



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

# Estimación de la pérdida de suelo a partir de modelos de pendientes generados con datos de elevación de distintas fuentes

Julia García Oviedo  
Ana Caren Pozzi Vázquez

Proyecto de grado presentado en Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República  
En cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero  
Agrimensor

Tutor  
Hebenor Bermudez

Tribunal  
Luis Calderon  
Leonardo Vique  
Eduardo Vasquez

Montevideo, Uruguay  
2025

# Página de Aprobación

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueban el Proyecto de Grado:  
Estimación de la pérdida de suelo a partir de modelos de pendientes generados con datos de elevación de distintas fuentes

Autores:

Julia García Oviedo

Ana Caren Pozzi Vázquez

Tutor:

Hebenor Bermudez

Carrera:

Ingeniero Agrimensor

Puntaje:

Tribunal

Profesor Luis Calderon

Profesor Leonardo Vique

Profesor Eduardo Vasquez

08/08/2025

# Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Agrimensor Hebenor Bermúdez, tutor académico de este trabajo, por su constante apoyo, orientación y supervisión durante todo el proceso. Su disposición para compartir sus conocimientos fueron fundamentales para la estructuración y desarrollo de la metodología empleada en este estudio.

Nuestro reconocimiento al Ing. Agrimensor Luis Calderón, por su colaboración en la generación del Model Builder y en la implementación del código de la ecuación RUSLE. Su aporte fue esencial para la integración de softwares y análisis realizados, enriqueciendo los resultados obtenidos.

Agradecemos también al Profesor Carlos Chiale, Tecnólogo en Cartografía, por su colaboración en la realización del vuelo LiDAR con dron. Su experiencia y conocimiento técnico fueron cruciales para la correcta ejecución de la captura de datos topográficos durante las prácticas de campo, contribuyendo a la calidad de los resultados finales.

Finalmente, el agradecimiento al Profesor Leonardo Vique, Agrónomo, por su valiosa asistencia en el cálculo de la pérdida de suelo utilizando la herramienta Erosión 6.0. Su experiencia en la temática y su apoyo técnico fueron determinantes para la correcta aplicación de la herramienta y fórmula.

A todos ustedes, familia y amigos, nuestro más profundo agradecimiento por su contribución técnica, académica y humana, sin la cual este trabajo no habría sido posible.

Les agradecen,

Julia García Oviedo

Ana Caren Pozzi Vázquez

# Índice

<b>Página de Aprobación</b>	<b>2</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>Resumen</b>	<b>7</b>
<b>Palabras Claves</b>	<b>7</b>
<b>Índice de imágenes</b>	<b>8</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>10</b>
<b>Glosario</b>	<b>10</b>
<b>Introducción</b>	<b>11</b>
<b>Objetivo General</b>	<b>12</b>
<b>Objetivos Específicos</b>	<b>12</b>
<b>Marco Teórico</b>	<b>12</b>
1. Fotogrametría	12
1.1 Fotogrametría con Drones	13
1.2 Plataforma de drones	14
2. Sensores LiDAR	15
2.1 Clasificación	16
2.2 Intensidad en datos LiDAR	18
2.3 Clasificación de puntos	18
2.4 Ventajas y Desventajas - dron LiDAR	19
2.5 Planificación de un vuelo LIDAR aéreo no tripulado	20
2.6 Errores de sensores LiDAR	21
2.7 Sensor LiDAR - Zenmuse L2	22
3. Pendiente	23
3.1 Métodos para el cálculo de pendiente	24
4. Erosión	27
4.1 Tipos de Erosión	28
4.2 Influencia de la topografía	28
4.3 Mapa de Erosión	29
5. Método RUSLE	29
5.1 Ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE)	29
5.2 Ventajas y limitaciones de la RUSLE	31
<b>Metodología</b>	<b>32</b>
<b>Cálculo y Análisis</b>	<b>34</b>
1. Análisis para el modelo de la IDE UY	34
1.1 Introducción	34
1.2 Cálculo de pendiente	36
1.3 MDP generados para el análisis de la densidad de puntos	36
1.4 Promedio y desviación de los MDP generados para el análisis de densidad de puntos	38
1.5 MDP generados para el análisis de la variación de tamaño de pixel	43
1.6 Cálculo de la RUSLE	47
1.6.1 Selección de parámetros	47
1.6.2 Cálculo de pérdida de suelo	54

1.7 Análisis del impacto de la separación entre puntos sobre la estimación de la pérdida de suelo	58
1.8 Análisis de pérdida de información en función de la distancia de muestreo	59
1.9 Análisis de desviación	60
1.10 Análisis de pérdida de suelo (Factor A) en función de los valores promedio y cuartiles de pendiente	63
1.11 Comparación con método de cálculo de pendiente tradicional	64
2. Vuelo drone	70
3. Procesamiento de vuelo LiDAR - Facultad de Veterinaria	71
4. Procesamiento de datos de la IDE UY - Facultad de Veterinaria	77
4.1 Grilla Urbana	77
4.2 Grilla Nacional	80
<b>Conclusiones</b>	<b>84</b>
1. Conclusión - Fórmula RUSLE	84
2. Conclusión - Tamaño de pixel	84
3. Conclusión - Densidad de puntos	85
4. Conclusión - Importancia de la densidad de muestreo en la precisión de modelos de pérdida de suelo	85
5. Conclusión - Comparación de resultado del método tradicional vs datos LAS provenientes de la IDE UY	86
6. Conclusión - Vuelo de dron y posterior procesamiento	86
7. Conclusión - Comparación de resultado de vuelo de drone con sensor LiDAR vs datos LAS provenientes de la IDE UY	87
<b>Webgrafía</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>91</b>
<b>Anexos</b>	<b>93</b>
1. Características de suelos	93
Anexo 1: Suelo 11.9. Según la Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay.	93
Anexo 2: Suelos 10.6 b. Según la Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay.	93
2. Código de Octave	94
Anexo 3: Código en software Octave, para cálculo de promedios y desviaciones para las 100 simulaciones generadas del DEM original para cada distancia de puntos aleatorios.	94
Anexo 4: Código para cálculo de pérdida de suelo con fórmula RUSLE.	94
Anexo 5: Código para obtener el valor promedio de pérdida de suelo.	95
Anexo 6: Código para obtener el valor de Q1, Q2, Q3.	95
Anexo 7: Código de cálculo de pérdida de suelo a partir de la mediana.	96
3. Resamples	97
Anexo 9: Remuestreo MDP distancia 25 (22,1x22,1).	98
Anexo 10: Remuestreo MDP distancia 25 (50x50).	99
Anexo 11: Remuestreo MDP distancia 25 (75x75).	100
Anexo 12: Remuestreo MDP distancia 25 (100x100).	101
Anexo 13: MDP distancia 50 (10x10).	102
Anexo 14: Resmuestreo MDP distancia 50 (22,1x22,1).	103
Anexo 15: Resmuestreo MDP distancia 50 (50x50).	104
Anexo 16: Resmuestreo MDP distancia 50 (75x75).	105

Anexo 17: Resmuestreo MDP distancia 50 (100x100).	106
Anexo 18: MDP distancia 100 (10x10).	107
Anexo 19: Resmuestreo MDP distancia 100 (22,1x22,1).	108
Anexo 20: Resmuestreo MDP distancia 100 (50x50).	109
Anexo 21: Resmuestreo MDP distancia 100 (75x75).	110
Anexo 22: Resmuestreo MDP distancia 100 (100x100).	111
Anexo 23: MDP distancia 250 (10x10).	112
Anexo 24: Resmuestreo MDP distancia 250 (22,1x22,1).	113
Anexo 25: Resmuestreo MDP distancia 250 (50x50).	114
Anexo 26: Resmuestreo MDP distancia 250 (75x75).	115
Anexo 27: Resmuestreo MDP distancia 250 (100x100).	116

# Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo estimar la pérdida de suelo mediante modelos de pendiente (MDP) generados a partir de la nube de puntos provenientes de la IDE UY, y analizar cómo influyen el tamaño del píxel y la densidad de puntos en la calidad de los resultados. El trabajo se desarrolla en dos etapas diferenciadas.

En primer lugar, se aplica la metodología sobre un predio ubicado en Tarariras, donde se genera un modelo digital de elevación (MDE) a partir de datos LiDAR. Se evalúan distintas configuraciones de resolución espacial, simulando diferentes densidades de puntos y tamaños de celda. Esto permite analizar cómo la disponibilidad de información afecta la estimación de la pérdida de suelo, a partir de modelos de pendiente.

En la segunda etapa, se replica el procedimiento sobre el predio de la Facultad de Veterinaria, utilizando dos fuentes de datos: un vuelo realizado con dron portando un sensor LiDAR, y archivos LAS descargados desde la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE UY) del Uruguay. Los resultados obtenidos fueron similares entre sí, lo cual demuestra que, para estudios similares, los datos públicos de la IDE UY pueden ser utilizados de forma eficiente sin necesidad de realizar vuelos específicos.

El análisis confirma que la resolución del modelo y la densidad de puntos son variables clave en la estimación de pérdida de suelo, afectando directamente en los resultados.

## Palabras Claves

Modelo Digital de Elevación, Modelo de Pendiente, Pérdida de suelo, nube de puntos, RUSLE.

# Índice de imágenes

<b>Imagen 1:</b> Características de formas de aplicar fotogrametría.....	14
<b>Imagen 2:</b> Ejemplo de DJI M600/M300, Videodrone Geodrone X4L.....	14
<b>Imagen 3:</b> Ejemplo de Quantum Systems VTOL Trinity.....	15
<b>Imagen 4:</b> Ejemplo de Pulse Aerospace Vapor 55, Sky Heli.....	15
<b>Imagen 5:</b> Tipos de escaneado.....	17
<b>Imagen 6:</b> Retornos de pulsos láser.....	18
<b>Imagen 7:</b> Puntos clasificados según objeto en que incide el pulso.....	19
<b>Imagen 8:</b> Códigos clasificación ASPRS.....	19
<b>Imagen 9:</b> Zenmuse L2.....	23
<b>Imagen 10:</b> Gráfico, complemento para definición de pendiente.....	23
<b>Imagen 11:</b> Gráfico, complemento para definición de orientación.....	24
<b>Imagen 12:</b> Fórmula de pendiente.....	24
<b>Imagen 13:</b> Fórmula de cálculo de pendiente por método de celdas vecinas.....	25
<b>Imagen 14:</b> Tabla de rango de pendiente en porcentaje.....	25
<b>Imagen 15:</b> Fórmula de cálculo de pendiente por método de dirección de flujos.....	26
<b>Imagen 16:</b> Fórmula de cálculo de pendiente por método de acumulación de flujos.....	27
<b>Imagen 17:</b> Carta de degradación de tierras, Uruguay.....	29
<b>Imagen 18:</b> Zona de estudio.....	34
<b>Imagen 19:</b> Grilla Nacional de la zona.....	35
<b>Imagen 20:</b> Modelo digital de elevación y zona del área de estudio.....	35
<b>Imagen 21:</b> Modelo de pendiente.....	36
<b>Imagen 22:</b> Model Builder.....	37
<b>Imagen 23:</b> Esquema de flujo de trabajo.....	38
<b>Imagen 24:</b> Promedio de MDP con puntos aleatorios separados a 25 metros.....	39
<b>Imagen 25:</b> Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 25 metros.....	39
<b>Imagen 26:</b> Promedio de MDP con puntos aleatorios separados a 50 metros.....	40
<b>Imagen 27:</b> Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 50 metros.....	40
<b>Imagen 28:</b> Promedio de MDP con puntos aleatorios separados a 100 metros.....	41
<b>Imagen 29:</b> Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 100 metros.....	41
<b>Imagen 30:</b> Promedio de MDP con puntos aleatorios separados a 250 metros.....	42
<b>Imagen 31:</b> Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 250 metros.....	42
<b>Imagen 32:</b> MDP original, tamaño de píxel 10x10 metros.....	44
<b>Imagen 33:</b> Remuestreo de MDP original, tamaño de píxel 22,1x22,1m.....	45
<b>Imagen 34:</b> Remuestreo de MDP original, tamaño de píxel 50x50m.....	45
<b>Imagen 35:</b> Remuestreo de MDP original, tamaño de píxel 75x75m.....	46
<b>Imagen 36:</b> Remuestreo de MDE original, tamaño de píxel 100x100m.....	46
<b>Imagen 37:</b> Representación gráfica de las localidades en las cuales se estudió el factor R.....	47
<b>Imagen 38:</b> Factor b para ecuación modificada de Wischmeier y Smith (1978): estructura superficial.....	48
<b>Imagen 39:</b> Factor c para ecuación modificada de Wischmeier y Smith (1978): estructura superficial.....	48
<b>Imagen 40:</b> Carta de recomendación de suelos del Uruguay. Escala 1:1.000.000.....	49
<b>Imagen 41:</b> Clasificación de suelos según carta de suelos.....	50

<b>Imagen 42:</b> Clasificación de suelos según carta de suelos.....	51
<b>Imagen 43:</b> Períodos de cultivos.....	53
<b>Imagen 44:</b> MDP utilizados para el análisis.....	55
<b>Imagen 45:</b> Cálculo de la pérdida de suelo en programa Erosión 6.0.....	57
<b>Imagen 46:</b> Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo Original.....	65
<b>Imagen 47:</b> Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 25 metros.....	66
<b>Imagen 48:</b> Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 50 metros.....	67
<b>Imagen 49:</b> Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 100 metros.....	68
<b>Imagen 50:</b> Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 250 metros.....	69
<b>Imagen 51:</b> Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron.....	72
<b>Imagen 52::</b> Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron.....	72
<b>Imagen 53:</b> Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron.....	73
<b>Imagen 54:</b> Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron.....	73
<b>Imagen 55:</b> Clasificación de nube de puntos.....	74
<b>Imagen 56:</b> Nube de puntos clasificada. - Nube de puntos de terreno.....	75
<b>Imagen 57:</b> Modelo digital de elevación generado a partir de los puntos LAS del vuelo LiDAR.....	76
<b>Imagen 58:</b> Modelo de pendientes generado a partir de los puntos LAS del vuelo LiDAR.....	76
<b>Imagen 59:</b> Modelo digital de elevación generado a partir de los puntos LAS descargados de la IDE UY- Facultad de Veterinaria-Grilla Urbana.....	78
<b>Imagen 60:</b> Polígono delimitador de la Facultad de Veterinaria - Zona de Estudio.....	78
<b>Imagen 61:</b> Modelo digital de elevación de la zona de estudio con datos LAS de la IDE UY -Grilla Urbana.....	79
<b>Imagen 62:</b> Modelo de pendientes de la facultad de veterinaria con los datos LAS de la IDE-Grilla Urbana.....	80
<b>Imagen 63:</b> Modelo digital de elevación generado a partir de los puntos LAS descargados de la IDE- Facultad de Veterinaria-Grilla Nacional.....	81
<b>Imagen 64:</b> Modelo digital de elevación de la zona de estudio con datos LAS de la IDE UY-Grilla Nacional.....	81
<b>Imagen 65:</b> Modelo de pendientes de la facultad de veterinaria con los datos LAS de la IDE UY-Grilla Nacional.....	82
<b>Imagen 66:</b> Comparación de los MDP.....	83

# Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Tabla de características de Zenmuse L2 .....	23
<b>Tabla 2 :</b> Parámetros para formula RUSLE para área de Tarariras .....	54
<b>Tabla 3:</b> Parámetros para formula RUSLE para predio de la Facultad de Veterinaria.....	54
<b>Tabla 4:</b> Resultados de pérdida de suelo. Unidad de factor A. (t/ha año).....	56
<b>Tabla 5:</b> Unidad de factor A: (t/ha año).....	58
<b>Tabla 6:</b> Tabla de resultados de información original e información perdida.....	59
<b>Tabla N°7:</b> Pérdida de suelo promedio $\pm$ desviación estándar para diferentes densidades de muestreo.....	61
<b>Tabla N°8:</b> Mediana y cuartiles (Q1, Q2, Q3) de pendientes para diferentes densidades de muestreo.....	61
<b>Tabla 9:</b> Cálculo de pérdida de suelo para promedios de pendiente. Unidad: t/ha·año .....	63
<b>Tabla 10:</b> Cálculo de pérdida de suelo para cuartiles de pendiente. Unidad: t/ha·año .....	63
<b>Tabla 11:</b> Comparación de resultados según método tradicional vs método desarrollado en el informe. Unidad: t/ha·año.....	70
<b>Tabla 12:</b> Identificadores de clasificación de nube de puntos.....	74
<b>Tabla 13:</b> Parámetros para formula RUSLE para predio de la Facultad de Veterinaria.....	77
<b>Tabla 14:</b> Pérdida de suelo calculada a partir del Vuelo LiDAR y de la IDE UY .....	82

## Glosario

- MDE: Modelo Digital de Elevación.
- MDP: Modelo de Pendiente.
- MDT: Modelo Digital de Terreno.
- RUSLE: Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo.
- TBC: Trimble Business Center.
- IDE UY: Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay.
- LiDAR: Light Detection and Ranging" (Detección y Alcance por Luz).
- GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite.
- RTK: Cinemática en Tiempo Real.
- UAV: Vehículo Aéreo no Tripulado.
- PPK: Pos-Procesamiento Cinematográfico.
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global.
- IMU:Unidad de Medición Inercial.
- RGB: Red, Green, Blue.
- SIG: Sistema de Información Geográfica.
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- CONEAT: Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra.
- MI: Mes Inicial.
- MF: Mes Final.
- DE: Desviación Estándar.
- FOV: Campo de Visión.

# Introducción

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto de la pendiente en la pérdida del suelo, trabajando con la fórmula RUSLE/USLE, considerando diferentes formas de representar el terreno y las condiciones climáticas promedios de Uruguay.

Mediante el estudio, se realiza un análisis que permite contemplar la importancia de la densidad de puntos que son necesarios relevar en campo para generar una superficie con el suficiente nivel de detalle según los objetivos deseados. A su vez, se considera la influencia del tamaño del píxel para cada caso.

La metodología empleada incluye un vuelo con dron equipado con sensores LiDAR, para realizar un levantamiento topográfico detallado del terreno. A partir de los datos obtenidos, se procesan los puntos relevados del área estudio, lo que permite definir de manera precisa la pendiente del terreno y el cálculo de pérdida de suelo.

Adicionalmente, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos a partir de un vuelo con dron equipado con sensor LiDAR, conjuntos de datos de elevación de la IDE UY y el método tradicional de los agrónomos, lo que permite determinar si es necesario llevar a cabo un relevamiento más exhaustivo que el proporcionado por la IDE UY, en función de los requerimientos específicos de trabajos de estas características.

# Objetivo General

- Evaluar el impacto de la pendiente en la erosión del suelo, a través del análisis topográfico y la estimación de la pérdida de suelo, con el fin de aportar a la optimización de las prácticas agrícolas.

# Objetivos Específicos

- Estudiar los factores que afectan la erosión del suelo mediante el uso del método RUSLE, con énfasis en la pendiente del terreno y su longitud.
- Analizar la influencia de la densidad de puntos de elevación en la precisión del cálculo de pendiente del terreno, utilizando técnicas estadísticas.
- Analizar la influencia de la variación del tamaño del píxel en la precisión de cálculo de pendiente del terreno, utilizando técnicas estadísticas.
- Comparar los resultados del análisis pendientes obtenidas a partir de datos de la IDE UY y los datos generados a partir de un vuelo utilizando sensor LiDAR sobre una plataforma de dron.

# Marco Teórico

## 1. Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que sirve para obtener medidas precisas y modelos tridimensionales de terrenos mediante el análisis de imágenes satelitales, aéreas o terrestres. Estas se obtienen a partir de plataformas satelitales, aviones o drones, desde diferentes puntos y ángulos, para alcanzar las perspectivas deseadas; se procesan para determinar las distancias entre los puntos del terreno y así obtener medidas precisas y modelos 3D.

Esta técnica es ampliamente utilizada en múltiples sectores, tales como: la topografía, la arqueología, la ingeniería civil, la cartografía, la agricultura e incluso para industrias como la de los videojuegos o el cine.

Aplicar la fotogrametría a través de drones implica generar múltiples fotografías aéreas de un objeto o del terreno en sí, para crear modelos 2D o 3D digitalizados de alta resolución y obtener medidas precisas. Para ello, se utilizan softwares fotogramétricos especializados que buscan puntos homólogos. A partir de estos puntos se calcula la posición relativa de la cámara y se construyen las coordenadas tridimensionales mediante procesos de triangulación, generando una representación precisa del espacio real. (YellowScan, 2019 y 2023).

Para garantizar la precisión deseada, es necesario realizar tomas desde múltiples capturas aéreas, principalmente en vista nadiral, con la cámara orientada verticalmente hacia el suelo. Una imagen aérea por sí misma no resuelve problemas como la perspectiva y la distorsión geométricas, entonces no se puede considerar como un mapa fotogramétrico

(producto cartográfico generado a partir de fotografías aéreas procesadas. La posición, distancia y forma de los objetos reflejan la ubicación real sobre la superficie terrestre, con escala uniforme y corregida).

En función del proyecto, se pueden emplear diferentes capturas:

- Captura nadiral: imágenes tomadas con la cámara perpendicular al terreno. Se usan para generar mosaicos, modelos digitales de terreno, modelos digitales de superficie.
- Captura oblicua: imágenes tomadas con la cámara inclinada respecto a la vertical. Empleadas para modelos 3D.

Hoy en día se combinan imágenes nadiral con oblicuas, mejorando la calidad geométrica y detalle para los modelos tridimensionales.

Dependiendo de la escala del proyecto, generar un modelo fotogramétrico puede requerir desde cientos a miles de imágenes individuales. Es por ello, la importancia de vincular los drones a la fotogrametría, dado a que es la forma más económica de conseguir las imágenes requeridas, reduciendo el tiempo de trabajo respecto a métodos tradicionales. (YellowScan, 2019 y 2023).

## **1.1 Fotogrametría con Drones**

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), conocidos también como drones, son herramientas esenciales en muchos sectores por su capacidad de acceder a regiones arboladas y/o peligrosas, captando imágenes aéreas y recopilando datos con una precisión excepcional. Los drones son capaces de alojar diversas cargas útiles, como cámaras, sensores y soluciones LiDAR, convirtiéndolos en una plataforma ideal para integrar dicha tecnología, ampliando su utilidad más allá de la imagen aérea tradicional. Los tipos de sensores en los UAVs son: RGB (rojo, verde, azul), multiespectrales, térmicos, LIDAR. (Umiles Group, s.f.); (YellowScan, 2019 y 2023).

Algunas de las ventajas que se pueden enumerar para este método, en el contexto específico de la fotogrametría con drones, incluyen la disponibilidad de sistemas de posicionamiento precisos (como GNSS y RTK/PPK); la capacidad de operar en condiciones climáticas y topográficas moderadamente adversas (como cielo nublado, llovizna ligera o viento moderado); el despliegue rápido y flexible del equipo; así como el uso de tecnologías avanzadas de inspección y automatización de vuelos, entre otras. (Luhmann et al., 2014 y Kraus, 2007).

Existen otras formas de relacionar la fotogrametría con estas ventajas y aplicaciones.

Tipo	Plataforma	Cobertura	Resolución	Costo
Fotogrametría con drones	Dron	Pequeña-media	Muy alta	Bajo-moderado
Fotogrametría aérea	Avión/helicóptero	Muy amplia	Alta	Alto
Fotogrametría satelital	Satélite	Global	Media	Medio (licencias)
Fotogrametría terrestre	Cámara manual	Muy limitada	Muy alta	Bajo
Fotogrametría móvil	Vehículo	Media-amplia	Alta	Alto

**Imagen 1:** Características de formas de aplicar fotogrametría. **Fuente:** (Luhmann et al., 2014 y Kraus, 2007)

## **1.2 Plataforma de drones**

**Drone multirrotor:** Es el más habitual dentro del mercado. Dentro de este tipo existen los cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros, los cuales permiten realizar una variada gama de proyectos; tienen un tamaño grande y proporcionan seguridad respecto a la cantidad de rotores, ya que si falla alguno, aún puede continuar con su desplazamiento. Los drones multirrotor de mayor tamaño otorgan mayores opciones de equipamiento además de ser ideales para terrenos difíciles de acceder y suelen tener mayor capacidad de carga útil, lo que aumenta su autonomía y tiempo de vuelo.(Umiles Group, s.f.); (YellowScan, 2019 y 2023).



**Imagen 2:** Ejemplo de DJI M600/M300, Videodrone Geodrone X4L. **Fuente:** YellowScan. (s.f.). *Choosing the perfect drone for LiDAR mapping.*

**Drone de ala fija:** Este tipo de dron es el más eficiente en trabajos de levantamiento con sensor LiDAR, ya que permite cubrir grandes extensiones de terreno en menos tiempo y con menor consumo energético que los multirrotos. Gracias a su diseño aerodinámico, puede volar durante más tiempo y a mayor velocidad, lo que reduce la cantidad de vuelos necesarios y, por lo tanto, los costos operativos por hectárea relevada. Se implementa especialmente en proyectos de infraestructuras lineales como carreteras, líneas eléctricas o ferrocarriles, así como en relevamientos de bosques, zonas agrícolas o franjas costeras. Además, como el sensor LiDAR está integrado en

el cabezal, las cargas útiles son más pequeñas, lo que favorece el uso de tecnologías de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), ideales para operar en espacios reducidos.



