis de varianza de los parámetros KAL

Con el análisis de varianza múltiple (ANOVA) se determinó el efecto individual y combinado del espaciamiento y tipo de suavizador sobre los parámetros KAL. Los resultados se resumen en la Tabla 4.2. Se aprecia que el espaciamiento y el tipo de suavizador, por separado y/o combinados, afectan significativamente la media de los parámetros KAL, debido a que el valor-p es inferior al 5 % en todos los casos. Por tanto, se concluyó que el espaciamiento y el suavizador empleado, individualmente y combinados, afectan de manera estadísticamente significativa a los valores de los parámetros KAL.

Tabla 4.2: ANOVA de los parámetros KAL respecto del espaciamiento, tipo de suavizador y parámetros de suavizado

Parámetro	Efecto	Suma de cuadrados	df	Media Cuadrática	Valor-F	Valor-p
K (m/%)	Espaciamiento	14,475	2	7,238	10,6	<0,001
	Suavizador	112,178	2	56,089	82,4	<0,001
	Espaciamiento*Suvavizador	14,566	4	3,641	5,3	<0,001
	Residuales	91,933	135	0,681	-	-
A (%)	Espaciamiento	0,222	2	0,111	10,1	<0,001
	Suavizador	1,359	2	0,679	62,0	<0,001
	Espaciamiento*Suvavizador	0,580	4	0,145	13,2	<0,001
	Residuales	1,479	1	0,011	-	-
			35			
L (m)	Espaciamiento	142,239	2	71,120	6,2	0,003
	Suavizador	369,990	2	184,995	16,1	<0,001
	Espaciamiento*Suvavizador	278,978	4	69,744	6,1	<0,001
	Residuales	1548,030	135	11,467	-	-

Al examinar los valores-F, se concluye que el suavizador explica en mayor medida la media de los parámetros KAL que el espaciamiento por sí mismo. En efecto, en el parámetro K el valor-F asociado al suavizador resultó aproximadamente 7,8 veces mayor que el valor-F asociado al espaciamiento; en el caso del parámetro A, dicha relación alcanzó 6,1 veces; y en el caso del parámetro L dicha relación fue de 2,6 veces. Este resultado valida el resultado obtenido mediante BR. Por ello, no se recomienda desechar el efecto del espaciamiento en los parámetros KAL. Asimismo, la elección de un único suavizador y un único espaciamiento, no garantiza que los parámetros KAL representen los valores reales en una curva vertical.

4.5 Análisis de clasificación de los parámetros KAL

Se aplicó a los parámetros KAL el algoritmo de clasificación KNN para cada espaciamento de los datos por separado. El propósito fue identificar el tipo de suavización que explica mejor los valores de los parámetros KAL. Para ello se utilizaron las curvas ROC (Receiver Operating Characteristic), que permiten detectar la relación entre los falsos positivos y los verdaderos positivos de un modelo. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3 y la Figura 4.1.



Tabla 4.3: Métrica de evaluación de curvas ROC según espaciamiento

Espaciamiento (m)	Parámetro	Modelo	Precisión	AUC
2	K (m%)	SES	-	-
		DES	1.000	0.875
		TES	0.500	0.625
		Promedio	0.833	0.750
	A (%)	SES	0.500	0.750
		DES	1.000	0.750
		TES	1.000	0.688
		Promedio	0.833	0.729
	L (m)	SES	0.667	0.875
		DES	0.333	0.900
		TES	NaN	0.833
		Promedio	0.278	0.869
5	K (m%)	SES	1.000	1.000
		DES	-	-
		TES	1.000	1.000
		Promedio	1.000	1.000
	A (%)	SES	1.000	1.000
		DES	NaN	0.773
		TES	0.889	0.922
		Promedio	0.843	0.898
	L (m)	SES	1.000	1.000
		DES	0.000	0.389
		TES	0.750	0.542
		Promedio	0.636	0.644
10	K (m%)	SES	0.667	0.762
		DES	1.000	0.750
		TES	0.833	0.900
		Promedio	0.817	0.804
	A (%)	SES	1.000	1.000
		DES	1.000	0.667
		TES	0.750	0.750
		Promedio	0.850	0.806
	L (m)	SES	0.500	0.500
		DES	-	-
		TES	0.333	0.400
		Promedio	0.417	0.450