*Imagen 3: Ejemplo de Quantum Systems VTOL Trinity. Fuente: YellowScan. (s.f.). Choosing the perfect drone for LiDAR mapping.*

**Helicóptero no tripulado:** El comúnmente llamado dron helicóptero, en ciertas situaciones puede considerarse mejor que el multirroto; como ejemplo si se necesita montar un sensor LiDAR de mayor tamaño. Por lo tanto, el tamaño del dron debe siempre adecuarse al tamaño de la carga.



*Imagen 4: Ejemplo de Pulse Aerospace Vapor 55, Sky Heli. Fuente: YellowScan. (s.f.). Choosing the perfect drone for LiDAR mapping.*

## **2. Sensores LiDAR**

El LiDAR (Light Detection and Ranging) es una tecnología avanzada de teledetección que se emplea mediante pulsos de láser con el fin de mapear superficies terrestres. Esta técnica ofrece datos de alta precisión, lo que la hace especialmente útil para diversas aplicaciones, como la fotogrametría. (YellowScan, 2019 y 2023).

Funciona emitiendo pulsos de luz láser en dirección del suelo, los cuales son reflejados en las distintas superficies, como ser objetos sobre y por la superficie del suelo (como el terreno, árboles, edificios, etc.). Estos pulsos viajan a través de la atmósfera, y el sistema mide el tiempo que tarda cada pulso en regresar al sensor. A partir de ello se puede calcular la distancia; permitiendo determinar las coordenadas espaciales georreferenciadas, a través de un sistema de referencia definido, y generar una representación detallada de la superficie terrestre. (YellowScan, 2019 y 2023).

Los pulsos láser emitidos desde un sistema LiDAR pueden regresar al sensor como uno o varios rebotes, según las superficies que se encuentren. Sin embargo, el primer pulso en volver es el más importante y será asociado con la entidad más alta de la zona, y muchas veces se espera que el último rebote sea referido al terreno del suelo desnudo, aunque no siempre sucede esto. Es decir, que pueden ser detectadas las elevaciones de varios objetos a través de distintas devoluciones de la huella del pulso láser saliente.

El sistema LiDAR se compone por el vehículo que transporta el sensor, un sistema de escáner láser, el sistema GNSS y el sistema de Navegación Inercial (INS). El último mide la rotación, inclinación y azimut del sistema LiDAR. Los tipos de sistemas LiDAR pueden ser fijos, móviles, aerotransportados.

Los productos que se pueden obtener de un conjunto de datos LiDAR son: Nubes de Puntos Clasificadas, Modelo Digital de Superficie (MDS), Modelo Digital del Terreno (MDT), entidades extraídas, y curvas de nivel.

El LiDAR es una tecnología avanzada que se destaca por su capacidad para detectar objetos a distancias que pueden alcanzar hasta los 400 metros, dependiendo del modelo y las condiciones ambientales. Los sensores LiDAR aéreos no escanean en un rango horizontal completo de 360°, sino que realizan barridos en un ángulo limitado, y mediante patrones de vuelo estratégicos logran cubrir el área deseada. Esta tecnología es capaz de operar eficazmente bajo condiciones meteorológicas adversas y en entornos con poca iluminación, lo que la convierte en una herramienta muy versátil para la obtención de datos precisos en diversos escenarios. (YellowScan, 2019 y 2023).

Cada punto LiDAR tiene los siguientes atributos: la intensidad, que indica la fortaleza de devolución del pulso láser; el número de devoluciones, que depende de las entidades en las que se refleja y las capacidades de esta tecnología; la clasificación de los puntos según el objeto donde se refleja; el borde de la línea de vuelo, donde el 0 es interno y el 1 es en borde; la atribución con bandas RGB (rojas, verdes y azules); el tiempo GPS en que se emite el láser; el ángulo de escaneo, entre -90° y 90° (cobertura vertical); y la dirección de escaneo.

## **2.1 Clasificación**

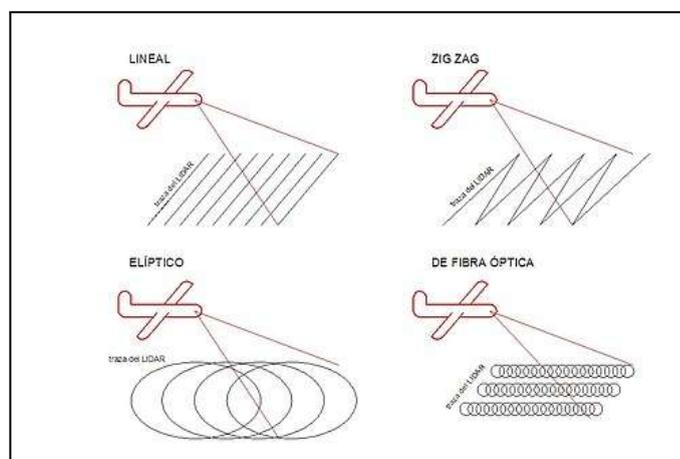
El sistema de medición está basado en un sensor activo, esto quiere decir, que el receptor emite el impulso láser y recibe, pudiendo determinar la distancia recorrida.

Se puede clasificar según la medición electrónica, si es de pulsos o de medición de fases. (López Freitas & Sánchez Bentancur, 2020).

- Medición de pulsos: Se determina la distancia entre el sensor y el terreno, a partir de la medida de tiempo que tarda el pulso de luz desde que es emitido hasta que es recibido.
- Medición de fases: Se emite un haz láser continuo. La señal emitida se refleja y al ser recibida por el emisor, se mide la diferencia de fase entre la señal emitida y la reflejada, determinado el número de ambigüedades, es decir, el número de longitudes de ondas enteras.

Sin embargo, para una nube de puntos, se requiere de un sistema con medición puntual de forma repetitiva, proporcionando una segunda clasificación. (López Freitas & Sánchez Bentancur, 2020).

- Escaneo de líneas: El sistema cuenta con un espejo rotatorio encargado de desviar el haz láser, generando un patrón de escaneo en forma de líneas paralelas sobre el terreno. No obstante, una de las principales limitaciones de este método es que, debido a que el espejo gira en una única dirección, no se obtienen mediciones de manera continua en todas las posiciones.
- Escaneo en Zigzag: En este caso, el espejo es rotatorio en ambos sentidos (ida y vuelta), lo que permite generar un patrón de escaneo en forma de zigzag. Una de las principales ventajas de este sistema es que permite realizar mediciones de manera continua. Sin embargo, debido al cambio de sentido en la rotación del espejo, su aceleración varía en función de la posición. Esta variación provoca un aumento en la densidad de puntos escaneados en las zonas próximas a los límites laterales del escaneo, en comparación con la región del nadir.
- Escaneo de fibra óptica: En los sistemas basados en fibra óptica, el haz láser se emite desde la fibra central de un cable óptico y, mediante pequeños espejos, es desviado hacia las fibras laterales dispuestas alrededor del eje del sistema. Este mecanismo genera una huella de escaneo con forma de circunferencias parcialmente solapadas. Gracias al reducido tamaño de los espejos, la velocidad de adquisición de datos es superior en comparación con otros sistemas. No obstante, una de sus principales limitaciones es que el ángulo de escaneo (Field of View, FOV) resulta más restringido.
- Escaneo eclíptico: el haz láser es desviado mediante dos espejos que generan un patrón de escaneo con forma elíptica. Una de las ventajas de este método es que permite escanear el terreno desde distintas perspectivas, lo que puede mejorar la calidad y la cobertura de los datos. Sin embargo, la presencia de dos espejos introduce una mayor complejidad técnica, ya que se requiere la gestión de dos medidores angulares independientes.

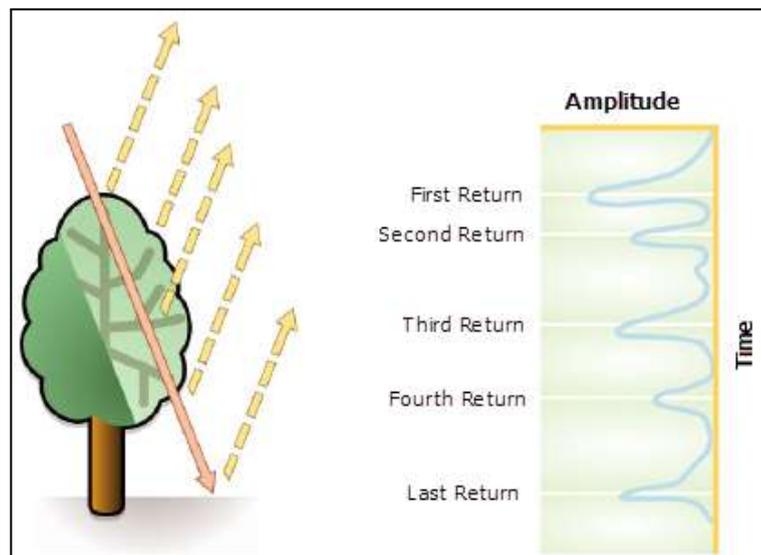


**Imagen 5:** Tipos de escaneo – **Fuente:** Javier Francisco y Artero Parra - Universidad de Córdoba, España - 2013

## **2.2 Intensidad en datos LiDAR**

Un único pulso puede originar múltiples retornos, dependiendo de las superficies con las que interactúe, como la copa de un árbol, sus ramas y el suelo. Esta característica permite obtener información detallada sobre la estructura vertical de los objetos y la topografía del terreno, lo cual facilita la construcción de nubes de puntos tridimensionales de alta precisión que representan tanto el relieve del suelo como la ubicación de los elementos presentes sobre su superficie.

Considerando lo anterior, la tecnología LiDAR se presenta como una herramienta eficaz para la elaboración de modelos de elevación, ya que permite una distinción clara entre el suelo y los objetos con diferentes elevaciones, lo que resulta en una representación detallada y precisa del terreno. En relación con la intensidad del retorno, cada punto almacenado por el sistema LiDAR se le asigna un valor de intensidad, que se basa en la reflectividad del objeto medido. Esta reflectividad depende de la longitud de onda utilizada, la cual generalmente se encuentra en el espectro del infrarrojo cercano. Este atributo permite emplear la intensidad como sustituto de las imágenes aéreas en aquellos casos en los que estas no estén disponibles, generando representaciones visuales similares a fotografías aéreas en blanco y negro. No obstante, es importante señalar que el valor de la intensidad varía según la superficie reflejada, tratándose de un valor relativo y no cuantificable. En consecuencia, no es posible esperar que el mismo objeto genere el mismo valor de intensidad en diferentes vuelos o a diferentes altitudes (López Freitas & Sánchez Bentancur, 2020).

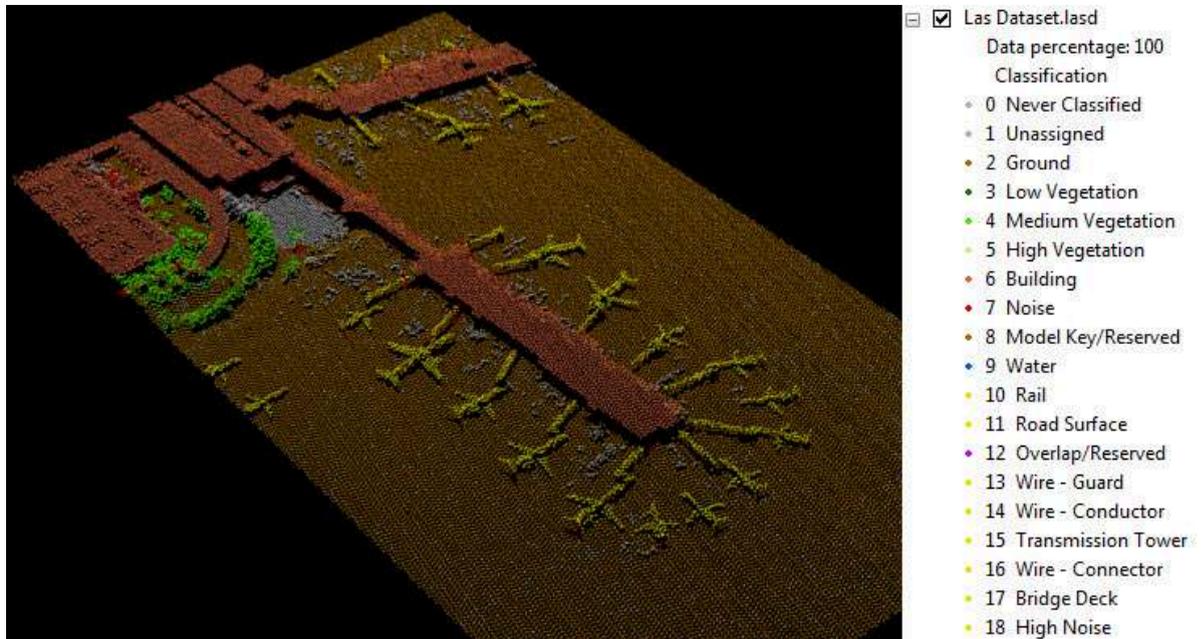


**Imagen 6:** Retornos de pulsos laser, **Fuente:** López Freitas, N. A., & Sánchez Bentancur, M. E. (2020).

## **2.3 Clasificación de puntos**

El formato LAS es un estándar binario para almacenar datos LiDAR, desarrollado por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Contiene metadatos del estudio, como la fecha del vuelo, el número de puntos y de retornos, y datos detallados de

cada pulso, como coordenadas, intensidad, tiempo GPS y clasificación. Además, cada punto puede tener una clasificación asignada según el objeto que reflejó el pulso láser, utilizando códigos numéricos definidos por la ASPRS. (López Freitas, N. A., & Sánchez Bentancur, M. E. (2020)).



**Imagen 7:** Puntos clasificados según objeto en que incide el pulso – **Fuente:** López Freitas, N. A., & Sánchez Bentancur, M. E. (2020).

Código	Representa	Código	Representa
0	Nunca clasificado	11	Superficie de la carretera
1	No asignado	12	Reservado
2	Base	13	Protector de cable (señal)
3	Vegetación baja	14	Conductor de cable (fase)
4	Vegetación media	15	Torre de transmisión
5	Vegetación alta	16	Conector de la estructura de cable (aislante)
6	Construcciones	17	Plataforma del puente
7	Ruido	18	Ruido alto
8	Reservado	19-63	Reservado
9	Agua	64-255	Definido por el usuario
10	Ferrocarril		

**Imagen 8:** Códigos clasificación ASPRS. **Fuente:** López Freitas, N. A., & Sánchez Bentancur, M. E. (2020).

## 2.4 Ventajas y Desventajas - dron LiDAR

### Ventajas de drones portadores de sensores LiDAR

Los drones equipados con LiDAR se destacan respecto a los métodos convencionales por su eficiencia, pueden cubrir rápidamente grandes áreas, sin dejar de lado las altas

precisiones obtenidas, traduciéndose en datos detallados listos para el análisis y la toma de decisiones informadas. Además, es una tecnología en avance, que cada vez representa mejor la realidad del terreno y llega a cada vez más entidades de difícil acceso, penetrando a través de la vegetación.

La combinación de la medición precisa de distancias del LiDAR con la agilidad de los drones permite recopilar datos de gran precisión, esto hace que se logre adaptar a las distintas circunstancias con gran versatilidad y alcance. (Airclip GmbH. (n.d.). *LIDAR for surveying drones: Functionality, advantages and disadvantages*. Airclip.de.).

### **Desventajas de drones portadores de sensores LiDAR**

Los drones son plataformas dinámicas que están sujetos a vibraciones y movimientos, por lo que se debe garantizar la estabilidad necesaria, que no permita que se comprometan las mediciones LiDAR y las precisiones deseadas.

Por otro lado, las tecnologías LiDAR consumen mucha energía, lo que hace tener en cuenta la capacidad de carga útil; esto puede afectar la duración de los vuelos y la capacidad de maniobra.

Una de las ventajas establecidas es el alcance a la hora de toma de datos, es decir la distancia máxima a la que el sensor puede emitir un pulso láser y recibir su rebote con precisión, sin embargo su autonomía y altitud pueden limitar la cantidad de datos recogidos. (Airclip GmbH. (n.d.). *LIDAR for surveying drones: Functionality, advantages and disadvantages*. Airclip.de.).

## **2.5 Planificación de un vuelo LIDAR aéreo no tripulado**

Para un vuelo exitoso utilizando UAV con sensor LiDAR, el primer paso es una acertada planificación del vuelo, la cual va a repercutir en todas las fases del proceso, desde la preparación previa hasta la generación de productos cartográficos o geoespaciales finales. (YellowScan, 2019 y 2023).

La primera fase es la planificación del vuelo, donde se define el área de estudio, se elige el equipo adecuado y se establecen los parámetros del vuelo, como altura, velocidad y solape. Una correcta planificación asegura una recolección de datos eficiente y precisa.

En la fase de montaje y verificación del sistema, el sensor LiDAR y otros componentes como la IMU y GNSS se instalan en el UAV. Se asegura que todo el equipo esté bien calibrado y equilibrado para garantizar la correcta recolección de datos.

Un aspecto clave durante la planificación es la definición y aseguramiento del sistema de coordenadas adecuado. Se debe seleccionar el datum, sistema de referencia y proyección compatibles con el área de trabajo, y configurar los equipos GNSS para obtener correcciones en tiempo real (RTK) o en postproceso (PPK), lo que permitirá una georreferenciación precisa. La integración de datos provenientes del LiDAR, la IMU y el GNSS debe ser sincronizada cuidadosamente para generar una nube de puntos georreferenciada que refleje con exactitud la topografía del terreno. Para validar esta precisión, se utilizan puntos de

control terrestre distribuidos estratégicamente, que permiten detectar y corregir desviaciones. (YellowScan, 2019 y 2023).

Durante la ejecución del vuelo, el UAV sigue la ruta establecida mientras se monitorean las condiciones ambientales, el desempeño de los sensores y la navegación en tiempo real para asegurar la calidad de la captura de datos.

Finalizado el vuelo, se procede al procesamiento de los registros obtenidos, sincronizando la información LiDAR con los datos posicionales y aplicando filtros para eliminar ruidos y clasificar correctamente los puntos. Finalmente, en la fase de análisis y generación de productos, se crean modelos digitales del terreno, ortomosaicos y otros productos geoespaciales, que se validan mediante puntos de control y se entregan según los requisitos del proyecto. (YellowScan, 2019 y 2023).

Un punto importante a tener en cuenta al momento de la planificación es la capacidad del sistema UAV, para un rendimiento constante durante el vuelo. Una recomendación por parte de YellowScan es que la autonomía de la batería sea más de 20 minutos con una carga útil mínima de 2 kg para mantener su productividad. Menos de 20 minutos de vuelo puede no ser suficiente para cubrir un área considerable, obligando al UAV a regresar rápidamente para recargar, lo que puede interrumpir el flujo del trabajo y disminuir la productividad general. (YellowScan, 2019 y 2023).

En cuanto a la distancia al suelo del sistema LiDAR, se necesita que sea de un mínimo de 15 cm para despegar con seguridad. Hay que contemplar la altura del esqueleto del dron sobre el suelo y la longitud de las patas, además de que la pista de aterrizaje sea segura, sin objetos que puedan dañar el escáner.

La fijación del sistema LiDAR al UAV, conocido como montaje, es una parte crítica del proceso; debe ser resistente y ligero. Además, se deben considerar las dimensiones y la forma del sistema LiDAR, un sistema compacto facilita la integración. Es obligatorio el montaje con amortiguadores. (YellowScan, 2023)

## **2.6 Errores de sensores LiDAR**

Según FlyGuys (2024), el LiDAR es una tecnología activa que mide distancias mediante pulsos láser, permitiendo obtener modelos 3D precisos del terreno y objetos. Los errores que presentan son los siguientes:

1. **Errores de precisión:** Estos pueden surgir por distintos factores, entre ellos: la calidad del equipo, una calibración inadecuada, la presencia de interferencias ambientales como la lluvia, masas de agua, la niebla o la neblina, así como la obstrucción del haz láser por objetos en el entorno que no permiten que el último pulso llegue al terreno. Por este último punto, es importante una buena clasificación de la nube de puntos.

2. **Errores de resolución:** La resolución del sistema puede no permitir la obtención de detalles importantes del entorno, que la resolución espacial y temporal sea limitada puede

resultar en la incapacidad para detectar objetos pequeños o en movimiento rápido. Es la capacidad del sensor para ver los detalles.

3. **Interferencia electromagnética:** Fuentes de energía o equipos electrónicos pueden interferir en el sistema LiDAR y perturbar su funcionamiento normal, afectando en la calidad de los datos.

4. **Errores de registro y fusión de datos:** La integración de múltiples escaneos o la fusión de datos obtenidos de diferentes sensores, puede dar lugar a errores si no se realiza el registro adecuado. Generando discrepancias en la representación del entorno y afectando a los modelos 3D.

5. **Errores de muestreo:** Una densidad inadecuada de puntos de datos capturados puede conducir a que no se represente a la realidad. En especial en aquellas áreas con detalles o cambios abruptos en la superficie. Está referido a la densidad de puntos (puntos/m<sup>2</sup>), patrón de escaneo y cobertura. FlyGuys. (2024). *LiDAR: Light Detection and Ranging* (LiDAR Whitepaper 1.1). FlyGuys.

## **2.7 Sensor LiDAR - Zenmuse L2**

Las cargas útiles son equipos adicionales que se acoplan a los UAVs, permitiendo la personalización según las necesidades específicas de cada aplicación. El sistema LiDAR DJI Zenmuse L2 ofrece soluciones adaptables para proyectos que requieren diferentes niveles de precisión y rendimiento.

Según reflexiones presentadas por YellowScan (2023), el uso de tecnologías LiDAR avanzadas es clave para enfrentar desafíos en entornos complejos. El **DJI Zenmuse L2** es un sistema LiDAR integrado para drones Matrice 300 RTK y 350 RTK que combina un sensor LiDAR Livox con una cámara RGB de 20 MP y un IMU de alta precisión. Tiene un rango de detección de hasta 1200 metros y puede capturar hasta 1.200.000 puntos por segundo, generando nubes de puntos densas y precisas. Su precisión horizontal es de  $\pm 1$  cm y vertical  $\pm 2$  cm. El equipo pesa aproximadamente 580 gramos y consume alrededor de 40 W durante su operación típica. Los datos capturados pueden procesarse con DJI Terra o con otros softwares compatibles para análisis y generación de modelos digitales.



**Imagen 9:** Zenmuse L2. **Fuente:** HP Drones. (2025). *DJI Zenmuse L1 vs Zenmuse L2: principales diferencias.*

A continuación se proporciona una tabla con las características del mismo, más detalladas.

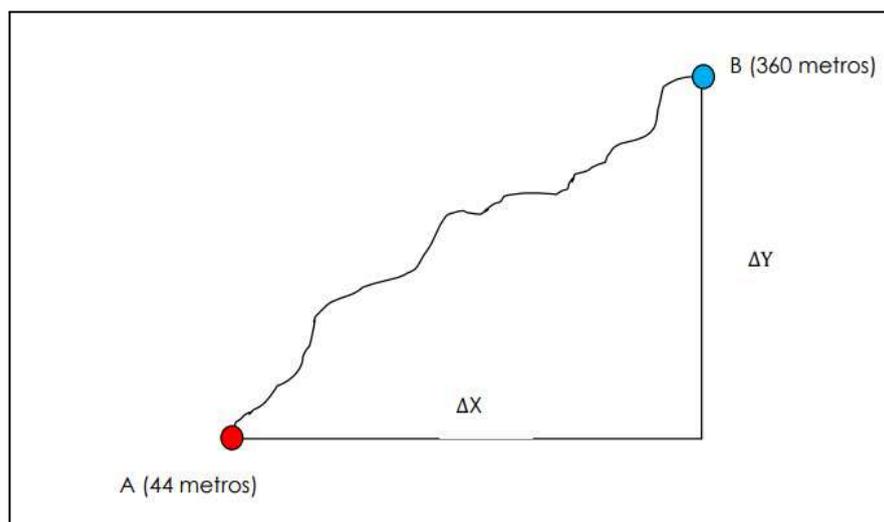
Características	Zenmuse L2
Rango de detección	Hasta 1200 m
Tasa de emisión de la nube de puntos	Hasta 1.200.000 pts/s
Tamaño de punto	2x6cm a 100 m
Precisión horizontal	± 1 cm
Precisión vertical	± 2 cm
Cámara	20 MP. 4k de video
Peso	580 g
Consumo de energía	40 W (típico), 70W máximo

**Tabla 1:** Tabla de características de Zenmuse L2. **Fuente:** HP Drones.

### 3. Pendiente

Es la relación que existe entre el desnivel (Y) y la distancia en horizontal (X) que debemos recorrer. Se expresa normalmente en %, es decir, el ángulo existente entre el vector gradiente en ese punto y el eje Z (vertical). (Manual de técnicas de montaña e interpretación de la naturaleza, 2006);(Bits Geográficos, 2015).

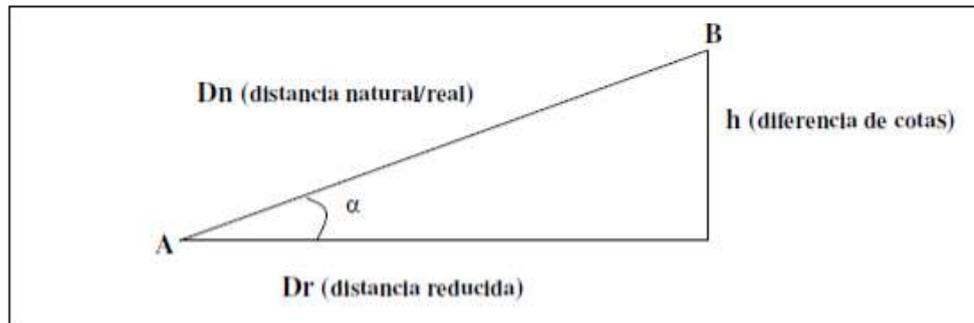
Su aplicación al terreno se basa en el control del desnivel existente en una ladera mediante las cotas, y su variación en el espacio.



**Imagen 10:** Gráfico, complemento para definición de pendiente. **Fuente:** Universidad Politécnica de Valencia. (1999). *La Pendiente del Terreno*.

Además, en el Manual de técnicas de montaña e interpretación de la naturaleza. (2006), también se define la orientación en un punto como el ángulo existente entre el vector que

señala la dirección Norte N, y la proyección sobre el plano horizontal del vector gradiente P; y la curvatura en un punto como la tasa de cambio en la pendiente.



**Imagen 11:** Gráfico, complemento para definición de orientación. **Fuente:** Universidad Politécnica de Valencia. (1999). *La Pendiente del Terreno*.

### **3.1 Métodos para el cálculo de pendiente**

- **Método de derivadas parciales:** Es el método matemático más simple, mencionado anteriormente. Se calcula utilizando el gradiente de la superficie de elevación. Se define como el cambio de elevación respecto a la distancia. Aplicable en modelos digitales de elevación y nubes de puntos, donde se calcula la pendiente para cada punto en función de sus vecinos. (Esri, s.f.); (Geomapik, 2022); (Bits Geográficos, 2015)

$$\text{Pendiente} = \arctan \left( \frac{\Delta Z}{\Delta X} \right)$$

**Imagen 12:** Fórmula de pendiente. **Fuente:** Bits Geográficos, 2015.

Donde:

- $\Delta Z$  es la diferencia en altura (elevación) entre dos puntos.
  - $\Delta X$  es la distancia horizontal entre esos puntos.
- **Método de celdas vecinas:** Este método calcula la pendiente utilizando el promedio de las celdas vecinas dentro de un área de influencia local. En el contexto de un **MDE**, se considera una vecindad de celdas cercanas para calcular el gradiente de la superficie. Se aplica en software SIG (Arcgis, Qgis), donde para cada celda, la pendiente calcula la tasa máxima de cambio entre su valor y el de sus ocho celdas vecinas. (Sánchez, s.f.); (Bits Geográficos, 2015).

Para este proyecto, se va a trabajar con el programa Arcgis. En este, la pendiente es una variable derivada del Modelo Digital de Elevación (MDE) que se genera utilizando un RASTER mediante un algoritmo directo.

Un valor bajo de pendiente indica un terreno más plano, mientras que un valor alto sugiere un terreno más empinado.

Fuente: ArcGis

La tasa de cambio en la dirección de la celda x "e" se calcula con el algoritmo:

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| = \left( \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 \cdot x} \right)$$

La tasa de cambio en la dirección y de la celda "e" se calcula con el siguiente algoritmo:

$$\left| \frac{dz}{dy} \right| = \left( \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8 \cdot y} \right)$$

**Imagen 13:** Fórmula de cálculo de pendiente por método de celdas vecinas. **Fuente:** Esri. (s.f.). *Flow Direction (Spatial Analyst). ArcGIS Desktop.*

Símbolo	Gradiente %	Descripción
a	0-3	Plano
b	3-7	Ligeramente inclinado
c	7-12	Moderadamente inclinado
d	12-25	Fuertemente inclinado
e	25-50	Ligeramente escarpado
f	50-75	Moderadamente escarpado
g	>75	Fuertemente escarpado

**Imagen 14:** Tabla de rango de pendiente en porcentaje. **Fuente:** IGAC, 2013.

- Método de Cuadrática Local: Se utiliza para crear un ajuste de superficie usando polinomios de segundo grado. A través de un ajuste polinómico en una ventana local de puntos, se calcula la pendiente tomando en cuenta el cambio en las elevaciones. Se implementan software avanzado de procesamiento de datos topográficos, como el software para análisis LiDAR o de fotogrametría. Wood, J. (1996). *LandSerf: scale-based analysis of DEMs to derive land surface parameters* (pp. 92–97).

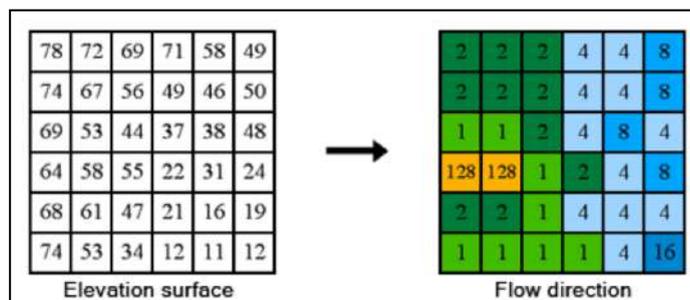
Para la implementación del método de Cuadrática Local en el análisis topográfico, existen diversas herramientas especializadas que permiten aplicar ajustes de superficie mediante polinomios de segundo grado.

Entre ellas, QGIS, junto con complementos como LAsTools o Open Lidar Toolbox, ofrece una solución de código abierto que permite procesar nubes de puntos, generar modelos digitales del terreno (MDT) y calcular pendientes a partir de ajustes locales. Por otro lado, Global Mapper, con su módulo LiDAR, es un software comercial robusto que facilita el manejo de grandes volúmenes de datos y la extracción precisa de variables geomorfológicas, como curvaturas y gradientes. (MapLibrary, 2023; Esri, s.f.; Blue Marble Geographics, s.f.).

Finalmente, ArcGIS Pro, mediante sus extensiones Spatial Analyst y 3D Analyst, proporciona un entorno profesional e integrado para realizar análisis espaciales avanzados, incluyendo interpolaciones polinómicas, cálculos de pendiente y visualización 3D de superficies topográficas. (MapLibrary, 2023; Esri, s.f.; Blue Marble Geographics, s.f.).

- Método de dirección de flujo: se permite que partiendo de una superficie como entrada, proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda. (Esri, s.f.).

Existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia dónde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8). (Esri, s.f.).



**Imagen 15:** Fórmula de cálculo de pendiente por método de dirección de flujos. **Fuente:** Esri. (s.f.). *Flow Direction (Spatial Analyst). ArcGIS Desktop.*

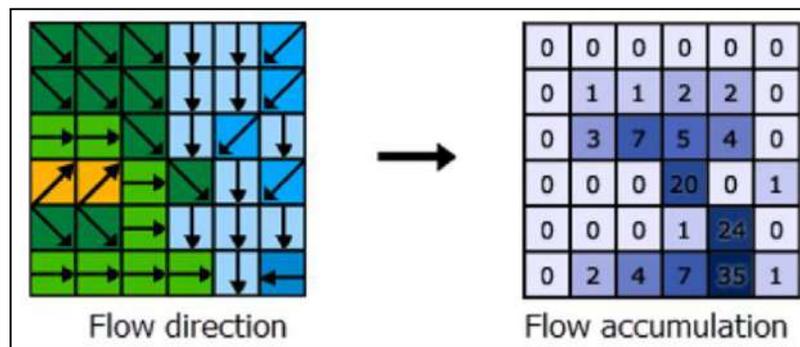
La dirección de flujo está determinada por la dirección del descenso más empinado, o la caída máxima, desde cada celda. Cuando se encuentra la dirección de un descenso más empinado, la celda de salida se codifica con el valor que representa esa dirección.

Si todos los elementos próximos son más altos que la celda de procesamiento, se considerará un ruido que se rellena con el valor más bajo de los elementos próximos, y tiene una dirección de flujo hacia esta celda. (Esri, s.f.).

Si un sumidero de una celda está junto al borde físico del ráster o tiene como mínimo una celda NoData como vecino, no se rellena porque la información del vecino no es suficiente. (Esri, s.f.).

- Método de acumulación de flujo: calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el ráster de salida.

Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar canales de arroyos.



**Imagen 16:** Fórmula de cálculo de pendiente por método de acumulación de flujos. **Fuente:** Esri. (s.f.). *Flow Direction (Spatial Analyst). ArcGIS Desktop.*

#### **4. Erosión**

La erosión es el desprendimiento y arrastre de parte del suelo por la acción de la lluvia o el viento perdiendo la capa superior del suelo, que es la parte más fértil.

*“Las gotas de lluvia caen sobre el suelo a gran velocidad y con mucha fuerza. Cuando chocan contra el suelo descubierto, producen un fuerte impacto. Con el choque se deshacen los terrones y se desprenden partículas de suelo, que son levantadas por las gotas y quedan sueltas, provocando la erosión. Cuando llueve más de lo que el suelo puede absorber, el agua comienza a escurrir por la superficie, a mayor velocidad cuanto mayor y más larga es la pendiente (la caída del terreno) llevándose el suelo que había quedado suelto.”* (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Marzo de 2016)

La erosión hídrica del suelo es el factor principal de degradación del suelo en Uruguay. Se ha constatado que el 30% de la tierra agrícola presenta reducción de su productividad, asociada principalmente a la erosión hídrica (García-Préchac y Durán, 1998; CNFR, 2011). La expansión e intensificación de la agricultura observada en los últimos 15 años (MGAP-DIEA, 2019) la necesidad de instrumentar políticas de conservación de suelo y calidad de agua, exigiendo Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo (PUMRS) en la actividad agrícola.

El modelo de estimación de pérdidas de suelos ampliamente extendido en todas partes del mundo y con una base consistente de estudios experimentales en el Uruguay, se basa en el concepto de la ecuación universal de USLE/ RUSLE (García-Préchac, 1992; García-Préchac y Durán, 1998; y García-Préchac et al. 2013).

#### **4.1 Tipos de Erosión**

**Erosión hídrica:** La erosión hídrica es causada específicamente por la acción de la energía cinética de las gotas de lluvia al impactar en una superficie de terreno desnudo, o no debidamente protegida por la vegetación.

**Erosión por escurrimiento superficial:** La formación de escurrimiento superficial dependerá del régimen de las precipitaciones y de las características del suelo. Si estas características permiten la infiltración de una cantidad de agua igual o superior a la que aporta la precipitación, no se producirá ninguna corriente superficial; en caso contrario, se formará una lámina superficial que escurre ladera abajo, en función de la pendiente del terreno (Mintegui y López, 1990). En este contexto, a medida que el agua se concentra va aumentando su cantidad, su velocidad y la cantidad de materiales en suspensión, lo cual le da un mayor poder socavante y transportador de partículas, situación que sólo se modifica por las variaciones de la lluvia y las variaciones de la erodabilidad del suelo (Peralta, 1976).

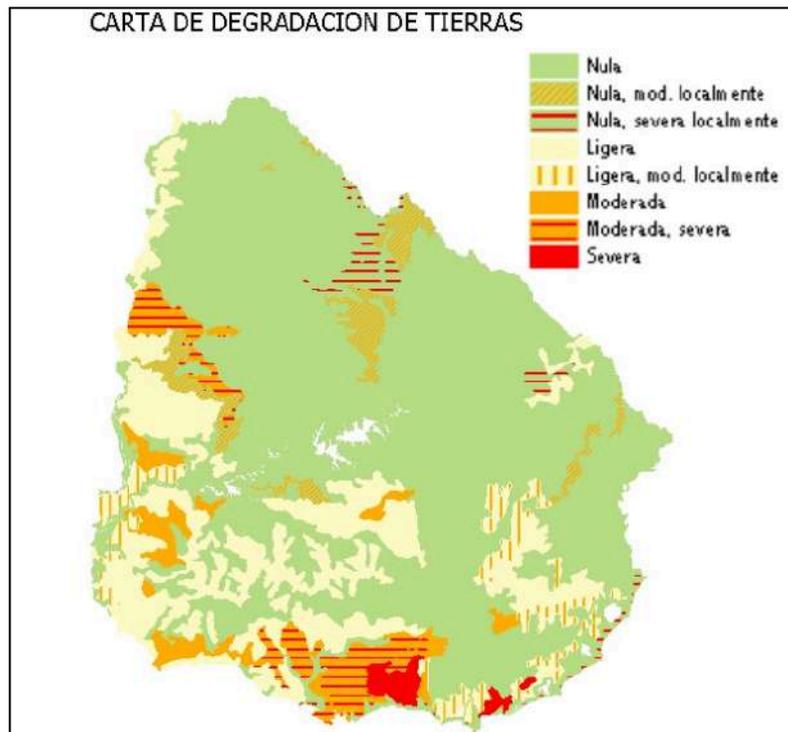
#### **4.2 Influencia de la topografía**

La topografía es un factor clave en la erosión hídrica, ya que las pendientes variables de un terreno influyen directamente en la severidad del proceso. En particular, a mayor pendiente, mayor es la intensidad de la erosión. Además, la longitud de la ladera también contribuye a aumentar la erosión, al igual que la forma que presenta la ladera (Gayoso y Alarcón, 1999).

Según Mardones (2007), la erosión se va incrementando a medida que aumenta la pendiente del terreno ya que también lo hacen la cantidad y la energía de la escorrentía superficial. En una superficie plana, las gotas de lluvia salpican las partículas de suelo en todas direcciones. En cambio en una superficie con pendiente las partículas de suelo que toman dirección hacia arriba recorren menos distancia que si fueran hacia abajo (debido a su trayectoria parabólica), por lo cual, estadísticamente cuando se observa al efecto de la erosión por salpique en un terreno inclinado, las partículas de suelo tienden a desplazarse hacia abajo, aumentando la proporción en función de la pendiente.

Cuanto mayor sea la inclinación y la longitud de un talud, mayor será la pérdida de suelo por erosión hídrica como consecuencia del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, y sus efectos se hacen sentir mucho más fuertemente en las partes inferiores de las laderas.

### **4.3 Mapa de Erosión**



*Imagen 17: Carta de degradación de tierras, Uruguay. Fuente: Mapas de Uruguay. (s.f.). Mapa de Uruguay: Erosión de suelos.*

## **5. Método RUSLE**

### **Introducción a fórmula RUSLE**

A pesar del hecho de que la erosión hídrica es un procedimiento característico causado principalmente por precipitaciones intensas, la geografía, la tasa y el tipo de cobertura vegetal; algunas acciones humanas, por ejemplo, sistemas de desarrollo cultivo inadecuados, ajustes de las condiciones hidrológicas, la deforestación y la minimización o la rendición de tierras, aumentan y agilizan la erosión (Lugo y Rey, 2013).

Una de las problemáticas ambientales más difíciles que enfrentan los países de América Latina son la disminución de los recursos naturales, ya que su futuro depende de la utilización competente de esos recursos. Su abuso y degradación devastan a los estados y contaminan al medio. Es un legado ilimitado en cuya pérdida financieros de confianza y libre empresa han actuado y siguen actuando de manera negativa, al igual que los componentes sociales y financieros que, en su extraordinaria mayor parte, se producen en el subdesarrollo (Castro, 2013).

### **5.1 Ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE)**

La estimación de las pérdidas de suelo por erosión es un elemento de suma utilidad para la planificación y toma de decisiones a diferentes niveles. A nivel predial permite comparar

objetivamente diferentes alternativas de uso y manejo y seleccionar la que, ofreciendo el nivel de conservación deseado, cumpla con los objetivos de producción y sea más simple de llevar a la práctica. A nivel político puede usarse como criterio o normativa técnica, de acuerdo a la legislación vigente.

RUSLE es un método que utiliza seis factores para estimar la pérdida de suelos: erosividad de la lluvia (R), susceptibilidad de erosión del suelo (K), largo de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P); para estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R, generalmente un año (García, Clérici y Terra, 2015). El modelo propuesto por Wischmeier y Smith es el siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

**A:** Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente toneladas (t) hectárea (ha)-1 año-1, o megagramos por unidad de superficie (Mg/ha).

**R:** El factor lluvia y escurrimiento, es el número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), más un factor para escurrimiento por derretimiento de nieve o aplicación de agua. (EI) para una tormenta es el producto de la energía total de la tormenta (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I). Sus unidades son (MJ/ha.año).(mm/h)/10, pero, por simplicidad, se resumen en energía cinética por unidad de superficie (J/ha).

**K:** El factor susceptibilidad de erosión del suelo, es la tasa de pérdida de suelos por unidad EI para un suelo específico (Mg/J), medido en una porción de terreno estándar (22.13 m de largo, 9% pendiente, en barbecho y labranza continua).

**L:** El factor de longitud de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo de pendiente estándar (22,13 m)

**S:** El factor de magnitud/gradiente de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los otros factores idénticos.

**C:** El factor cubierto y manejo, es la proporción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico (rotación de cultivos, manejo de los mismos, laboreo, productividad, manejo de residuos, etc.) con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua.

En el artículo de Hill, M., F. García Préchac, J.A. Terra y J. Sawchik publicado en 2008, "Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para predecir erosión en Uruguay, *Agrociencia (Uruguay) XII (2): 57-67*", destaca los valores de Factor C para los sistemas de uso y manejo de sitios estudiados.

De acuerdo a los criterios de Puentes (1981), la pérdida tolerable para los suelos del país es de 7 Mg ha-1 año-1.

**P:** El factor de prácticas de apoyo de conservación, es la proporción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como cultivo en contorno, barreras vivas, o cultivo en terrazas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente (García, Clérici y Terra, 2015).

## **5.2 Ventajas y limitaciones de la RUSLE**

La ecuación de pérdida de suelo propuesta por Wischmeier y Smith propone diferentes maneras para su utilización. Permite predecir la pérdida anual de suelo de una pendiente en un campo con condiciones específicas para uso de la tierra, servir como guía en la selección de sistemas de cultivo y manejo de prácticas de conservación para suelos y pendientes específicas, predecir el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio de las cosechas de conservación sobre un campo en específico, y determinar cómo pueden aplicarse o alternarse las prácticas de conservación para permitir un cultivo más intensivo.

Además, estima las pérdidas de suelo en áreas con uso de suelo distinto al agrícola, obtiene estimaciones de pérdida de suelo para que los conservacionistas determinen las necesidades de conservación (Kirby y Morgan, 1991, citado por Guido, 1997).

Las ventajas del uso de la RUSLE son: la planificación y conservación adecuada de los cultivos, predice las pérdidas indefinidas de sedimento, simplifica en muchas de sus variables, amplía la adaptación bajo diferentes condiciones y su facilidad de aplicación. (Daniel A. Hernández Herrera, 2011)

Sin embargo, la RUSLE presenta algunas limitaciones, que se deben tener en cuenta al momento de su aplicación. Se recomienda que este modelo se utilice a largo plazo. Se debe tener en cuenta que la ecuación se diseñó para predecir pérdidas de suelos asociadas con erosión laminar y en surcos; no corresponde a producción de sedimento de un campo; que los valores obtenidos con la ecuación corresponden a las mejores estimaciones posibles, no son valores absolutos; y que la ecuación predice pérdida promedio anual de suelo en un campo específico y bajo condiciones y prácticas dadas de manejo.

# Metodología

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto de la pendiente en la erosión del suelo, a través del análisis topográfico y la estimación de la pérdida de suelo, con el fin de optimizar las prácticas agrícolas y garantizar la sostenibilidad de los cultivos en condiciones climáticas variables.

Utilizando el estudio del método RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), se evalúa la pérdida de suelo a partir de seis factores clave: erosividad de la lluvia, susceptibilidad del suelo a la erosión, pendiente, longitud de la pendiente, manejo de cultivos y prácticas de conservación. Estos factores permiten estimar la pérdida promedio de suelo a lo largo de un período de lluvia determinado. A partir de un análisis detallado de la información recabada, se identifica que los principales factores que inciden en la labor del ingeniero agrimensor son la pendiente del terreno y el largo de la misma, con el fin de minimizar la erosión.

En este contexto, se toma como referencia el límite de erosión tolerable en Uruguay, establecido en 7 toneladas por hectárea y año, cuando se trabaja a favor de la pendiente. Este valor se considera como parámetro para ajustar los otros factores de la fórmula RUSLE, adaptándose a las condiciones climáticas y a los diferentes periodos de lluvia en el área de estudio.

Para este estudio es fundamental evaluar el impacto del tamaño del píxel, como también el impacto de la densidad de puntos en el cálculo de la pendiente y su efecto en la RUSLE. Para evaluar la influencia del tamaño del píxel, se generan distintos modelos de pendiente, donde se varía el tamaño del píxel. Por otro lado, se evalúa el efecto de la variación de la densidad de puntos, es decir, se generan nuevos modelos de pendiente con puntos aleatorios modificando en cada modelo la distancia entre ellos.

Utilizando técnicas estadísticas, se evidencia, cómo cambian las pendientes derivadas, y en consecuencia, su impacto sobre los factores de erosión considerados en la RUSLE. Los resultados obtenidos permiten establecer criterios técnicos y metodologías ajustadas a los objetivos específicos de cada aplicación, optimizando cada trabajo.

Además, se realiza un levantamiento topográfico detallado del terreno, en el que se contempla el uso de un dron equipado con sensores LiDAR. Los datos obtenidos serán procesados para generar el modelo digital de elevación del área de estudio y definir las pendientes de interés.

Para anticipar posibles errores, inconsistencias o imprecisiones que puedan surgir durante el vuelo, se lleva a cabo una simulación de vuelo dron en el software DJI Pilot, donde se seleccionan posibles parámetros, como la altura del vuelo, la velocidad del dron, el solape, entre otros.

Finalmente, se plantea realizar una comparación de modelos para evaluar el comportamiento de la pendiente bajo distintas condiciones, comparando los resultados obtenidos mediante un vuelo con dron LiDAR, con el modelo de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE UY), y a su vez, comparar con el método tradicional aplicado por los agrónomos. Se evalúa si, para proyectos similares, es necesario realizar un relevamiento más exhaustivo que el proporcionado por el modelo de la IDE UY.

# Cálculo y Análisis

## 1. Análisis para el modelo de la IDE UY

### 1.1 Introducción

El objetivo de este apartado es generar a partir del modelo de elevaciones original, modelos digitales de elevación derivados, donde de cada modelo surge una muestra que toma distintas cantidades de puntos aleatorios del modelo original, con el fin de lograr el nuevo modelo, según restricciones y criterios determinados. Una vez creados los diferentes modelos digitales de elevación generados por puntos aleatorios, se puede analizar las características y las estadísticas de los modelos. Algunas de estas son: tamaño de píxel, cantidad de puntos en el modelo, máximo, mínimo, entre otros.

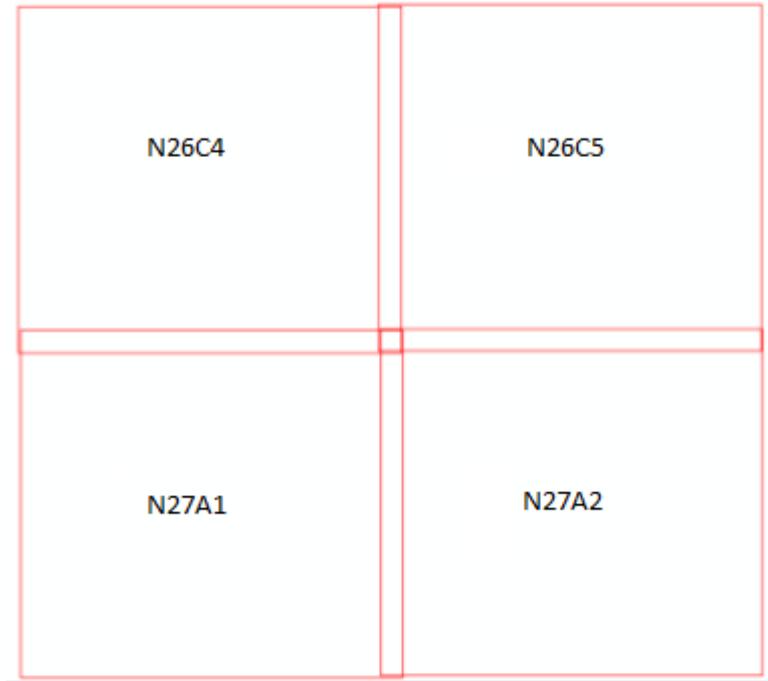
Este análisis comienza con la descarga de los archivos con los puntos proporcionados por la IDE UY. Estos archivos son nubes de puntos, cuya extensión es .las, correspondientes a una zona ubicada en el empalme de Ruta 1 con Ruta 22, en la localidad de Tarariras, departamento de Colonia, Uruguay. Partiendo de los archivos LAS de la IDE UY, se genera un modelo digital de elevación utilizando el programa Arcgis; al que llamamos modelo original. Este modelo tiene un tamaño de píxel de 10x10 metros, donde se trabaja con todos los puntos.