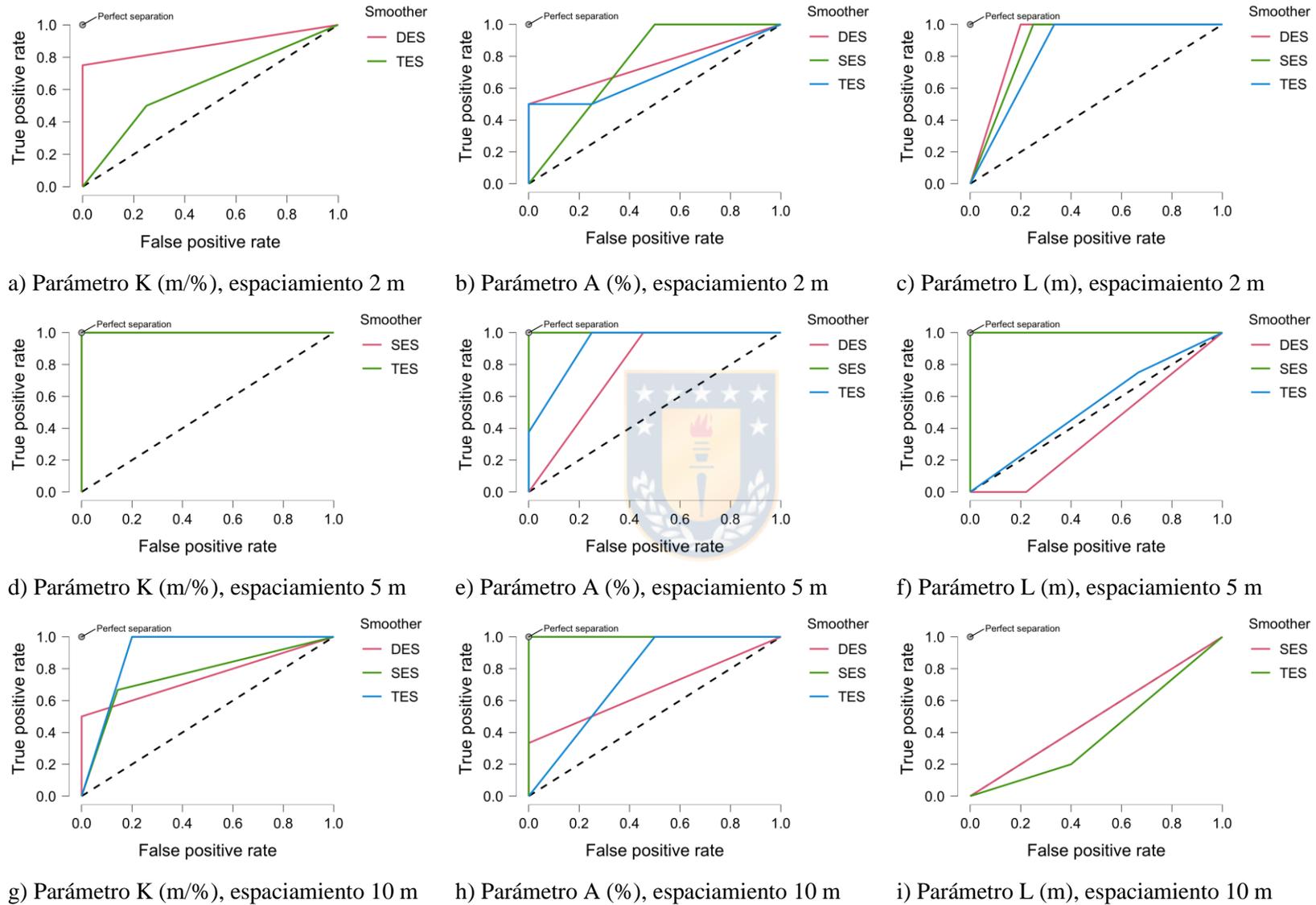


Figura 4.1: Curvas ROC de suavizado obtenidas con el algoritmo de clasificación KNN

A partir de la Figura 4.1 y de la Tabla 4.3 se concluyó que no existe un patrón definido que permita recomendar una técnica de suavización del diagrama de pendientes en particular. Para identificar los suavizadores más eficientes se analizó en conjunto la forma de las ROC, su precisión y el parámetro AUC (Area Under Curve). Se consideró como criterio que las curvas ROC con mayor precisión y AUC permiten detectar el suavizador más eficiente.

4.6 Conclusiones

El propósito de estos análisis fue determinar la importancia relativa del efecto sobre los parámetros KAL del espaciamiento entre los datos de elevación y el método de suavización seleccionado, y determinar cuál método de suavización elimina falsos positivos en la estimación de los parámetros KAL.

En el caso del parámetro K, para un espaciamiento de 2, 5 y 10 m, los suavizadores más eficiente son respectivamente, DES, SES y TES, puesto que los valores sus precisiones y AUC son los mayores para cada espaciamiento. En el caso del parámetro A, los suavizadores DES, TES y SES son los más eficientes para espaciamientos de 2, 5 y 10 m respectivamente. En el caso del parámetro L, para los tres espaciamientos el suavizador más eficiente es el SES.