A continuación, se representa la zona de estudio mediante la imagen N° 18.



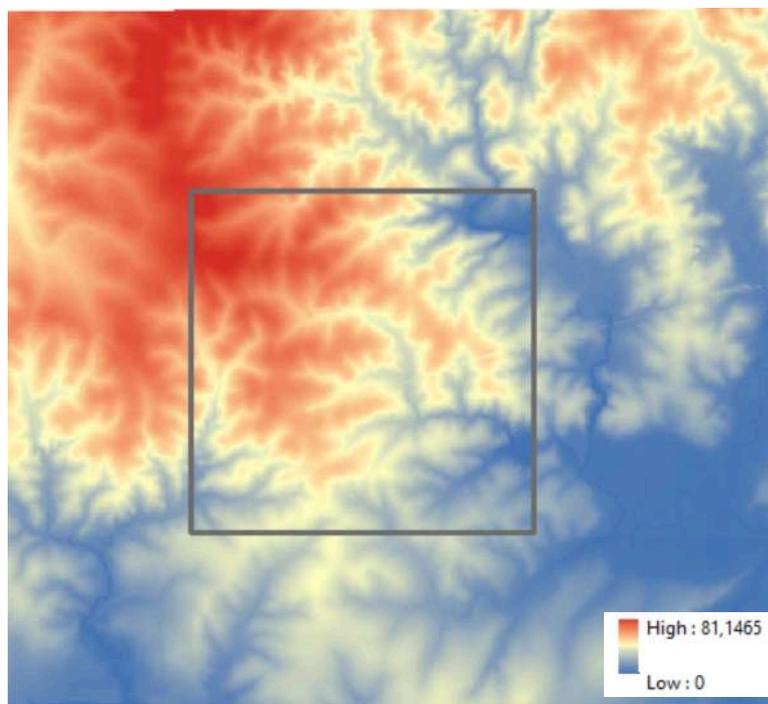
**Imagen 18:** Zona de estudio. **Fuente:** Google Maps.

El conjunto de datos obtenido de la IDE UY (información pública), consta de cuatro grillas identificadas como N26C4, N26C5, N27A1, N27A2, como se puede ver en la imagen N°19; con un contenido total de 19 millones de puntos, contando con un nivel de detalle considerable. Cada grilla tiene un tamaño de 6000x6000 metros, con una superficie aproximada de 14 hectáreas considerando las 4 grillas.



**Imagen 19:** Grilla Nacional de la zona. **Fuente:** Creación propia.

Con los datos bases se genera el modelo digital de elevación, convirtiendo los archivos del tipo LAS a un raster. Para realizar el estudio se genera un polígono que determina una subzona de 5000x5000 metros, de la cual se parte el siguiente análisis. En la imagen N°20 se visualiza el raster con el polígono que determina el área de estudio.

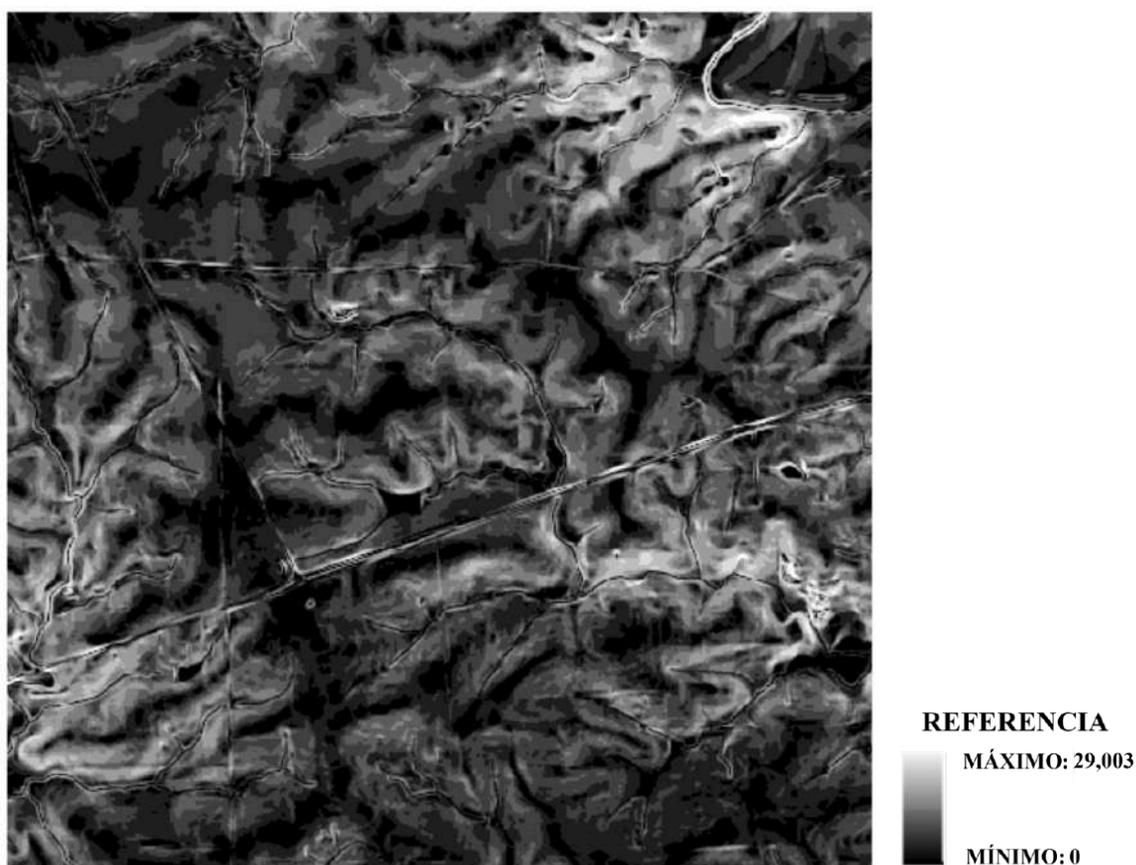


**Imagen 20:** Modelo digital de elevación y zona del área de estudio. **Fuente:** Creación propia.

## **1.2 Cálculo de pendiente**

En una primera instancia, se realiza el cálculo de pendiente del MDE.

Utilizando la herramienta *Slope*, se calcula la pendiente a partir del modelo digital de elevación original proporcionado por la IDE UY. Esta herramienta determina la inclinación del terreno considerando la variación de altitud entre píxeles vecinos, permitiendo así una estimación detallada de la pendiente a nivel casi infinitesimal. Este método es explicado en el punto 3.1 del marco teórico. En la imagen N°21, se visualiza el resultado del análisis, donde se representan las diferentes pendientes del terreno derivadas del modelo.



*Imagen 21: Modelo de pendiente. Fuente: Creación Propia.*

## **1.3 MDP generados para el análisis de la densidad de puntos**

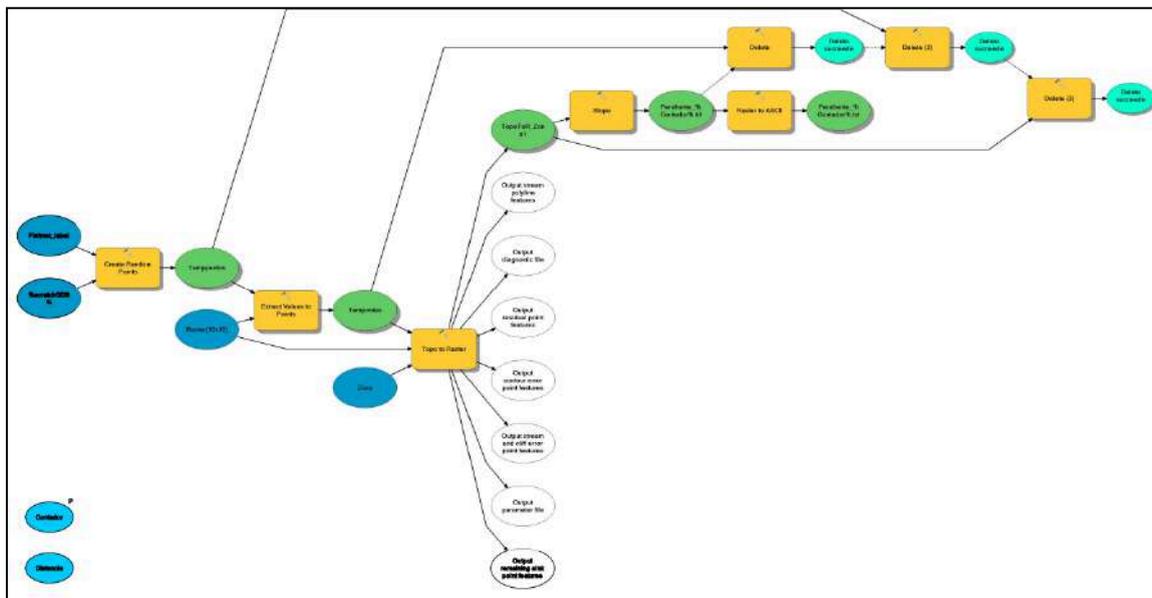
A continuación, se procede a generar cuatro grupos de modelos digitales de elevaciones creados a partir de puntos seleccionados aleatoriamente del MDE original. Cada grupo contiene cien modelos generados con muestras aleatorias, cuyos puntos están espaciados a distancias de 25, 50, 100 y 250 metros; para posteriormente generar un raster promedio de pendientes de cada uno de los cuatro casos. Este procedimiento permite analizar cómo varía la representación de la topografía del terreno en función de la densidad de puntos.

Para ello, se crea un *Model Builder* en Arcgis, herramienta que cumple la función de generar de forma automática los diferentes grupos de MDEs conformados por puntos

aleatorios separados a determinada distancia. Finalmente, se obtienen los ráster de pendiente correspondientes a cada uno de los MDE creados.

Es importante mencionar que para utilizar la herramienta *Create Random Points* se debe determinar una zona de trabajo. El área en la cual se generan los puntos aleatorios se puede definir con entidades de polígono, de punto o de línea, o con una ventana de extensión. En este caso, se utiliza un polígono de 5000x5000 metros que determina una subzona, definido gráficamente en la imagen N°20.

En la imagen N°22, se observa el *Model Builder* creado.



**Imagen 22:** Model Builder. Fuente: Creación propia.

Las herramientas utilizadas son:

- Create Random Points: Crea un determinado número de entidades de puntos aleatorios, especificando la distancia entre ellos. (Esri. (2025). ArcGIS Pro).
- Extract Values to Points: Extrae los valores de las celdas de un ráster a partir de un conjunto de puntos. Los valores se registran en la tabla de atributos de una clase de entidad de salida. (Esri. (2025). ArcGIS Pro).
- Topo to raster: Es una herramienta de geoprocésamiento que convierte líneas de nivel en información de territorio en formato ráster. Se utiliza para crear modelos digitales de elevación (MDE) hidrológicamente correctos. (Esri. (2025). ArcGIS Pro).
- Slope: Identifica la inclinación de cada celda de una superficie ráster. La pendiente se puede medir en grados o porcentajes. (Esri. (2025). ArcGIS Pro).
- Raster to ASCII: convierte un dataset ráster en un archivo de texto ASCII. (Esri. (2025). ArcGIS Pro).

## 1.4 Promedio y desviación de los MDP generados para el análisis de densidad de puntos

Una vez obtenidos todos los MDP, se utilizan parámetros estadísticos, en este caso el promedio y la desviación, que ayudan a generar un análisis de los resultados.

Se utiliza el software libre Octave, donde se genera un script que proporciona dos archivos de salida: uno con los promedios de las pendientes (promedio.asc) y otro con las desviaciones de las pendientes (desviación.asc), para cada grupo.

Dado que se generan cien modelos de elevación, todos con una resolución espacial de 10x10 metros por píxel, y a partir de cada uno se calcula la pendiente, se dispone de cien modelos de pendientes para cada grupo. Para el análisis se requiere de un único modelo representativo, por lo que se resuelve aplicar el promedio para obtener un único modelo de pendiente a partir de los MDP, generando así un modelo promedio de pendientes, el cual será utilizado en análisis posteriores.

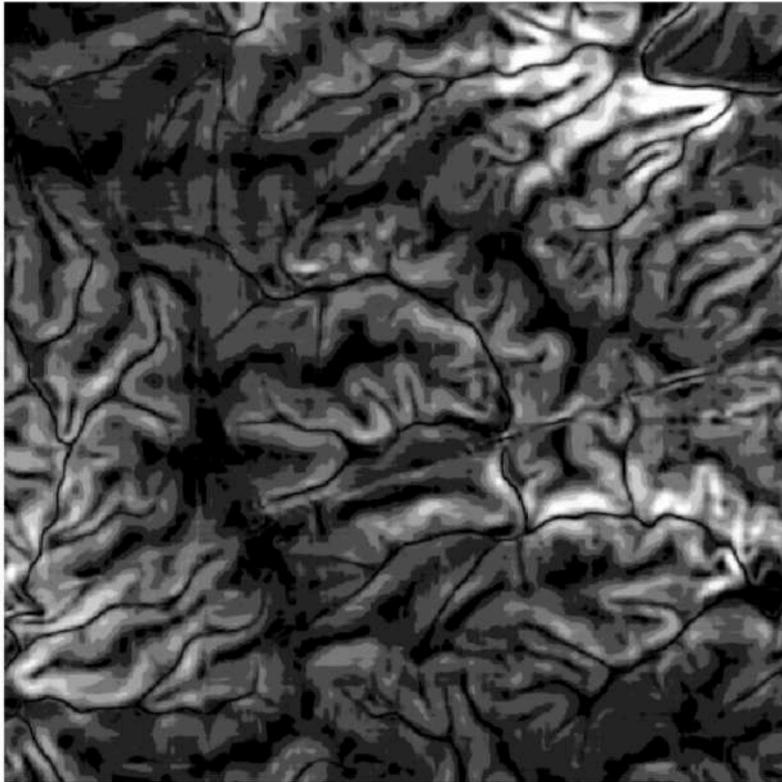
Además del promedio, se generó un modelo de desviaciones estándar de las pendientes. Estas desviaciones representan la variabilidad o dispersión de los valores de pendiente en cada celda entre los cien modelos generados. En otras palabras, indican qué tanto fluctúan los valores de pendiente en una misma ubicación, lo que permite evaluar la estabilidad o incertidumbre del dato promedio en cada punto del terreno.

En la imagen N°23 se deja una esquema del flujo de trabajo a realizar.

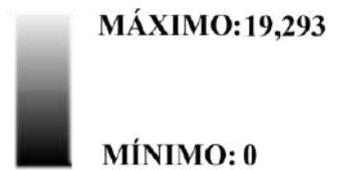


**Imagen 23:** Esquema de flujo de trabajo. **Fuente:** Creación Propia.

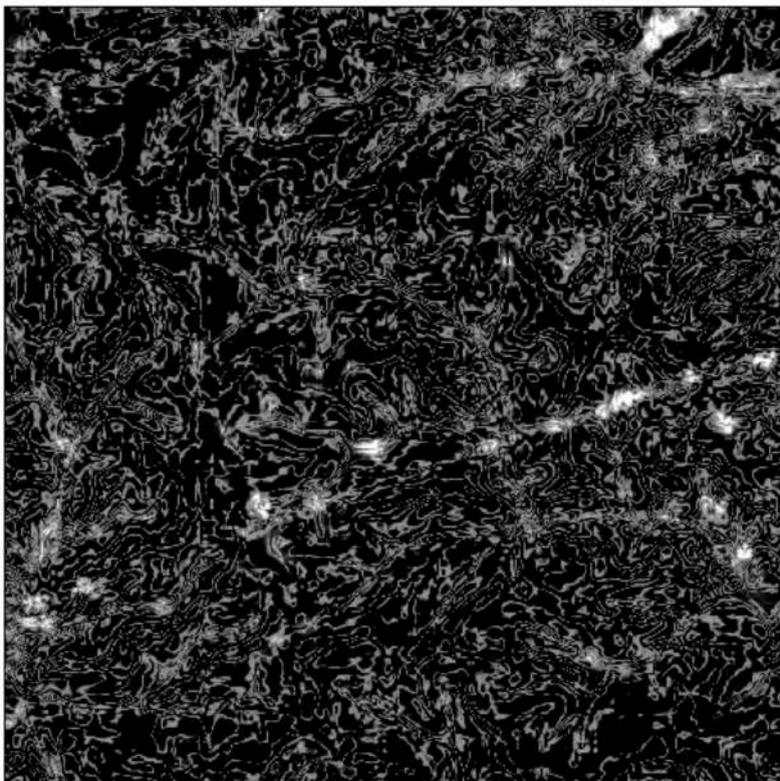
Para visualizar la representación gráfica de los modelos generados, se utiliza el software ArcGIS. Este permite examinar espacialmente tanto el modelo promedio de pendientes como el modelo de desviaciones, facilitando la interpretación de los resultados y la identificación de patrones o áreas con alta variabilidad. En las siguientes imágenes se muestran los modelos correspondientes. (Ver imágenes, desde la N°24 a la N°31).



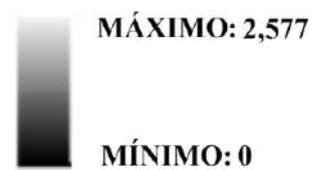
**REFERENCIA**



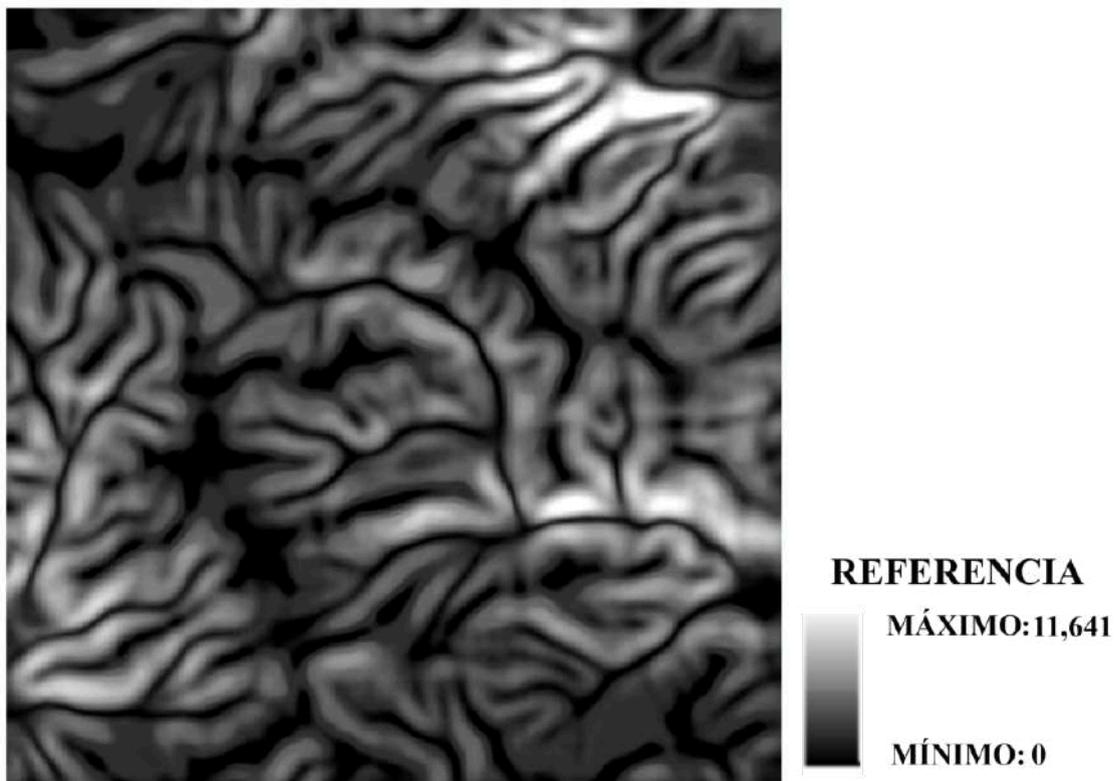
*Imagen 24: Promedio de modelo de pendiente con puntos aleatorios separados a 25 metros.  
Fuente: Creación Propia.*



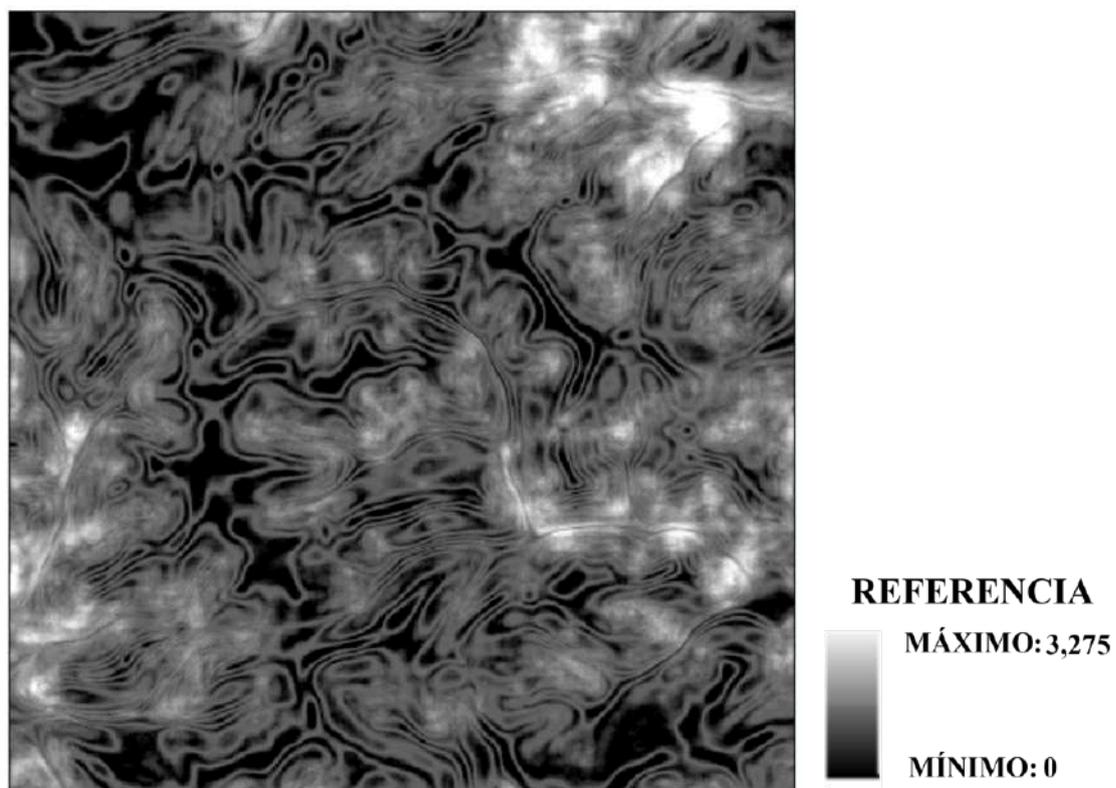
**REFERENCIA**



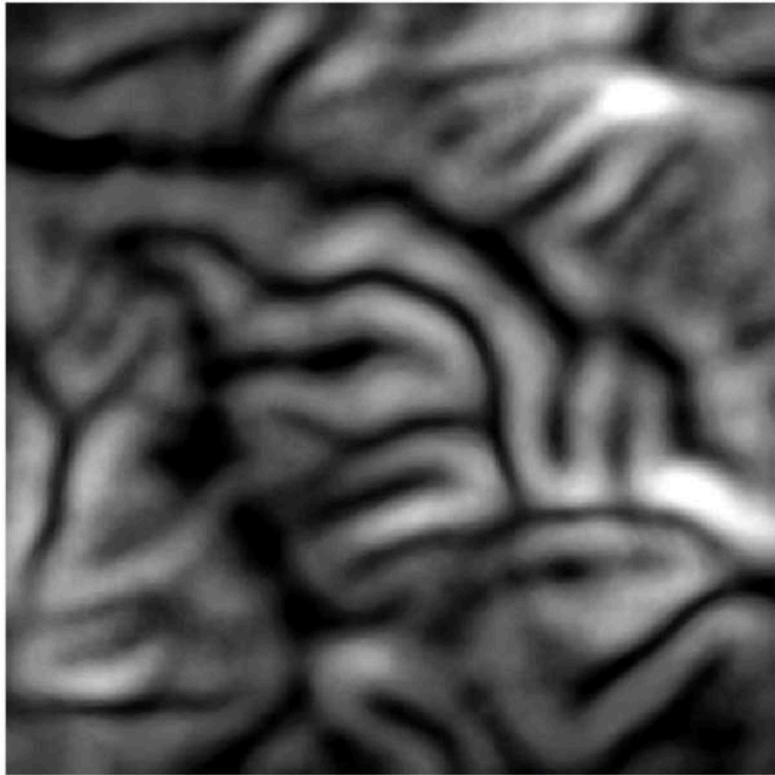
*Imagen 25: Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 25 metros. Fuente:  
Creación Propia.*