Sin embargo, en el espaciamiento de 10 m el AUC alcanza un valor de 0.5, lo cual no es suficiente para concluir que el suavizador SES es más eficiente que los otros. Finalmente, es necesario resaltar que los suavizadores identificados en este análisis, no necesariamente son aquellos que inducen una menor varianza en los parámetros KAL.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

El propósito de este trabajo fue analizar la incerteza introducida en los valores de los parámetros geométricos de curvas verticales debido a: a) la densidad de puntos topográficos presentes en el perfil longitudinal del alineamiento; b) el método de suavización; y c) los parámetros de suavización. Para ello se diseñó un experimento en 4 etapas: a) obtención de datos a partir de fotogrametría digital obtenida con un UAV; c) elaboración de perfiles de pendiente longitudinal con suavizadores exponenciales simple, doble y triple para espaciamientos de 2, 5 y 10 m; y d) análisis de variabilidad mediante los métodos BR, ANOVA y KNN. A partir de los resultados se obtuvieron las conclusiones que se explican a continuación.

La tarea de obtener el perfil longitudinal en alzado de caminos existentes, así como los parámetros geométricos de las curvas verticales y pendientes longitudinales, ha sido objeto de estudio desde 1998 hacia el presente para contar con una representación actualizada de la geometría, modelar la velocidad de operación o conocer la distancia de visibilidad y analizar la consistencia. La tecnología para la obtención de datos topográficos ha evolucionado en el tiempo desde levantamientos mediante estaciones totales, GPS hasta sistemas LiDAR y fotogrametría digital.

El estado del arte no analiza el efecto del post - proceso de los datos sobre el resultado final, que es la parametrización del alineamiento vertical. Por ello, en este trabajo se identifica el efecto conjunto sobre los parámetros KAL del espaciamiento entre datos, del tipo de suavizador y de diversas combinaciones de parámetros de suavización.

Del análisis realizado se concluyó que dependiendo del espaciamiento, tipo de suavizador y parámetros de suavización: la media del parámetro K varía entre 23,9 y 26,8 m/% y su desviación estándar entre 0,5 y 1,34 m/%; la media del parámetro A varía entre 4,1 y 4,5 % y su desviación estándar entre 0,01 y 0,19 %; y la media del parámetro L varía entre 104,3 y 112,0 m y su desviación estándar entre 0,9 y 5,8 m.

El análisis mediante BR determinó que la importancia relativa del tipo de suavizador y su combinación de parámetros sobre la variabilidad de los parámetros KAL oscila entre 85,4 % y 89,1 %, en tanto que la importancia relativa del espaciamiento lo hace entre 10,9 % y 14,6 %. Este resultado se validó mediante un ANOVA, con el cual se determinó que el tipo de suavizador y su combinación de parámetros, y la interacción entre ellos, resultó estadísticamente significativa para explicar la variabilidad de los parámetros KAL. En particular se determinó que: para el parámetro K el valor-F asociado al suavizador resultó aproximadamente 7,8 veces mayor que el valor-F asociado al espaciamiento; en el caso del parámetro A, dicha relación alcanzó 6,1 veces; y en el caso del parámetro L dicha relación fue de 2,6 veces. Este resultado valida el resultado obtenido mediante BR.

A partir del análisis de clasificación con el método de KNN se obtuvieron curvas ROC para cada suavizador. Con este análisis se determinó que para cada parámetro KAL y los diferentes espaciamientos, los suavizadores más eficientes son distintos dependiendo del espaciamiento, no existiendo un patrón claro. No obstante, se pudo identificar que, en general, el SES resulta superior a DES y TES. Esto no necesariamente implica que este suavizador y su combinación de parámetros ofrezcan una menor varianza en los parámetros KAL.

Por lo anterior, se concluyó que la elección de un espaciamiento determinado y un suavizador determinado para el diagrama de pendientes, no garantiza que se obtengan los valores de los parámetros KAL, ni permite conocer su varianza.

Los resultados del retro cálculo de curvas verticales considerando la elección del espaciado o el tipo de suavizado, evidencian la alta incerteza epistémica del proceso. La elección arbitraria de cualquiera de estos modelos o parámetros condiciona significativamente el resultado, por lo que su elección debe ir precedida de un análisis de sensibilidad que permita contextualizar los resultados con una incerteza asociada a cada uno de los parámetros KAL predichos. Estos parámetros son importantes puesto que permiten analizar la geometría existente y mejorarla de ser necesario. Una variación de los resultados en el parámetro K, por ejemplo puede incidir en el resultado del cálculo de la distancia de parada en curvas verticales convexas.

Además, la elección arbitraria de un suavizador determinado y de sus parámetros condiciona la elección de posteriores modelos o parámetros en otros momentos de la metodología. Un ejemplo de esto se aprecia en cómo los suavizadores más eficientes son distintos dependiendo del espaciamiento, por lo que análisis no debería realizarse por separado, sino analizando todas las decisiones en conjunto.