*Imagen 26: Promedio de modelo de pendiente con puntos aleatorios separados a 50 metros. Fuente: Creación Propia.*



*Imagen 27: Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 50 metros. Fuente: Creación Propia.*



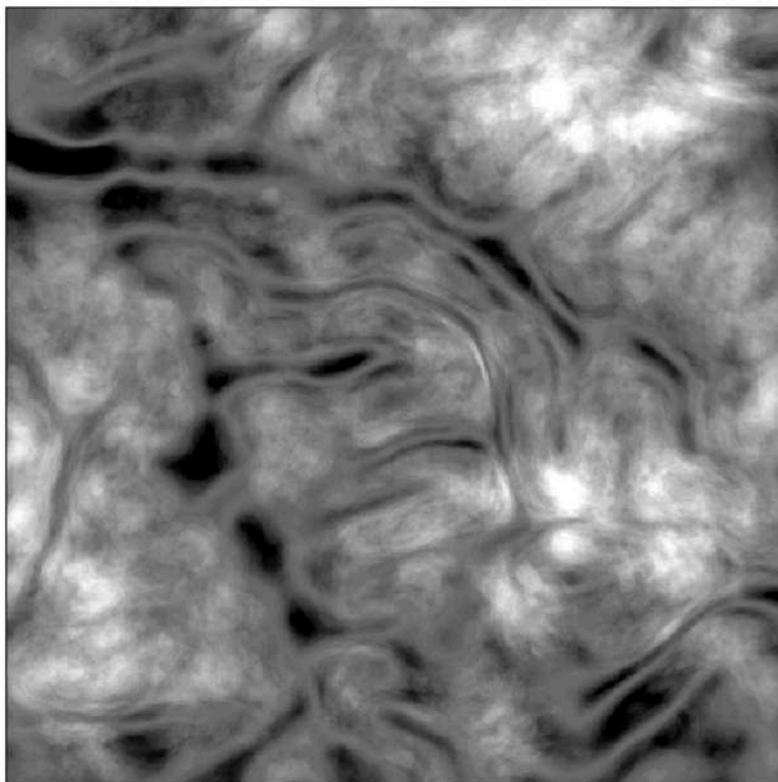
**REFERENCIA**

**MÁXIMO: 5,783**

**MÍNIMO: 0**

**Imagen 28:** Promedio de modelo de pendiente con puntos aleatorios separados a 100 metros.

**Fuente:** Creación Propia.



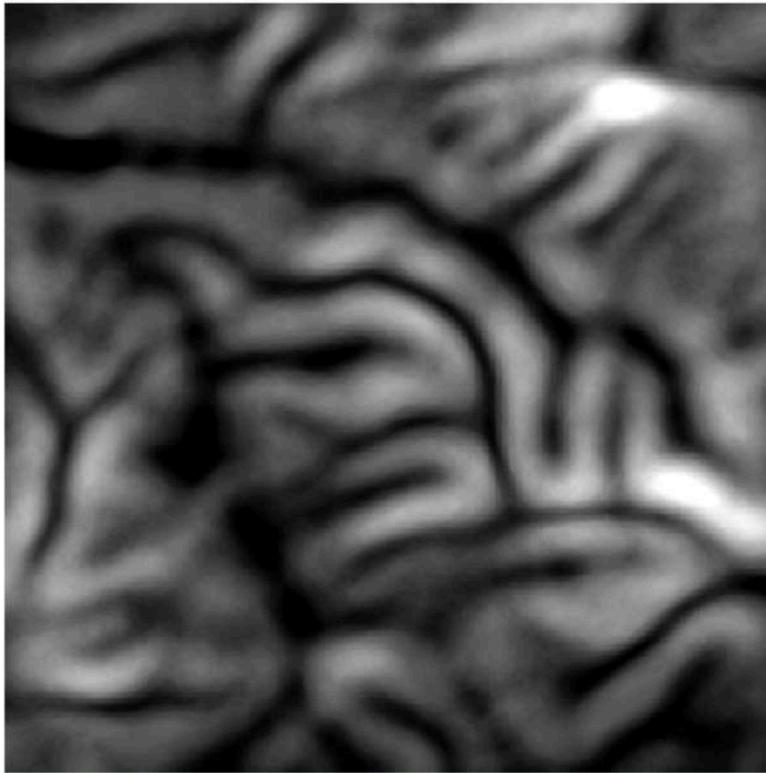
**REFERENCIA**

**MÁXIMO: 2,268**

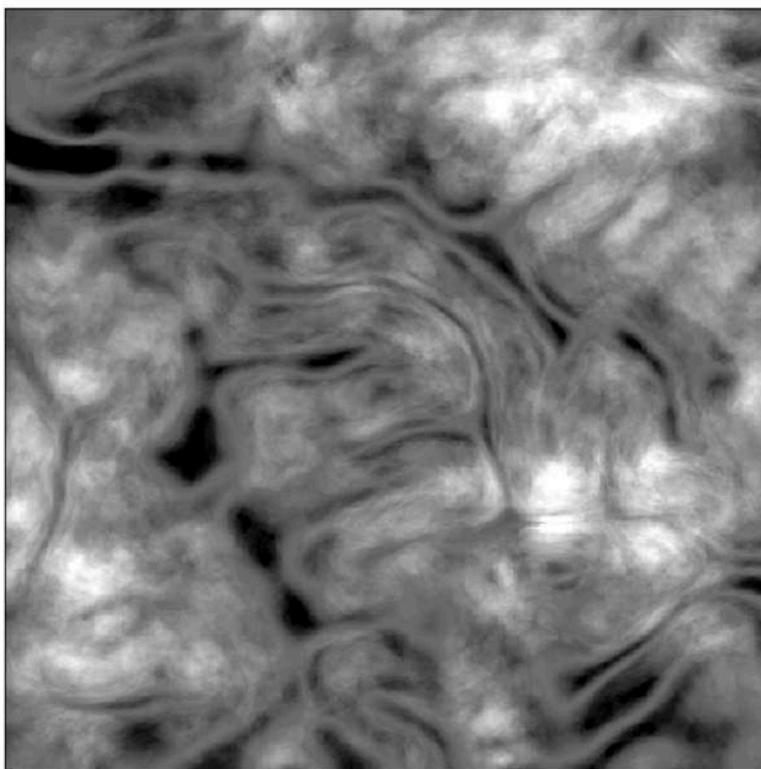
**MÍNIMO: 0**

**Imagen 29:** Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 100 metros. **Fuente:**

**Creación Propia.**



**Imagen 30:** Promedio de modelo de pendiente con puntos aleatorios separados a 250 metros.  
**Fuente:** Creación Propia.



**Imagen 31:** Modelo digital de desviaciones para los puntos aleatorios cada 250 metros. **Fuente:** Creación Propia.

Se establece una relación visual y analítica entre el modelo digital de promedio de pendientes y el modelo digital de desviación estándar de la pendiente. Al comparar ambos modelos, se observa que las zonas que presentan tonalidades más oscuras (negro) en el modelo de promedio de pendientes, indicando áreas de baja pendiente; coinciden espacialmente con sectores que en el modelo de desviación estándar, también exhiben valores bajos de desviación, cercanos a cero.

Así como, en las zonas donde el modelo de promedio de pendientes muestra valores elevados (blancos), el modelo de desviación estándar también refleja una mayor variabilidad.

Esto muestra que, en zonas de pendientes bajas, se presenta poca variabilidad local, es decir, la pendiente es homogénea en el entorno. Esta relación es coherente con la lógica geomorfológica, ya que en áreas planas o suavemente onduladas se espera una menor fluctuación de los valores de pendiente, mientras que en sectores con mayor relieve o complejidad topográfica, las desviaciones aumentan.

### **1.5 MDP generados para el análisis de la variación de tamaño de pixel**

Uno de los objetivos a cumplir en este trabajo es analizar la influencia de la variación del tamaño de píxel para el cálculo de la pendiente, para ello se emplea la herramienta *Resample* en el software ArcGIS. Esta función permite modificar la resolución espacial de un dataset ráster, utilizando reglas específicas de interpolación para redefinir los valores en los nuevos tamaños de píxel. La intención es generar diferentes modelos a partir de un modelo base, ajustando su resolución y simulando distintos niveles de detalle.

Para la generación de los nuevos modelos se utiliza el método de remuestreo por vecino más próximo, el cual asigna a cada nueva celda el valor del píxel original más cercano, conservando así los valores discretos sin interpolación, como se detalla en el punto 3.1 del "Marco Teórico".

Cabe destacar que los modelos base, originalmente, presentan un tamaño de celda de 10x10 metros. A partir de ellos, se generaron versiones de remuestreo con tamaños de celda de 22,1x22,1, 50x50, 75x75 y 100x100 metros, para analizar cómo la resolución espacial influye en el cálculo de la pendiente y de la pérdida de suelo.

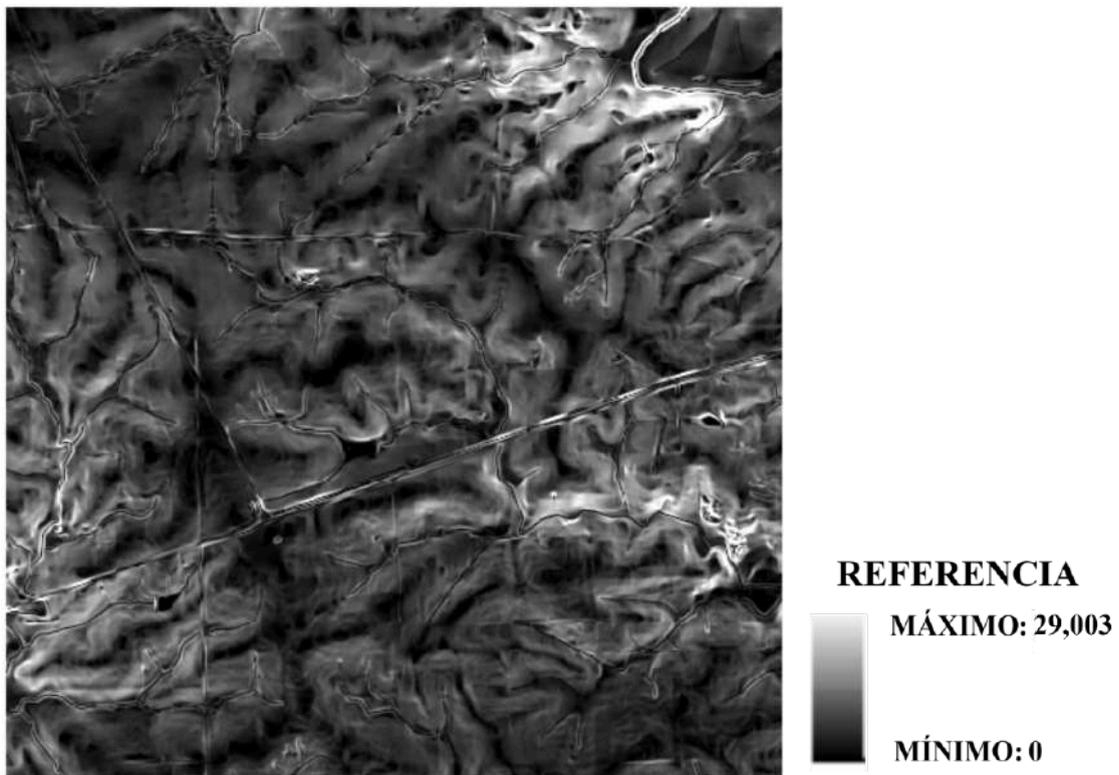
Se utiliza un tamaño de píxel de 22,1 metros para el remuestreo porque este valor corresponde a la unidad estándar de longitud de pendiente utilizada en la ecuación del factor LS (según la modificación de la FAO de 1977). Este aspecto será desarrollado con mayor detalle en secciones posteriores.

A continuación, se presentan las imágenes correspondientes a los resultados obtenidos a partir del proceso de remuestreo aplicado sobre el MDP original. Estos resultados permiten visualizar cómo varían espacialmente los valores estimados de pérdida de suelo en función del cambio en la resolución del modelo, desde la imagen N°32 a la imagen N°36 .

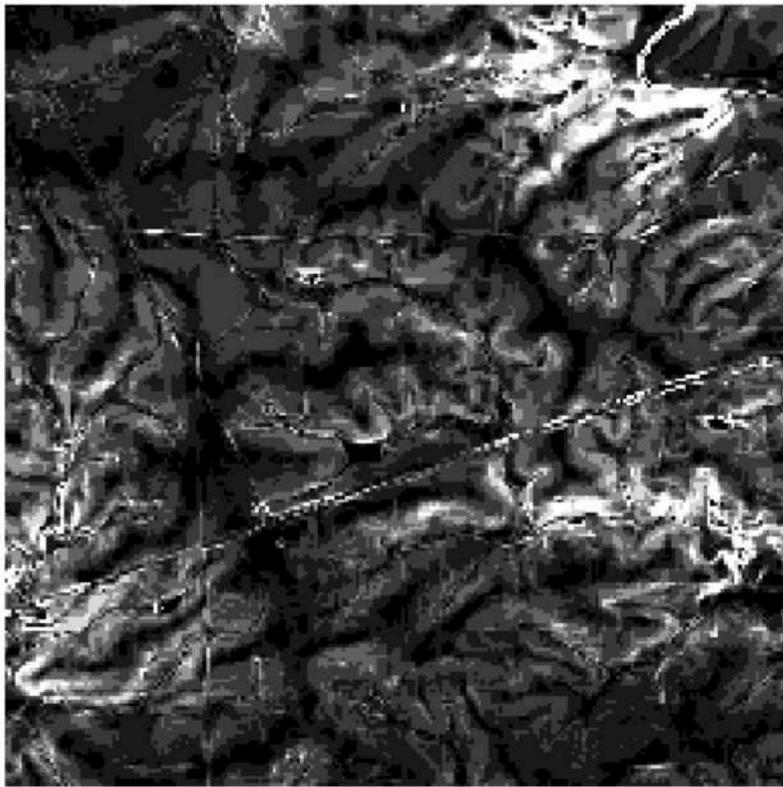
En el caso de los MDP realizados anteriormente, generados con puntos aleatorios cada 25, 50, 100 y 250 metros; se realiza el cálculo de pérdida de suelo utilizando la RUSLE. Se realiza el mismo procedimiento para los demás “modelos base”, al los que se le aplican los respectivos remuestreos.

Los modelos que van a servir de modelo base son los siguientes: MDP original, MDP promedio de puntos cada 25 metros, MDP promedio de puntos cada 50 metros, MDP promedio de puntos cada 75 metros y MDP promedio de puntos cada 100 metros.

Desde el Anexo N°8 hasta el Anexo N°27, se muestran los resultados obtenidos para el resto de los casos MDP utilizados (MDP promedios espaciales con separación de 25 m, 50 m, 100 m y 250 m), y sus respectivas versiones de resamplado a resoluciones de 22,1x22,1 m, 50x50 m, 75x75 m y 100x100 m.



*Imagen 32: MDP original, tamaño de píxel 10x10 metros. Fuente: Creación Propia.*

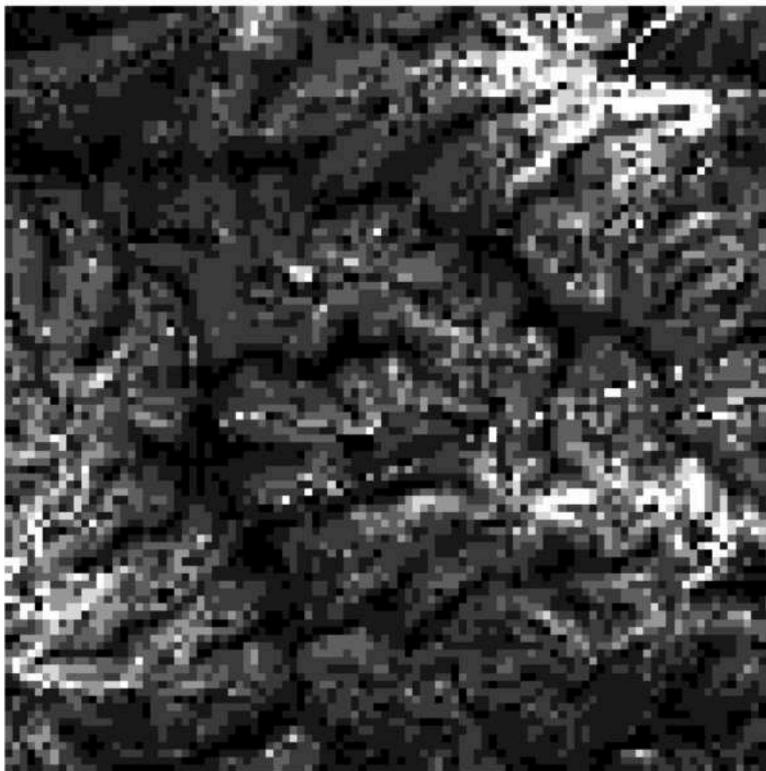


**REFERENCIA**

**MÁXIMO: 33,132**

**MÍNIMO: 0,504**

*Imagen 33: Remuestreo de MDP original, tamaño de píxel 22,1x22,1m. Fuente: Creación Propia.*

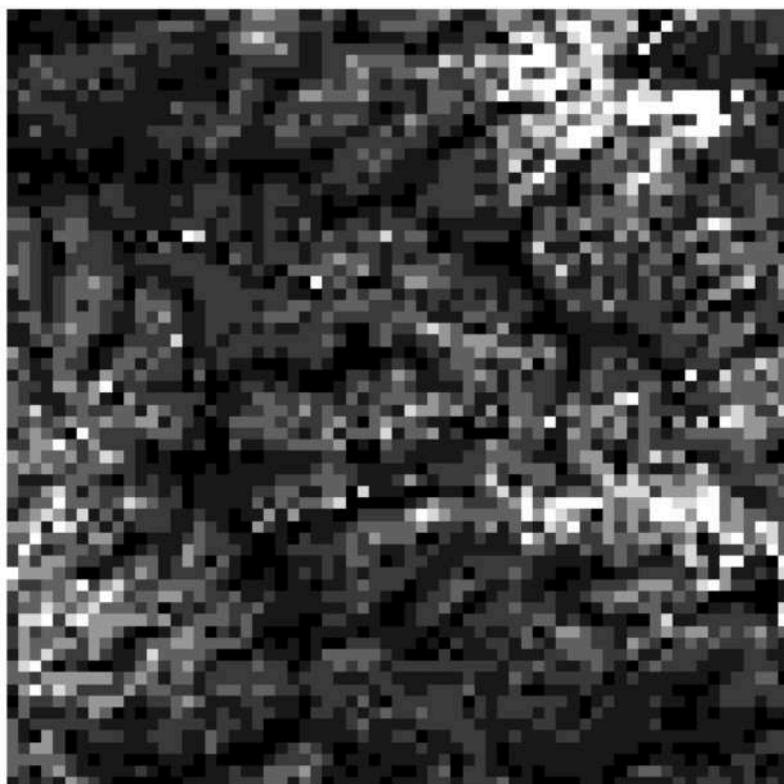


**REFERENCIA**

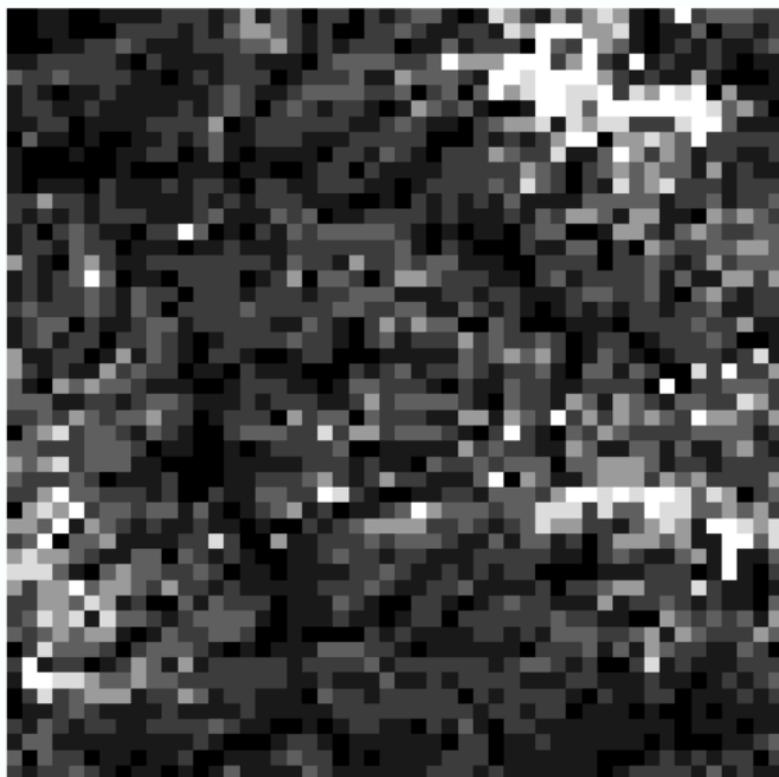
**MÁXIMO: 28,714**

**MÍNIMO: 0,504**

*Imagen 34: Remuestreo de MDP original, tamaño de píxel 50x50m. Fuente: Creación Propia.*



*Imagen 35: Remuestreo de MDP original, tamaño de píxel 75x75m. Fuente: Creación Propia.*



*Imagen 36: Remuestreo de MDE original, tamaño de píxel 100x100m. Fuente: Creación Propia.*



El factor K se define como la “Susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión hídrica”, esto significa que depende exclusivamente de las características del perfil del suelo. (Renard et al., 1997)

Según la fórmula de Wischmeier, el valor de K depende de la distribución del tamaño de partículas del horizonte superficial, el contenido de materia orgánica, la estabilidad estructural y la permeabilidad del perfil. A continuación se procede a presentar la fórmula modificada de Wischmeier y Smith (1978), con la cual se va a realizar el cálculo del factor K.

Ecuación modificada de Wischmeier y Smith (1978) :

$$100K = 1,292 \cdot [2,1M^{1,14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - a) + 3,25 \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)]$$

Donde:

- **K:** (t/ha) x R(SMD)-1
- **M:** (% limo +% arena muy fina ) \* (100 - % de arcilla)  
Arcilla: fracción < 2 µm  
Limo: 2 a 50 µm  
Arena muy fina: 50 a 100 µm
- **a:** % de materia orgánica de la capa superficial del suelo. Cuando el dato disponible es en carbono orgánico debe multiplicarse por 1.724.  
Fórmula: MO (%)=C (%)×1,724
- **b:** estructura superficial, corresponde 1, 2, 3 o 4 según la escala de la imagen N°38.

Estructura superficial	Valor de b
Muy buena estructura. Granular muy fina	1
Buena estructura. Granular fina	2
Estructura regular	3
Mala estructura. Bloques, laminar o masiva	4

**Imagen 38:** Factor b para ecuación modificada de Wischmeier y Smith (1978): estructura superficial.

**Fuente:** Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (2020).

- **c:** permeabilidad de la capa menos permeable del perfil, corresponde 1 a 6 según datos de la imagen N°39:

Permeabilidad	Valor de c
Rápida, mayor a 12,5 cm/h	1
Moderadamente rápida, de 6,25 a 12,5 cm/h	2
Moderada, de 2,0 a 6,25 cm/h	3
Moderadamente lenta, de 0,5 a 2,0 cm/h	4
Lenta, de 0,125 a 0,5 cm/h	5
Muy lenta, inferior a 0,125 cm/h	6

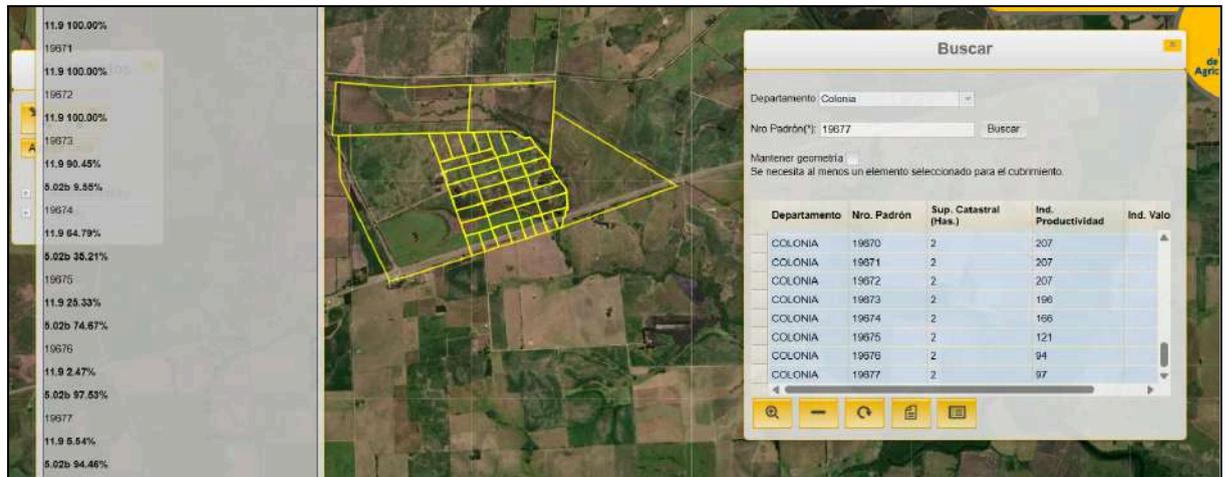
**Imagen 39:** Factor c para ecuación modificada de Wischmeier y Smith (1978): estructura superficial.

**Fuente:** Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (2020).

Para ello, se analiza la cartografía CONEAT, es decir, la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000, vista en la imagen N°40, donde de allí surgen los tipos de grupos CONEAT que le corresponden a cada predio.



localidad de Tarariras padrones N° 2928, 2929, 7052, 7053, 23904, y del padrón 19642 al 19677, como se muestra en la imagen N° 41.



**Imagen 41:** Clasificación de suelos según carta de suelos. **Fuente:** Visualizador del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

Se determina que los suelos que categorizan la zona son 11.9 según carta de suelos del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Para ver las características geológicas y morfológicas de este suelo, se deja detallado en el anexo N°1.

Según descripción de suelo, se categoriza como suelo franco arcillosa a franco arenosa pesada. La estimación típica para suelos de esta textura es:

- Arcilla: 30%
- Limo: 35%
- Arena muy fina: 20%
- Materia orgánica: fertilidad media a alta, es decir, suelos agrícolas con rotación. 2.5% de carbono orgánico
- Fórmula:  $a = MO(\%) = C(\%) \times 1,724$ .

Entonces el factor a es **a= 4.31% MO**.

Como se menciona la definición de suelos de categoría 11.9, estos son suelos agrícolas con buena estructura por laboreo y raíces, **b = 2** (estructura granular media o bloque subanguloso).

En cuanto a la permeabilidad de los suelos, estos son suelos moderadamente bien drenados, **c = 3** (permeabilidad moderada).

Sustituyendo valores en la ecuación,  $M=(35+20) \times (100-30)=55 \times 70=3850$ .

Sustituyendo todos los parámetros en la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), se tiene que el factor **K** es **0,25 t·ha<sup>-1</sup>·SMD<sup>-1</sup>**, aproximadamente, para los suelos ubicados en Tarariras.

### Cálculo de factor k para Facultad de Veterinaria:

Aplicando el mismo procedimiento para el suelo de la Facultad de Veterinaria, se seleccionan los padrones correspondientes a la zona, estos son los padrones N° 430866 - 146161 - 146162 - 146163 - 146164 - 146165 - 146166, como se muestra en la imagen N° 42.



**Imagen 42:** Clasificación de suelos según carta de suelos. **Fuente:** Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

Según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, el suelo de la zona de la Facultad de Veterinaria es el categorizado como suelo 10.6 b. Como se describe en el anexo N°2, es un suelo Brunosol Subéutrico, de textura franco limosa, estimando como valores típicos de granulometría, los siguientes valores :

- Limo = **50%**
- Arena muy fina = **5%**
- Arcilla = **20%**

Entonces:

$$M=(50+5)\times(100-20)=55\times 80=4400M$$

Como el suelo tiene "*color pardo a pardo oscuro, fertilidad alta*", esto corresponde a un contenido **alto de materia orgánica**, típico de suelos pradera. Por ende, una estimación razonable para el carbono orgánico (CO) sería:

$$\circ \text{ CO} \approx 2.0\% \rightarrow \text{MO} = \text{CO} \times 1.724 = \mathbf{3.45\%}$$

Por lo tanto, **a = 3.5**.

Teniendo en cuenta la escala de Wischmeier y que el suelo presenta características de "*Textura franco limosa*", buena fertilidad, sin signos de compactación, esto indica estructura granular fina a media, entonces **b = 2**.

En cuanto a la permeabilidad, son suelos "*moderadamente bien drenados, sin presencia de horizontes arcillosos restrictivos o compactados evidentes*", esto significa permeabilidad moderada, entonces **c = 3**.

Sustituyendo todos los parámetros en la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), se tiene que el factor K es **0.2625 t·ha<sup>-1</sup>·SMD<sup>-1</sup>**.

**Factor LS:** (Longitud y Gradiente de la Pendiente).

El factor LS es el factor topográfico que determina la contribución del relieve a la erosión hídrica. Para calcularlo, se emplea la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith, modificada por la FAO en 1977:

$$LS = (L/22.1)^m \times (0,0650 + 0,04536 \times P + 0,0065 \times P^2)$$

Los datos que se solicitan al usuario son:

- **L:** Longitud de la pendiente expresada en metros (m), se define como la distancia hacia abajo en la pendiente desde el punto donde se origina el escurrimiento hasta donde éste entra en un desagüe bien definido o donde la disminución del gradiente de la pendiente provoca el comienzo de la sedimentación.

- **P:** Gradiente de la pendiente, expresado en unidades de caída o ascenso vertical por 100 unidades de distancia horizontal (%).

- **m:** exponente que varía con la pendiente, de la siguiente manera:

- Para pendientes menor a 1% m=0,2
- Para pendientes entre 1 y 3 % m= 0,3
- Para pendientes mayor a 3% y menor a 5 % m= 0,4
- Para pendientes mayores de 5% m= 0,5

El factor S es determinado como se muestra en el punto 1.4 de "Cálculo y Análisis" donde se generen los MDP, y en el punto 3. de "Cálculo y Análisis".

Sin embargo el valor de L que se utiliza para el caso del predio de Tarariras es L=5000 metros, y en el caso de la Facultad de Veterinaria L= 1000 metros.

**Factor P:** Práctica mecánica de apoyo.

Este factor está asociado al laboreo ya que depende de la rugosidad que genera el mismo. En este caso, la selección se va a basar en los tres tipos de práctica de mecánica de apoyo:

- En sistemas de siembra directa, P = 1.
- Cuando la siembra se realiza cortando el sentido de la pendiente, P=0,9.

Para ambos casos, se aplica un factor de práctica mecánica de apoyo igual a  $P = 1$ , ya que ambos campos se consideran áreas de cultivo que implementan un sistema de siembra directa. Este tipo de manejo del suelo no contempla prácticas mecánicas adicionales de conservación, por lo que no se realiza ningún ajuste al valor del factor P.

**Factor C:** Uso y Manejo.

Este factor involucra los aspectos más importantes sobre los cuales el hombre puede actuar para reducir la erosión. Es crucial porque, dependiendo de su magnitud, es el que tiene mayor impacto. En términos generales, es el principal elemento que influye en la erosión y degradación de los suelos, incluso en sistemas de no laboreo. Se presentan en la tabla los períodos de cultivos, imagen N°43.

Períodos del Cultivo								
	PC	MI	MF	EI30	RPS	ERP	C	A
▶	0	1	2	0,220	0,570	1,000	0,125	13,327
	1	3	4	0,250	0,740	1,000	0,185	19,660
	2	5	6	0,080	0,610	1,000	0,049	5,186
	3	7	8	0,080	0,370	1,000	0,030	3,146
	4	9	10	0,180	0,370	1,000	0,067	7,078

*Imagen 43: Períodos de cultivos. Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.*

En este cuadro se observan, para cada período de cada componente los valores de EI30 (Erosividad de lluvias acumulada del período), RPS (Relación de pérdida de suelo entre la situación del sistema en el período y el suelo desnudo), ERP (efecto residual de una pastura anterior), C (valor del factor C en el período) y A (erosión promedio anual estimada en el período).

Para definir la duración de cada período, digite valor en número del mes (por ej: enero=1; febrero=2; marzo=3; etc.) en la columna MI para el mes inicial y en la columna MF para el mes final. Cuando un período no corresponda, deje en cero MI y MF. Las 2 últimas columnas del cuadro de períodos muestran las estimaciones parciales realizadas por el programa del Factor C y de la tasa de erosión (A), para cada uno de los períodos considerados en cada componente.

Para el cálculo del factor C se considera una rotación de cultivos de cinco años, incluyendo un año de descanso al final del ciclo. En cada año agrícola se incluye un cultivo de invierno y uno de verano (por ejemplo, trigo en invierno y soja en verano), buscando representar las prácticas agrícolas típicas de la zona y su influencia en la cobertura y protección del suelo.

En ambos casos el **factor C es de 0,049**.

Una vez analizados cada uno de los factores seleccionados que influyen en la fórmula RUSLE, se plasman los dichos valores en tablas N°2 y N°3.

Para el predio en cercanía a la localidad de Tarariras en el departamento de Colonia, contienen los siguientes valores:

Factor	Valor
R	424,8
K	0,2500
S	Depende de MDP generado. Ver punto 1.4 y 1.5 de Cálculo y Análisis
L	5000
P	1
C	0,049

**Tabla 2 :**Parámetros para formula RUSLE para área de Tarariras. **Fuente:** Creación propia.

Para la práctica a realizar en la Facultad de Veterinaria:

Factor	Valor
R	427,4
K	0,2625
S	Depende del MDP generado. Ver punto 3. de "Cálculo y Análisis"
L	1000
P	1
C	0,049

**Tabla 3:** Parámetros para formula RUSLE para predio de la Facultad de Veterinaria. **Fuente:** Creación Propia.

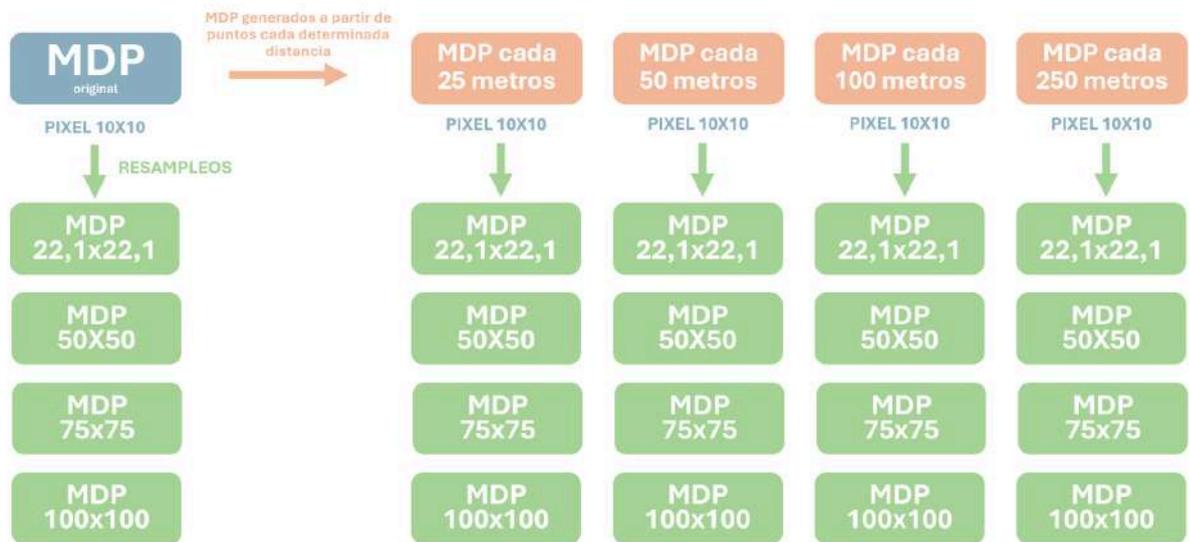
### **1.6.2 Cálculo de pérdida de suelo**

Una vez definidos los parámetros específicos para cada caso de estudio, estos se incorporan al script programado en Octave. En el Anexo N.º 3 se incluye el código utilizado para el cálculo del factor de pérdida de suelo. Para este cálculo se mantienen todos los parámetros fijos (ver tabla N.º 2 y tabla N.º3) y la pendiente y longitud depende del MDP seleccionado.

El archivo de entrada con los valores de pendiente que se utiliza en Octave debe ser de tipo ASCII, el cual se genera a partir de la herramienta *Raster to ASCII* del software ArcGIS. Esta conversión permite transformar los datos ráster en un archivo con extensión .asc, adecuado para su procesamiento numérico.

Una vez ejecutado el script que nos da los resultados, en formato ASCII, de pérdida de suelo para cada punto de cada uno de los escenarios, se aplica un código adicional con el objetivo de calcular el valor promedio de pérdida de suelo sobre el área de estudio. Este código se encuentra detallado en el anexo N.º5.

Se trabaja con los siguientes modelos producto del remuestreo indicado en el punto 1.5 del "Cálculo y Análisis": 5 MDP originales (tamaños de píxel de 10x10, 22,1x22,1, 50x50, 75x75 y 100x100 metros), 5 MDP promedio conformado por puntos espaciados a 25 metros (tamaños de píxel de 10x10, 22,1x22,1, 50x50, 75x75 y 100x100 metros), 5 MDP promedio conformado por puntos espaciados a 50 metros (tamaños de píxel de 10x10, 22,1x22,1, 50x50, 75x75 y 100x100 metros), 5 MDP promedio conformado por puntos espaciados a 100 metros (tamaños de píxel de 10x10, 22,1x22,1, 50x50, 75x75 y 100x100 metros), y 5 MDP promedio conformado por puntos espaciados a 250 metros (tamaños de píxel de 10x10, 22,1x22,1, 50x50, 75x75 y 100x100 metros). En la imagen N° 44 se muestra un diagrama para visualizar mejor el procedimiento de los modelos generados.



**Imagen 44:** MDP utilizados para el análisis. **Fuente:** Creación propia.

La ecuación utilizada para el cálculo del factor LS (longitud y gradiente de la pendiente), componente fundamental en la estimación de pérdida de suelo mediante la fórmula **RUSLE**, es la siguiente (modificada por FAO en 1977, a partir del modelo de Wischmeier y Smith):

$$LS = (L/22.1)^m \times (0,0650 + 0,04536 \times P + 0,0065 \times P^2)$$

En el contexto de un MDE, la longitud de la pendiente (L) puede interpretarse, en análisis locales, como el tamaño del píxel, al ser la distancia entre los centros de celdas adyacentes utilizadas para el cálculo del gradiente. Por lo tanto, cuando se trabaja con resoluciones menores a 22.1 metros (por ejemplo, 10 m), el término " $(L/22.1)^m$ " será efectivamente menor a 1, reduciendo el valor del factor LS.

Sin embargo, esto no implica que no exista pérdida de suelo. El modelo sigue estimando pérdida en función del relieve, aunque la magnitud calculada del LS sea menor.

En la Tabla N°4 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de pérdida de suelo para cada uno de los modelos digitales de elevación analizados. En dicha tabla, se expresa el valor

del factor A, correspondiente a la pérdida media de suelo (en toneladas por hectárea por año), según lo establece la ecuación RUSLE.

MDP	Factor A - píxel 10x10	Factor A - píxel 22,1x22,1	Factor A - píxel 50x50	Factor A - píxel 75x75	Factor A - píxel 100x100
MDP Original	20,599	20,660	20,646	20,567	20,520
MDP 25	17,257	17,222	18,448	17,361	16,435
MDP 50	11,120	11,094	11,070	10,938	11,019
MDP 100	4,447	4,443	4,439	4,423	4,444
MDP 250	4,467	4,463	4,463	4,445	4,453

**Tabla 4:** Resultados de pérdida de suelo. Unidad de factor A. (t/ha año). **Fuente:** Creación Propia.

De la Tabla N°4 se puede concluir que la variación del tamaño de píxel obtenida de un remuestreo no influye de forma directa en el valor del factor A (pérdida de suelo). Esto se debe a que al modificar el tamaño del píxel, únicamente se alteran las dimensiones espaciales de representación, sin incorporar nueva información. Por esta razón, dentro de cada fila de la tabla, donde se mantiene constante el modelo y varía sólo el tamaño del píxel, la variación en el valor del factor A es mínima o irrelevante.

No obstante, al comparar los valores del factor A entre diferentes modelos de MDP construidos a partir de muestreos aleatorios a distintas distancias, pero con igual tamaño de píxel, se observan diferencias significativas. Esta variabilidad se explica porque al generar un MDP a partir de puntos extraídos aleatoriamente con cierta separación, se produce una pérdida de información respecto al modelo original. Cuanto mayor es la distancia entre puntos de muestreo, mayor es la pérdida de detalle del terreno, lo que repercute en los resultados obtenidos a partir del modelo generado.

Como consecuencia, la representación del relieve se simplifica, lo que implica una menor variabilidad en la pendiente, factor clave en la estimación del factor A mediante el modelo RUSLE. Esta simplificación conduce a una subestimación del valor del factor A, ya que se omiten elementos topográficos relevantes que influyen directamente en los procesos de erosión hídrica.

En este contexto, se destaca que el tamaño del píxel debe ser evaluado en conjunto con la resolución del MDP original. Aunque por sí solo no afecta de manera significativa el valor del factor A, puede influir en la calidad visual de los datos y en la precisión de los productos cartográficos derivados. Asimismo, la metodología empleada para la generación del MDP tiene un impacto directo en la precisión de los cálculos, ya que la aleatoriedad en la selección de puntos genera modelos de distinta calidad, afectando directamente los resultados obtenidos.

Es recomendable, trabajar con MDPs que presenten una densidad de datos adecuada al objetivo de cada proyecto/trabajo, ya que muestreos aleatorios con grandes distancias entre

puntos pueden reducir la fidelidad del modelo y limitar la capacidad para representar con precisión las condiciones del terreno. Esta reducción en la resolución puede influir en la precisión de los análisis y, por ende, en la toma de decisiones, especialmente en ámbitos relacionados con la planificación del uso del suelo.

Para complementar, se realiza una simulación de cálculo de pérdida de suelo con la herramienta *Erosión 6.0*. De esta forma, en la Imagen N°45, se contempla la manera en que se realiza dicho cálculo tradicionalmente en el país. Para ello, se utilizan los factores determinados anteriormente para la práctica en la zona de Tarariras y con un valor de pendiente de 4%.

The screenshot shows the 'Ingreso de Factores' window with the following details:

- Resultados:**  $A = R(424.8) \times K(0.250) \times L(7.091) \times S(0.462) \times P(1.000) \times C(0.049) = 17.0 \text{ Mg/ha}$ . Tolerancia 7.0 Mg/ha/año de pérdida de suelo - Erosión anual estimada en Mg/ha: 17.0 - 2 veces/tolerancia
- Factor R: Erosividad de la Lluvia:** Localidad: Colonia, Factor R: 424.8
- Factor K: Erodabilidad del Suelo:** Unidad / Suelo - CRSU76 1 : 1.000.000, Factor K: 0.25
- Factor LS: Longitud y Gradiente de la Pendiente:** Gradiente: 4, Longitud (Mts.): 5000, Relación de erosión: Mixto. Factor L: 7.091, Factor S: 0.462, Factor LS: 3.276.
- Factor P: Práctica Mecánica de Apoyo:** Aplica práctica mecánica de apoyo?: No aplica, Factor P: 1. Indique la práctica mecánica de apoyo: Construcción de sistemas de terrazas, % cubierto por pastura: 0.
- Factor C: Uso y Manejo:** Ingreso del Factor: Factor C: 0.049 (Manual selected). Selección de Factor C Pre Calculado: Tipo de Sistema, Sistema.

**Imagen 45:** Cálculo de la pérdida de suelo en programa *Erosión 6.0*. **Fuente:** Creación en conjunto con el profesor agrónomo Leonardo Víque.

Los resultados generados a partir del método empleado en este trabajo (aproximadamente 20 t/ha año para el caso del MDP “original”) y el calculado por el programa *Erosión 6.0* (17 t/ha año) son cercanos, con una diferencia de 3 t/ha año.

Cabe destacar, que la pérdida de suelo utilizando el MDP con puntos aleatorios distribuidos cada 25 metros, arroja un valor aproximado de 17 t/ha año, coincidente con el calculado en el programa, lo que podría indicar fiabilidad en el método.

### **1.7 Análisis del impacto de la separación entre puntos sobre la estimación de la pérdida de suelo**

<b>MDP</b>	<b>Factor A - Pixel 10x10</b>	<b>Distancia entre puntos</b>	<b>Porcentaje</b>
MDP original	20,599	-	100
MDP 25	17,257	25	84
MDP 50	11,120	50	54
MDP 100	4,447	100	22
MDP 250	4,467	250	22

*Tabla 5: Unidad de factor A: (t/ha año). Fuente: Creación Propia.*

En la Tabla N°5 se presenta el valor de pérdida de suelo correspondiente al MDP original, considerándolo como referencia o valor base. A partir de este valor, se analiza la variación porcentual respecto a otros MDP generados con distintas distancias de separación entre puntos: 10, 25, 50, 100 y 250 metros. El valor base de pérdida de suelo obtenido para el MDP original fue de 20,599 t/ha/año, mientras que los modelos con menor densidad de puntos arrojaron los siguientes resultados: 17,257t/ha/año; 11,120t/ha/año; 4,447t/ha/año; y 4,467 t/ha/año, respectivamente.

El análisis comparativo permite observar que al tomar puntos con una separación de 50 metros, el valor estimado de pérdida de suelo es aproximadamente la mitad del valor considerado como verdadero, lo cual evidencia una subestimación significativa del fenómeno. Esta situación resalta la importancia crítica que tiene la densidad de puntos.

Esta lectura de la tabla pone en evidencia que el cálculo del factor A depende directamente de la representación topográfica del terreno. A medida que se incrementa la separación entre puntos, el modelo pierde capacidad para captar los detalles del relieve, simplificando la morfología del terreno y por lo tanto la pendiente. Como resultado, los factores relacionados con la pendiente y la longitud de pendiente; esenciales para la estimación de la erosión en el modelo RUSLE, son subvalorados, y por ende, también lo es la pérdida de suelo calculada.

En síntesis, la separación entre puntos en la toma de datos topográficos influye en la estimación de la pérdida de suelo. A medida que se incrementa dicha separación, se pierde detalle del relieve y se compromete la precisión del modelo generado.

El hecho de que el modelo con puntos separados cada 50 metros subestime en un 50% la pérdida de suelo considerado como verdadero, muestra que una densidad inadecuada afecta significativamente la calidad del resultado. Por ello, es fundamental que la densidad de puntos sea definida en función de los objetivos del estudio, teniendo en cuenta la escala del análisis y la sensibilidad del fenómeno a modelar.

## 1.8 Análisis de pérdida de información en función de la distancia de muestreo

La siguiente tabla tiene como objetivo mostrar cómo varía el contenido de información topográfica en función de la distancia entre puntos de muestreo utilizados para la generación de modelos digitales de elevación. Este análisis busca cuantificar el porcentaje de detalle que se conserva, o que se pierde, cuando se modifica la densidad del relevamiento.

MDP	Distancia	Puntos sobre cuadrícula	Puntos sobre cuadrícula de 10x10	Información original %	Pérdida de Información %
MDP original	10	4	4	100	0
MDP espaciados a 25	25	4	9	44	56
MDP espaciados a 50	50	4	36	11	89
MDP espaciados a 100	100	4	120	3	97
MDP espaciados a 250	250	4	750	1	99

**Tabla 6:** Tabla de resultados de información original e información perdida. **Fuente:** Creación Propia.

En términos prácticos, si en lugar de realizar un relevamiento topográfico con una separación de puntos cada 10 metros, se opta por hacerlo cada 25 metros, se pierde aproximadamente un 56% de la información disponible. Esto significa que el nuevo modelo solo representará un 44% del detalle que se podría obtener con una grilla más densa. Esta pérdida de información se observa desde el MDP generado por puntos aleatorios a 25 metros de distancia, generando reducciones en la calidad del modelo generado. En este caso específico, un aumento de 2,5 veces en la distancia de muestreo (de 10 m a 25 m), implica perder más de la mitad de los datos que describen la superficie del terreno.

Este análisis permite ver no sólo la pérdida de información cuantitativa derivada de la reducción en la densidad de puntos, sino también cómo esta pérdida afecta directamente a los resultados, la representación de la pendiente y la confiabilidad general de los productos cartográficos derivados.

Este análisis demuestra que la densidad de puntos en un relevamiento topográfico tiene una influencia directa sobre el modelo digital generado. La reducción en la cantidad de puntos, producto de aumentos en la distancia de muestreo, implica una disminución en la capacidad del modelo para representar con fidelidad la superficie del terreno. Esta pérdida de información compromete la precisión de cálculos derivados, como la estimación del factor A. Por tanto, se refuerza la necesidad de adaptar la densidad de puntos al objetivo específico del estudio, priorizando relevamientos de alta resolución en casos donde se requiera un análisis detallado del relieve y sus implicancias en procesos erosivos.