Este resultado ofrece un cambio en la visión que hasta ahora se está desarrollando en el retro cálculo de los parámetros de curvas verticales en particular y de la geometría vial en general, puesto que evidencia la necesidad de analizar con detalle la incerteza asociada a las decisiones tomadas en cada proceso metodológico. Por tanto, ofrece una nueva perspectiva de los resultados del retro cálculo de parámetros geométricos obtenidos hasta ahora mediante los procedimientos descritos en el estado del arte.



REFERENCIAS

AASHTO (2018). **A Policy on Geometric Design of Highway and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C. Estados Unidos.

Ben-Arieh, D., Chang, S., Rys, M. and Zhang, G. (2004). **Geometric modeling of highways using global positioning system data and B-spline approximation**. Journal of Transportation Engineering, 130(5), 632 – 636.

Buja, A., Hastie, T. and Tibshirani, R. (1985). **Linear smoothers and additive models**. The Annals of Statistics, 17(2), 453 – 510.

Cartes, P., Echaveguren, T. and Álvarez, P. (2021). **Effect of driving style on operating speed in crest vertical curves of two-lane highways**. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport (in press), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1680/jtran.19.00065>

Castro, M., Iglesias, L., Rodríguez-Solano, R. and Sánchez, J. (2006). **Geometric modelling of highways using global positioning system (GPS) data and spline approximation**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 14(4), 233 – 243.

Daponte, P., De Vito, L., Mazzilli, G., Picariello, F. and Rapuano, S. (2017). **A height measurement uncertainty model for archaeological surveys by aerial photogrammetry**. Measurement, 98, 192 – 198.

Di Mascio, P., Di Vito, M., Loprencipe, G. and Ragnoli, A. (2012). **Procedure to determine the geometry of road alignment using GPS data**. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 53, 1204 – 1217.

DJI (2017). **Manual de usuario V.1.8. Phantom 3 Professional**. Recuperado de <https://www.dji.com/phantom-3-pro>.

- Easa, S. (1999). **Optimum vertical curves for highway profiles**. Journal of Surveying Engineering, 125(3), 147 – 157.
- Easa, S. (2008). **Efficient method for estimating globally optimal simple vertical curves**. Journal of Surveying Engineering, 134(1), 33 – 37.
- Easa, S., Hassan, Y. and Karim, Z. (1998). **Establishing highway vertical alignment using profile field data**. ITE Journal, 68(8), 81 – 86.
- Easa, S. and Kikuchi, S. (2009). **Generalized method for estimating best-fit vertical alignments for profile data**. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 3(9), 693 – 701.
- Easa, S. and Wang, F. (2010). **Estimating continuous highway vertical alignment using the least-squares method**. Canadian Journal of Civil Engineering, 37(10), 1362 – 1370.
- Gardner, E. (1985). **Exponential smoothing: the stat of the art**. Journal of Forecasting, 4, 1 – 28.
- Higuera de Frutos, S. and Castro, M. (2017). **A method to identify and classify the vertical alignment of existing roads**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32(11), 952 – 963.
- Holgado-Barco, A., Gonzalez-Aguilera, D., Arias-Sanchez, P. and Martinez-Sanchez, J. (2014). **An automated approach to vertical road characterization using mobile LiDAR systems: Longitudinal profiles and cross-sections**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 96, 28 – 37.
- Hu, W., Tan, F. and Barnes, A. (2004). **New solutions to optimum vertical curve problem**. Journal of Surveying Engineering, 130(3), 119 – 125.

Jarque, C. y Bera, A. (1987). **A test for normality of observations and regression residuals.** International Statistic Review, 55(2), 163 – 172.

Karamanou, A., Papazissi, K., Paradissis, D., and Psarianos, B. (2009). **Precise estimation of road horizontal and vertical geometric features using mobile mapping techniques.** Boletim de Ciências Geodésicas, 15(5), 762 - 775.

Lawford, S. (2005). **Finite sample quantiles of the Jarque – Bera test.** Applied Economics Letters, 12, 351 – 354.

Pu, H., Zhao, L., Li, W., Zhang, J., Zhang, Z., Liang, J. and Song, A.T. (2019). **A Global Iterations Method for Recreating Railway Vertical Alignment Considering Multiple Constraints.** IEEE Access, 7, 121199 – 121211.

Rosnell, T. and Honkavaara, E. (2012). **Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadrocopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera.** Sensors, 12, 453 – 480.



Song, Z., Yang, F., Schonfeld, P., Liu, H. and Li, J. (2021). **Integrating segmentation and parameter estimation for recreating vertical alignments.** Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 36(4), 472 - 488.