Además, al complementar el análisis realizado en la tabla N°5 del punto 1.7 de “Cálculo y Análisis” con el de la tabla N°6 del punto 1.8, se puede afirmar que, si bien al comparar el modelo original con el modelo generado a partir de puntos espaciados cada 25 metros, se conserva un 44 % de la información original y se pierde un 56 %; de acuerdo con la tabla N°5, la diferencia en el cálculo de la pérdida de suelo entre el modelo de pendiente original (considerado como verdadero) y el modelo de pendiente generado con puntos espaciados cada 25 metros es de 16 %.

## **1.9 Análisis de desviación**

Con el fin de profundizar en el análisis de los valores obtenidos, se trabaja ahora sobre los MDP a partir del cálculo de la desviación estándar de pendientes para cada caso. Para ello, se ha desarrollado un script en Octave que permite determinar el valor promedio de desviación estándar de cada uno de los grupos de MDP generados. Este valor de desviación resulta útil para estimar la dispersión de los datos en torno al valor medio, y permite representar los intervalos de confianza dentro de los cuales se encuentran los valores de pérdida de suelo estimados para cada modelo.

El cálculo de estos intervalos se realiza sumando y restando el valor de la desviación a cada promedio de pérdida de suelo obtenido, de manera de visualizar el rango en el que puede encontrarse cada caso bajo condiciones similares. Cabe aclarar que estos intervalos sólo se aplican a los modelos en los que se ha perdido información a causa de una menor densidad de muestreo, es decir, aquellos en los que se tomaron puntos cada determinada distancia. Por este motivo, el análisis se restringe a los MDP generados con píxeles de 10x10 metros, correspondientes al modelo original y a los modelos con separación de puntos de 25m, 50m, 100 m y 250 m; (es decir, que a partir de aquí, se analiza la primer columna de la tabla N°4).

Por otro lado, se aclara que en los casos donde se modificó exclusivamente el tamaño del píxel dentro de un mismo modelo, mediante técnicas de resampleo, los valores de pérdida de suelo no presentaron variaciones significativas. En consecuencia, estas diferencias fueron consideradas despreciables desde el punto de vista analítico, y no fueron incluidas en este análisis de desviaciones.

Complementariamente, se desarrolla un segundo script en Octave que permite calcular la mediana (Q2) de la matriz de pendientes promedio para cada uno de los modelos, así como los cuartiles Q1 y Q3. Este cálculo se incorpora con el objetivo de comparar el comportamiento de los valores promedio de pendiente frente a la distribución de pendientes representada por los cuartiles, permitiendo así una evaluación más robusta y estadísticamente completa.

La tabla N°7 que se presenta a continuación, muestra los valores promedio de pérdida de suelo para cada modelo, junto con su desviación estándar. Esto permite visualizar el rango dentro del cual se encuentran los valores reales posibles para cada caso modelado, teniendo en cuenta la variabilidad propia de cada MDP.

MDP	D.E.	Promedio - Desviación	Promedio Pendiente	Promedio + Desviación
MDP original	0	-----	3,461	-----
MDP 25	0,269	2,975	3,244	3,513
MDP 50	0,770	1,899	2,669	3,439
MDP 100	0,967	0,648	1,615	2,582
MDP 250	0,967	0,648	1,615	2,582

**Tabla N°7:** Pérdida de suelo promedio  $\pm$  desviación estándar para diferentes densidades de muestreo.

**Fuente:** Creación Propia.

En la Tabla N°8, se visualizan los resultados obtenidos correspondientes a la mediana de las pendientes y sus respectivos cuartiles (Q1 y Q3) para cada uno de los MDP considerados en el análisis. Estos valores fueron calculados a partir de las matrices de pendientes promedio, utilizando un código desarrollado en Octave, el cual se encuentra detallado en el Anexo N°6.

Este análisis estadístico complementa el estudio previo realizado sobre los valores de pendiente promedio y su desviación estándar. La inclusión de la mediana y los cuartiles permite observar la distribución de los datos y detectar posibles asimetrías o dispersiones en los valores de pendiente, que no siempre se reflejan a través del promedio. En este sentido, la mediana (Q2) ofrece una medida que no se ve afectada por valores extremos, es decir, el intervalo que contiene al 50% central de los datos, mientras que los cuartiles delimitan el rango intercuartílico.

A través de esta tabla se busca contrastar el comportamiento de las pendientes obtenidas para distintos niveles de muestreo, observando cómo se modifica la forma de la distribución estadística a medida que se reduce la densidad de puntos.

MDP	Q1	Q2	Q3
MDP original	1,746	3,492	5,241
MDP 25	1,746	3,475	4,279
MDP 50	1,606	2,444	3,562
MDP 100	0,977	1,536	2,112
MDP 250	0.960	1,536	2,130

**Tabla N°8:** Mediana y cuartiles (Q1, Q2, Q3) de pendientes para diferentes densidades de muestreo.

**Fuente:** Creación Propia.

La comparación entre el valor promedio y la mediana (Q2) de las pendientes permite evaluar el sesgo de la distribución de estos datos y, por ende, inferir características morfológicas del terreno. Cuando el promedio es mayor que la mediana, se indica la presencia de valores extremos altos, lo que corresponde a áreas con laderas pronunciadas o cortes abruptos. Por el contrario, si el promedio es menor que la mediana, sugiere la existencia de valores extremos bajos, típicos de zonas predominantemente llanas con pocos sectores inclinados. Finalmente, cuando promedio y mediana son aproximadamente iguales, la distribución es simétrica, lo que evidencia una pendiente homogénea en el área de estudio.

Para este análisis se utiliza el criterio de Evans (1972) y Moore, I.D., Grayson, Ladson (1991).

*“Simetría y distribución de pendientes: Cuando promedio y mediana son similares, indica que la distribución de pendientes es aproximadamente simétrica, sin sesgos hacia valores extremos.*

*Desviación estándar como medida de variabilidad: Refleja la heterogeneidad espacial del relieve. Una desviación estándar alta implica un terreno más heterogéneo (accidentado), mientras que valores bajos indican uniformidad.”*

Al analizar los MDP y sus correspondientes pendientes, se observa que, en todos los casos, el promedio y la mediana presentan valores muy similares, indicando una distribución simétrica de las pendientes. Esto implica que el relieve de la zona es relativamente uniforme según criterio mencionado, sin sesgos pronunciados hacia pendientes extremadamente altas o bajas. Esta homogeneidad en la pendiente no excluye la existencia de pérdida de suelo, pero sí sugiere que dicha pérdida ocurre en un contexto de relieve constante, sea cual sea su magnitud. (Evans, et, 1972)

La variabilidad del relieve también puede evaluarse mediante la desviación estándar de las pendientes, la cual cuantifica la dispersión de los valores respecto al promedio. Valores elevados de desviación estándar reflejan un terreno más accidentado, con diferencias marcadas entre zonas de pendiente alta y baja. En contraste, una desviación estándar baja sugiere un relieve más uniforme y continuo. En los modelos estudiados, a medida que la densidad de puntos disminuye, la desviación estándar tiende a aumentar, indicando una mayor incertidumbre en la representación de la pendiente, pero llega a estabilizarse en valores más altos, evidenciando una pérdida de detalle del terreno. (Moore, I.D., Grayson, Ladson, et, 1991)

Este análisis se complementa con la observación de la dispersión intercuartílica, es decir, la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primero (Q1). Un amplio rango intercuartílico indica que el 50% central de los datos presenta alta variabilidad, lo cual es característico de terrenos heterogéneos y morfológicamente complejos. Por el contrario, un rango intercuartílico reducido señala que la mayoría del terreno tiene características similares de pendiente, denotando un área homogénea desde el punto de vista morfológico.

El conjunto de análisis estadísticos realizados sobre los valores de pendiente, demuestra que el área de estudio posee un relieve predominantemente homogéneo, con una distribución simétrica de pendientes y una variabilidad que se mantiene dentro de rangos coherentes. La similitud entre promedio y mediana confirma la ausencia de sesgos hacia extremos, mientras que los valores de desviación estándar y la dispersión intercuartílica evidencian la uniformidad del terreno.

Estos resultados son importantes para la interpretación y uso de los MDP en procesos de evaluación de pérdida de suelo. En particular, la disminución progresiva de la densidad de puntos muestreados impacta en la precisión de la representación del relieve, aumentando la incertidumbre en los valores de pendiente y, por ende, en las estimaciones de pérdida. Por ello, resulta fundamental ajustar la densidad de relevamiento a los objetivos del estudio para asegurar un equilibrio entre costo y calidad de la información, garantizando resultados confiables para la gestión ambiental y planificación territorial.

### **1.10 Análisis de pérdida de suelo (Factor A) en función de los valores promedio y cuartiles de pendiente**

Para evaluar la pérdida de suelo, se calcularon los valores del Factor A utilizando los promedios de pendientes ajustados por sus desviaciones estándar, así como los cuartiles de la distribución de pendientes, cuyos resultados se presentan en las tablas N°9 y N°10, respectivamente. La unidad del Factor A es toneladas por hectárea por año (t/ha·año).

MDP	Factor A Para Pend-DE	Factor A para Pend	Factor A para Pend + DE
MDP original	13,646	13,646	13,646
MDP 25	6,810	12,769	13,862
MDP 50	4,624	6,150	13,560
MDP 100	1,494	4,107	5,967
MDP 250	1,494	4,107	5,967

*Tabla 9: Cálculo de pérdida de suelo para promedios de pendiente. Unidad: t/ha·año. Fuente: Creación Propia.*

MDP	Factor A Para Q1	Factor A para Q2	Factor A para Q3
MDP original	4,340	13,776	37,669
MDP 25	4,340	13,704	17,208
MDP 50	4,092	5,682	14,066
MDP 100	1,778	3,970	5,023
MDP 250	1,778	3,970	5,057

*Tabla 10: Cálculo de pérdida de suelo para cuartiles de pendiente. Unidad: t/ha·año. Fuente: Creación Propia.*

El Factor A representa la pérdida de suelo por unidad de superficie, siendo un indicador clave para la evaluación de la erosión en un área determinada. Según estándares técnicos para suelos cultivados con planes de manejo y uso del suelo, se considera aceptable una pérdida máxima de **7 Mg/ha·año**. Por lo tanto, valores de Factor A inferiores a este umbral indican que no hay una pérdida significativa de suelo, mientras que valores superiores señalan zonas donde la erosión puede estar provocando una pérdida considerable.

En los resultados obtenidos, el MDP original presenta un valor constante y de casi el doble de pérdida de suelo (13,646 t/ha·año), respecto del límite aceptable, confirmando que la zona de estudio presentaría un riesgo significativo de erosión. En los MDP con puntos muestreados a 25 metros, el Factor A calculado con el valor promedio de pendiente también supera el umbral, pero cuando se considera en el extremo inferior del intervalo se obtiene un valor menor al límite, lo que indica la relevancia de incorporar la variabilidad estadística en la interpretación.

Para las distancias mayores entre puntos considerados (50, 100 y 250 metros), los valores promedio y mediana de Factor A disminuyen notablemente, en la mayoría de los casos por debajo del umbral de erosión aceptable. Esto refleja que, al disminuir la densidad de muestreo, el modelo pierde capacidad para detectar zonas con pendiente significativa y, por ende, subestima la pérdida real de suelo. Sin embargo, al observar los valores para Q3, aún se detectan áreas con posibles pérdidas superiores al umbral, indicando que existen sectores puntuales de riesgo que pueden pasar desapercibidos con relevamientos menos densos.

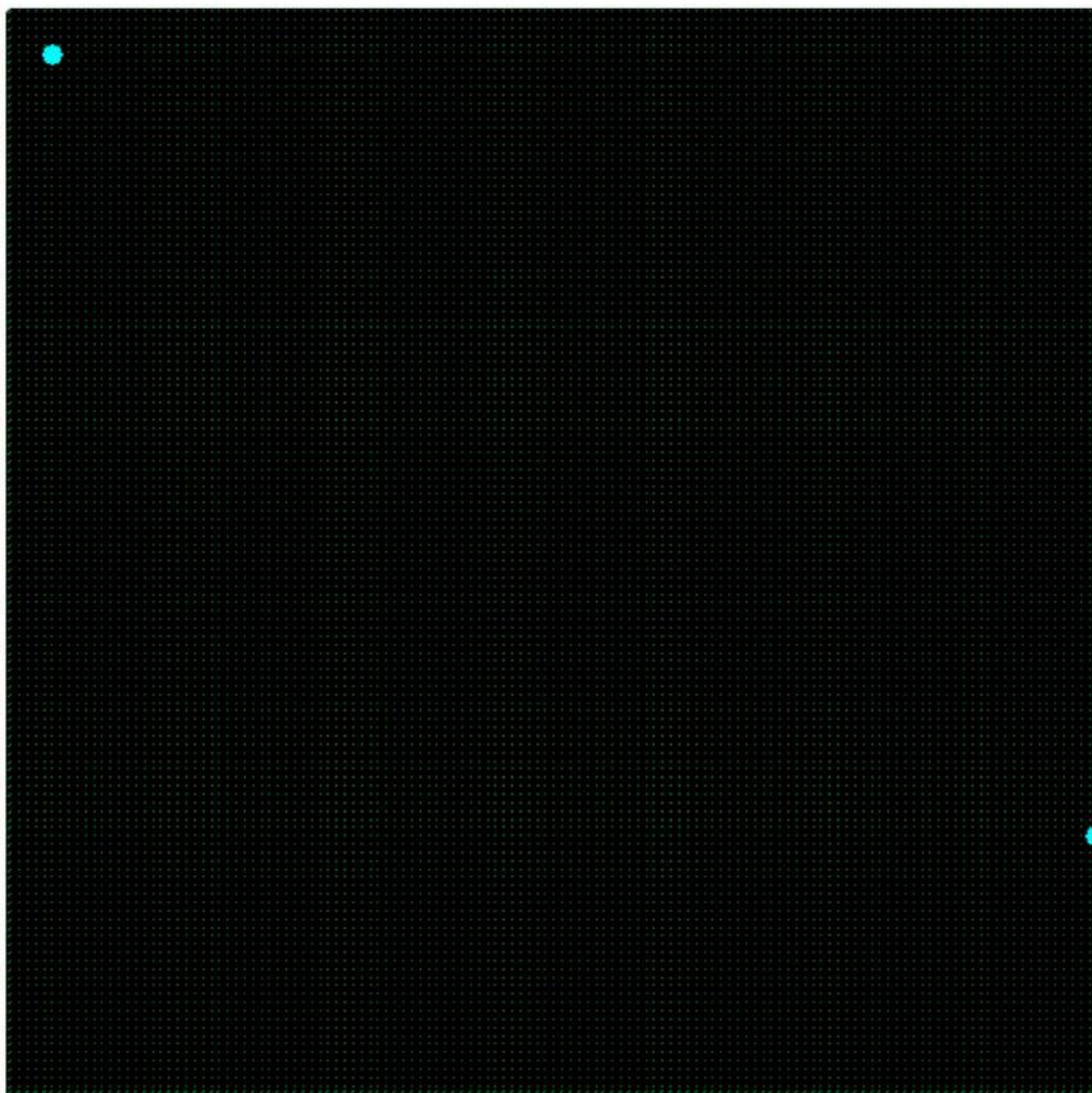
Por otro lado, al observar las tablas N°9 y N°10, se pueden notar que los intervalos no son simétricos, debido a que la ecuación del factor LS está influenciada por el parámetro  $m$ , el cual a su vez depende de la pendiente (ver fórmula en el punto 1.6 de “Cálculo y Análisis”). A mayor pendiente, mayor es el valor de  $m$ , lo que explica los saltos abruptos en las soluciones obtenidas en las tablas ya mencionadas.

### **1.11 Comparación con método de cálculo de pendiente tradicional**

Por otro lado, se quiere comparar los resultados de pendientes que se obtendrían si se usa el método tradicional para el cálculo de la misma. Para posteriormente, también calcular la pérdida de suelo según la pendiente obtenida. Se le llama criterio tradicional al que procede a buscar en el predio de estudio el punto más alto en cota, el punto más bajo y la distancia entre ellos para sacar la pendiente que se consideran para el cálculo de pérdida de suelo. Con el programa *Erosión 6.0* se calcula la pérdida de suelo.

En la imagen N° 46 se muestra el punto de máxima elevación y el punto de mínima elevación del modelo original, que se va a utilizar para el cálculo de pendiente. Los valores son los siguientes:

- Elevación máxima = 72,607 metros.
- Elevación mínima = 6,303 metros.
- Distancia = 5000 metros.
- Pendiente = 1,326%.

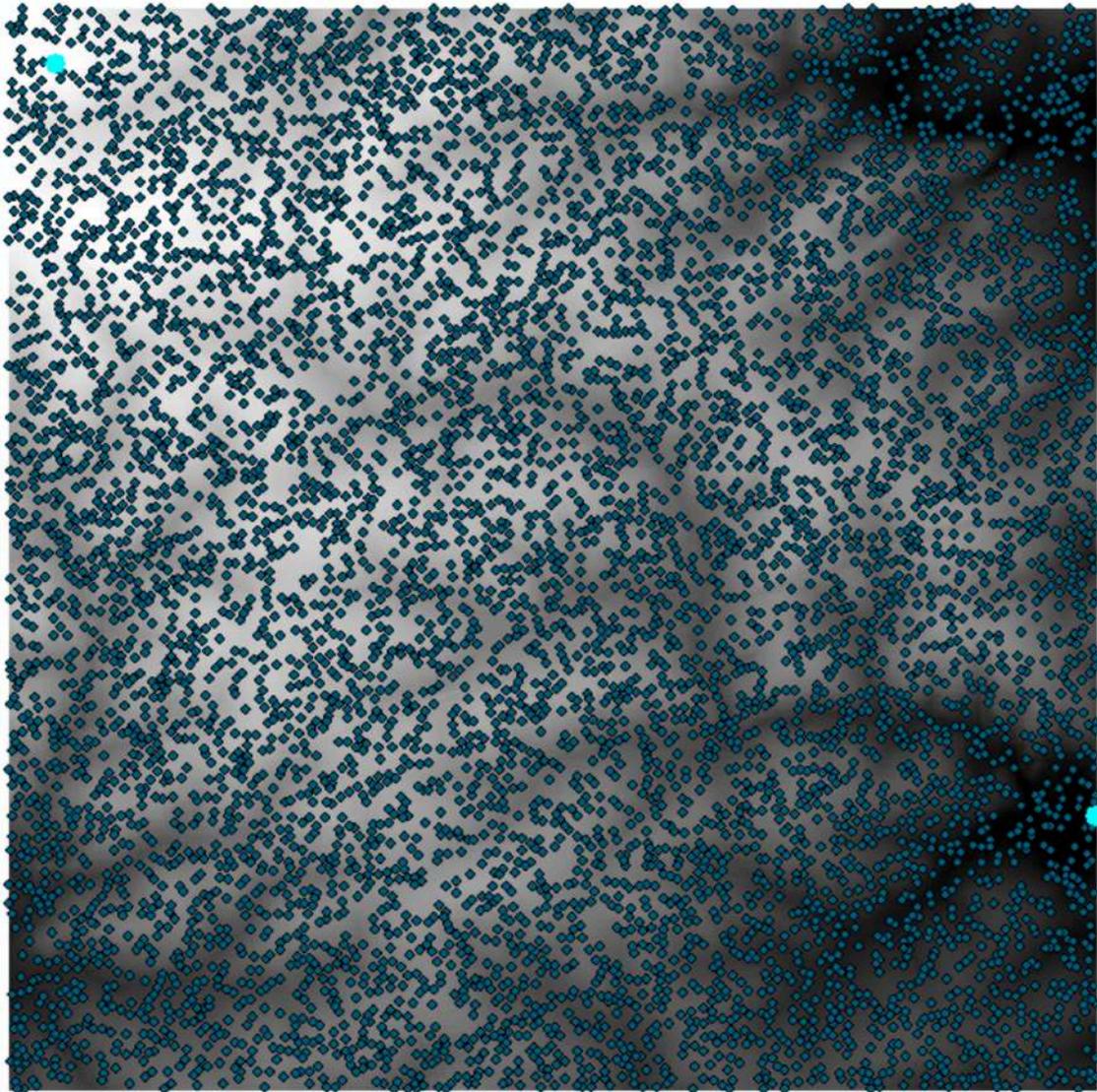


**Imagen 46:** Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo Original. **Fuente:** Creación Propia.

Utilizando la ecuación de RUSLE, se obtiene el valor de pérdida de suelo para el modelo original respecto al método tradicional. El valor de pérdida de suelo obtenido es **2,4 t/ha·año**.

Se repite el mismo procedimiento para el resto de los modelos en análisis. Los valores obtenidos en el modelo generado a partir de puntos espaciados a 25 metros son:

- Elevación máxima = 72,041 metros.
- Elevación mínima = 6,641 metros.
- Distancia = 5000 metros.
- Pendiente = 1,308%.

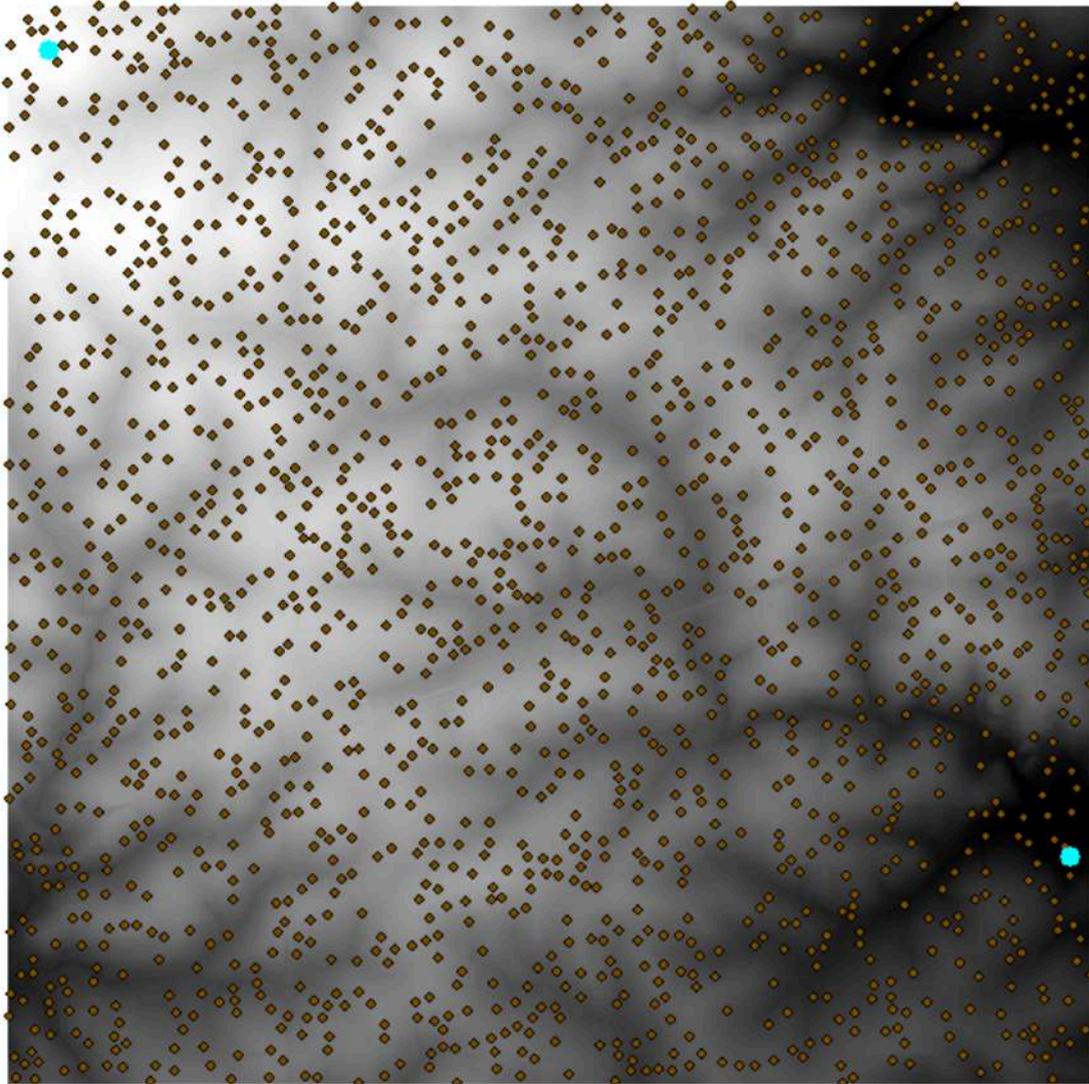


**Imagen 47:** Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 25 metros. **Fuente:** Creación Propia.

Utilizando la ecuación de RUSLE, el valor de pérdida de suelo obtenido para el modelo con puntos espaciados a 25 metros es **2,4 t/ha·año**.

Repitiendo el procedimiento, los valores obtenidos en el modelo generado a partir de puntos espaciados a 50 metros son:

- Elevación máxima = 72,547 metros.
- Elevación mínima = 7,179 metros.
- Distancia = 5000 metros.
- Pendiente = 1,307%.

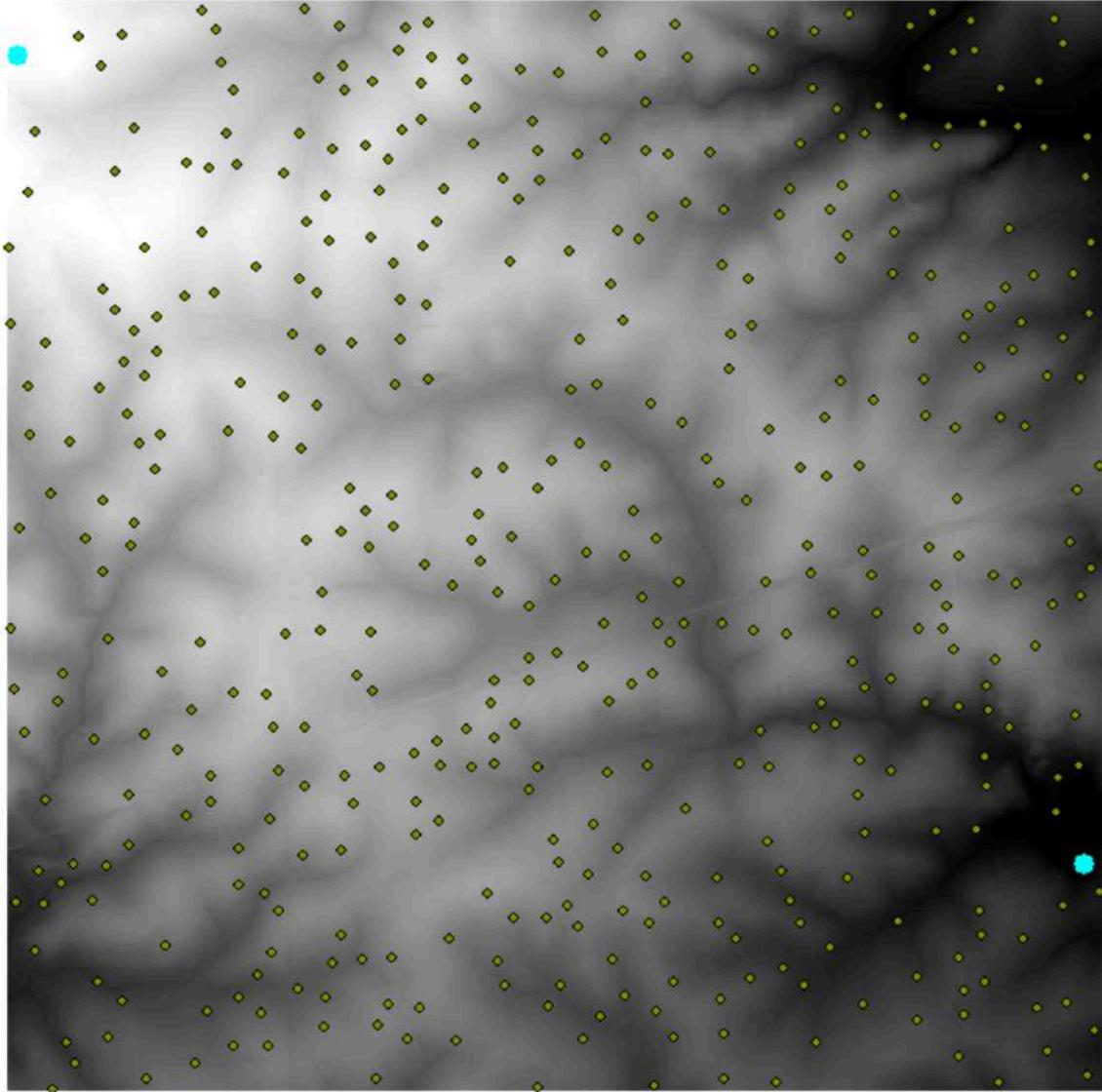


**Imagen 48:** Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 50 metros. **Fuente:** Creación Propia.

Utilizando la ecuación de RUSLE, el valor de pérdida de suelo obtenido para el modelo con puntos espaciados a 50 metros es **2,4 t/ha·año**.

Una vez más, se hace el procedimiento y los valores obtenidos en el modelo generado a partir de puntos espaciados a 100 metros son:

- Elevación máxima = 71,604 metros.
- Elevación mínima = 7,702 metros.
- Distancia = 5000 metros.
- Pendiente = 1,278%.

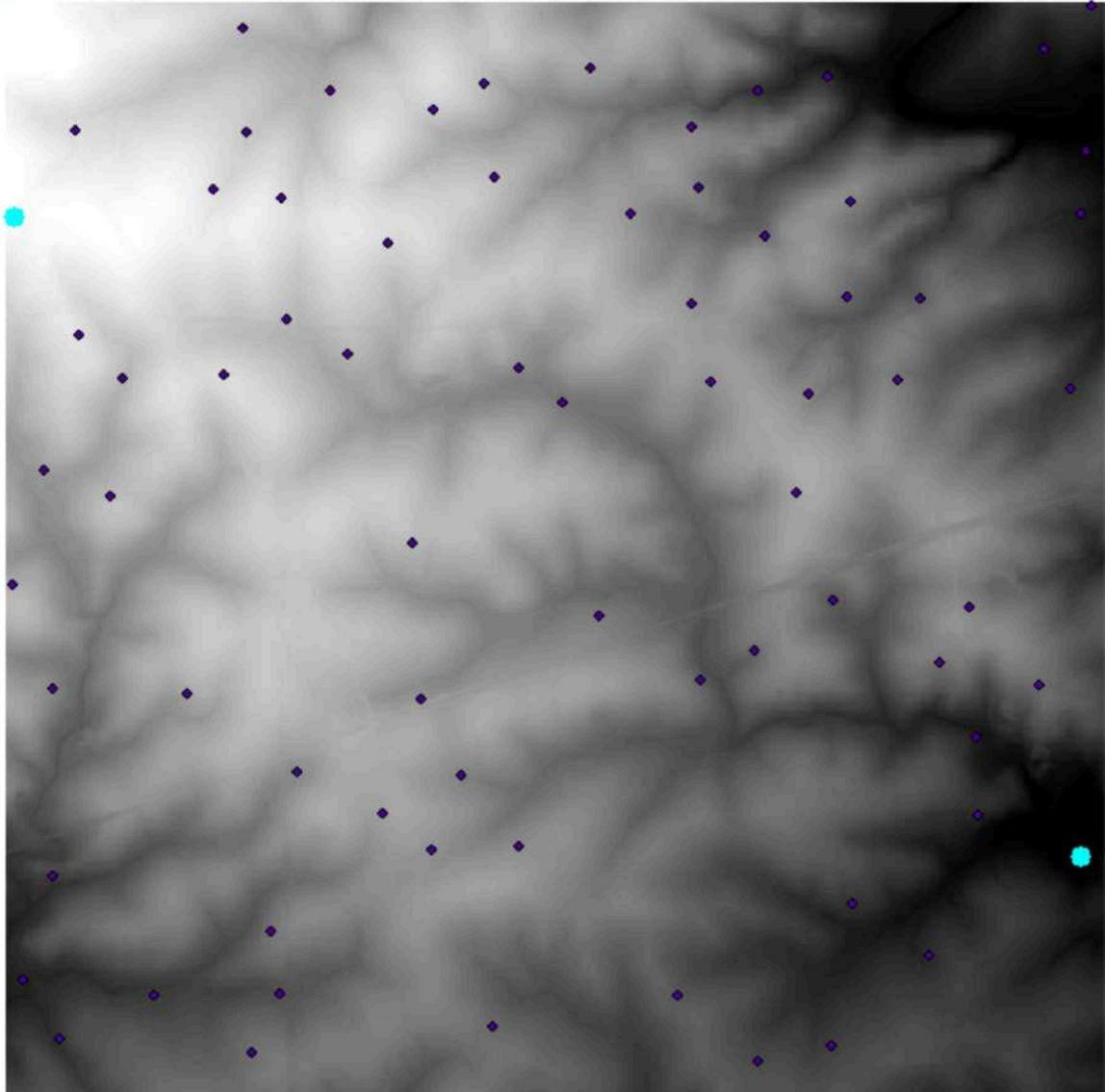


*Imagen 49: Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 100 metros. Fuente: Creación Propia.*

Utilizando la ecuación de RUSLE, el valor de pérdida de suelo obtenido para el modelo con puntos espaciados a 100 metros es **2,3 t/ha·año**.

Se aplica por última vez el procedimiento, y los valores obtenidos en el modelo generado a partir de puntos espaciados a 250 metros son:

- Elevación máxima = 69,581 metros.
- Elevación mínima = 7,357 metros.
- Distancia = 5000 metros.
- Pendiente = 1,244%.



*Imagen 50: Punto máx elevación vs punto min elevación - Modelo con puntos espaciados a 250 metros. Fuente: Creación Propia.*

Utilizando la ecuación de RUSLE, el valor de pérdida de suelo obtenido para el modelo con puntos espaciados a 250 metros es **2,2 t/ha·año**.

Al aplicar el método tradicional a cada uno de los modelos en estudio, se observa que los valores máximos y mínimos de elevación se mantienen dentro de rangos similares. Esto provoca que los valores de pendiente y la pérdida de suelo calculados a partir de estos datos también sean similares entre modelos. Sin embargo, con esta metodología, los resultados indican una pérdida de suelo poco significativa, ya que el valor calculado del factor A se encuentra por debajo del umbral tolerable de pérdida, establecido en 7 t/ha·año (4 veces por debajo). Cabe destacar que esta estimación difiere de la obtenida mediante los procedimientos aplicados anteriormente, desde el punto 1.1 de "Cálculo y Análisis" hasta el punto 1.11 de "Cálculo y Análisis".

Además, se genera una tabla donde se muestran los resultados obtenidos con el método tradicional comparado con el método a partir del cálculo de la RUSLE con los modelos de pendientes. En la tabla N°11 se presentan los resultados obtenidos.

	<b>1 -Factor A según MDP</b>	<b>2 - Factor A según método tradicional</b>	<b>Cantidad de veces que entra el resultado del método 2 en el 1</b>
Modelo original	20,599	2,4	8,6
MDP 25	17,257	2,4	7,2
MDP 50	11,120	2,4	4,6
MDP 100	4,447	2,3	1,9
MDP 250	4,467	2,2	2,0

**Tabla 11:** Comparación de resultados según método tradicional vs método desarrollado en el informe. Unidad: t/ha·año. **Fuente:** Creación Propia.

La comparación de la Tabla N°11 revela que el método tradicional de estimación de la pérdida de suelo, basado en los puntos de máxima y mínima elevación y aplicado con *Erosión 6.0*, produce valores de factor A entre 2,2 y 2,4 t/ha·año, cifras que quedan muy por debajo del umbral tolerable de erosión, que es 7 t/ha·año; y representan una subestimación de entre **2 y 8 veces** en relación con los resultados obtenidos mediante el enfoque desarrollado con RUSLE aplicada a los MDP.

Esto demuestra que el método tradicional simplifica la topografía del terreno, omitiendo variaciones clave de pendiente, que son captadas por el método MDP.

## **2. Vuelo drone**

Previo a la ejecución del vuelo con sensor LiDAR sobre una plataforma de drone, se propone la realización de una prueba de simulación de vuelo. El equipo a utilizar es un dron matrice 350 enterprise con sensor L2.

Se recurre al software DJI PILOT, con el fin de simular el vuelo que se va a realizar. Es fundamental configurar correctamente todos los parámetros dentro del software, de modo que la simulación se reproduzca con la mayor fidelidad posible a las condiciones reales de operación.

Además, se lleva a cabo una inspección visual del instrumento, donde se identifican posibles ausencias de componentes necesarios para el vuelo. Se inspecciona la controladora, su funcionamiento y características.

A continuación, se detallan los parámetros seleccionados para el vuelo.

### Parámetros de configuración de simulación de vuelo - Parámetros de vuelo final:

- **Área total estimada:** 26,5 hectáreas, incluyendo edificios, áreas verdes, corrales y zonas de estacionamiento.
- **Altura de vuelo:** 120 metros.
- **Velocidad del dron:** aproximadamente 10 m/s.
- **Ancho de barrido:** 180 metros (FOV de 70° a 120 m de altura).
- **Solape lateral:** 30%.
- **Densidad de puntos estimada:** ~200 pts/m<sup>2</sup>, este depende del solape lateral, altura de vuelo, velocidad de vuelo y frecuencia de muestreo.
- **Sensor:** DJI Zenmuse L2.
- **Dron:** DJI Matrice 350 RTK
- **Duración de batería:** 25 - 30 minutos.

Se estima que para estas características el vuelo tiene una duración de aproximadamente **10 minutos**. Por lo tanto, con una sola batería es posible realizar el vuelo. Sin embargo, el vuelo real tuvo una duración de **aproximadamente 6 minutos y 50 segundos**, es decir, menos de lo estimado previamente para estas mismas condiciones de operación.

El vuelo se desarrolla con normalidad, sin registrar inconvenientes en el sistema de navegación, estabilidad del dron o calidad de adquisición de datos. Además, se confirma que con una sola batería fue posible cubrir eficientemente superficies de esta magnitud bajo las condiciones planificadas.

Se destaca también que la ejecución del vuelo permitió verificar, en campo, que los parámetros previamente definidos en el simulador se corresponden con los resultados reales, lo cual brinda confianza para futuros operativos con características similares.

### **3. Procesamiento de vuelo LiDAR - Facultad de Veterinaria**

Una vez finalizado el vuelo con el dron Matrice 350 RTK y el sensor LiDAR Zenmuse L2, se procede a la descarga de los datos adquiridos directamente desde el equipo. Los archivos generados por el sistema vienen en un formato propio de DJI, que no es directamente compatible con plataformas de procesamiento geoespacial disponibles.

Para solucionar esto y garantizar la interoperabilidad con software de terceros, se utiliza el programa DJI Terra, el cual permite convertir los datos crudos provenientes del sensor LiDAR al formato .las, un estándar ampliamente usado para nubes de puntos LiDAR. Este proceso de conversión también permite realizar un control inicial de calidad sobre la nube de puntos generada, verificando aspectos como la densidad, distribución y cobertura de los datos capturados durante el vuelo.

En este caso particular, el archivo en formato .las fue posteriormente importado al software Trimble Business Center (TBC), que es la plataforma seleccionada para llevar a

cabo el procesamiento detallado de los datos. A través de TBC, se realizan tareas de clasificación y generación de modelos digitales de superficie. En las siguientes imágenes se muestra la nube de puntos con los resultados obtenidos.



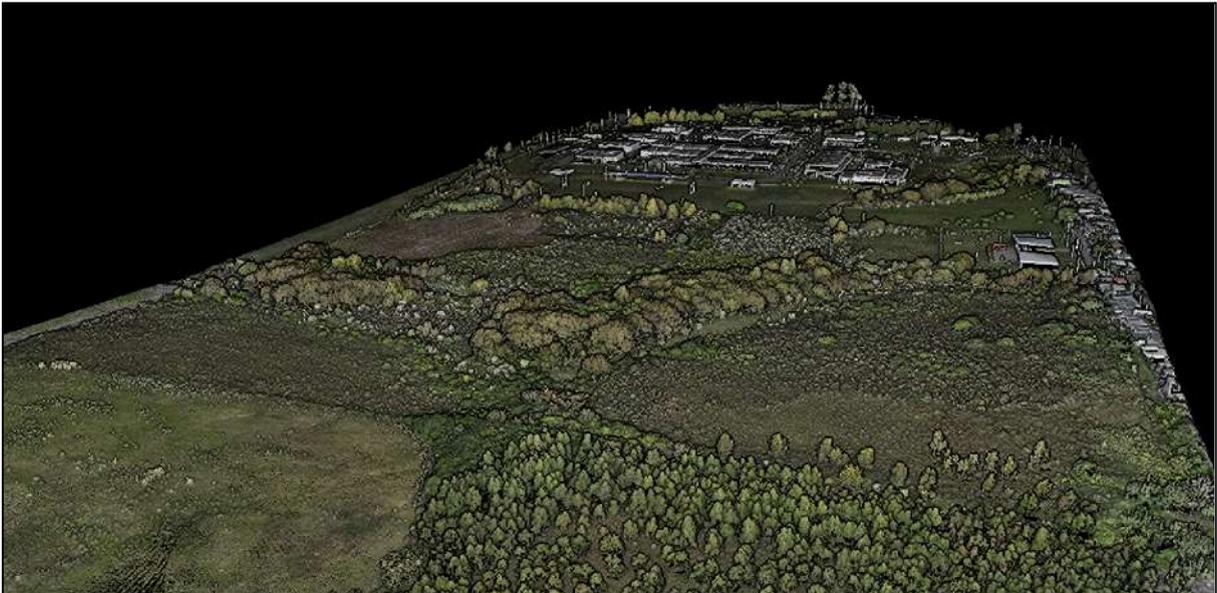
**Imagen 51:** Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron. **Fuente:** Creación Propia.



**Imagen 52:** Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron. **Fuente:** Creación Propia.

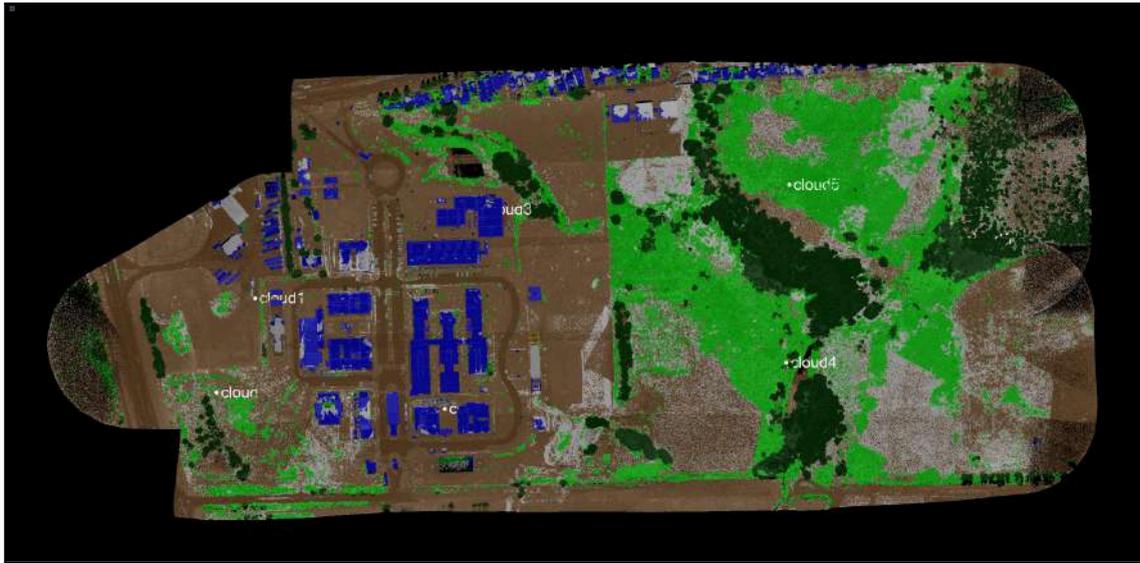


**Imagen 53:** Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron. **Fuente:** Creación Propia.



**Imagen 54:** Nube de puntos-Resultado de vuelo de dron. **Fuente:** Creación Propia.

A diferencia del análisis anterior realizado en el punto 1 de “Cálculo y Análisis”, donde desde una primera instancia se cuenta con puntos de elevación del terreno. Para este caso, es necesario realizar una clasificación de la nube de puntos, lo que permite discriminar entre distintos tipos de superficie (por ejemplo, terreno, vegetación, edificaciones, entre otros), para al final contar con los puntos de terreno. Esta clasificación resulta fundamental para generar modelos más precisos y adaptados al objetivo del estudio. A continuación, se presenta la imagen N°55, donde se muestra la clasificación de la nube de puntos generada automáticamente en el software TBC.



**Imagen 55:** Clasificación de nube de puntos. **Fuente:** Creación Propia.

Cada clase se representa con un color específico para facilitar su interpretación visual. En la tabla N° 12 se detallan los identificadores correspondientes a cada clase, junto con el color asignado que permite diferenciarlas gráficamente dentro del entorno de trabajo.

Clasificación de nube de puntos				Total de puntos: 56.585.026
Tipo	Nombre	Color	Cantidad de puntos	Porcentaje %
1	No clasificado	Blanco 	5613820	9,92
2	Terreno	Marrón 	27364940	48,36
4	Vegetación Media	Verde Claro 	10605556	18,74
5	Vegetación Alta	Verde Oscuro 	10249804	18,11
6	Edificios	Azul 	2574199	4,55
7	Ruido	Gris Claro 	79155	0,14
14	Líneas Eléctricas	Amarillo 	3331	0,01
65	Postes	Rojo 	11726	0,02
66	Carteles	Cian 	1056	0,00
79	Divisores	Azul (100, 149, 23) 	81439	0,14

**Tabla 12:** Identificadores de clasificación de nube de puntos. **Fuente:** Creación Propia.

Una vez realizada la clasificación de la nube de puntos, se procede a desactivar o excluir las clases que no corresponden al terreno, tales como vegetación, edificaciones u otras estructuras. Este paso es fundamental, ya que el objetivo principal es obtener un modelo digital de elevación (MDE) limpio, que represente únicamente la superficie del suelo.

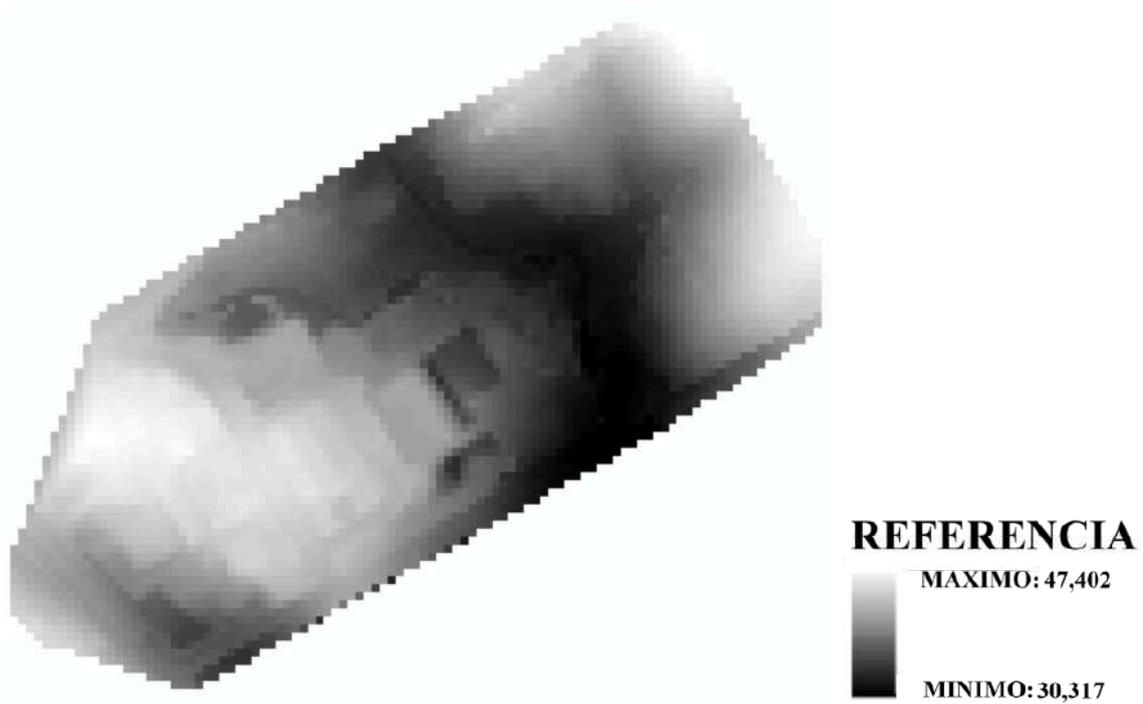


**Imagen 56:** Nube de puntos clasificada. - Nube de puntos de terreno. **Fuente:** Creación Propia.

Durante el análisis de los datos obtenidos mediante el vuelo del dron con sensor LiDAR, se identifica un déficit de cobertura en determinadas áreas, identificados en la imagen N°56 con huecos en la nube de puntos. Estas zonas sin información corresponden principalmente a sectores con vegetación muy densa y alta, donde el pulso láser no logra penetrar hasta el nivel del terreno, impidiendo así la recolección de datos topográficos. Asimismo, se observaron vacíos en zonas con cuerpos de agua, como lagunas, donde el sistema LiDAR tampoco pudo registrar puntos del suelo debido a la absorción del láser por el agua. Estas limitaciones afectan la continuidad del modelo digital de elevación (MDE) y deben considerarse en el análisis.

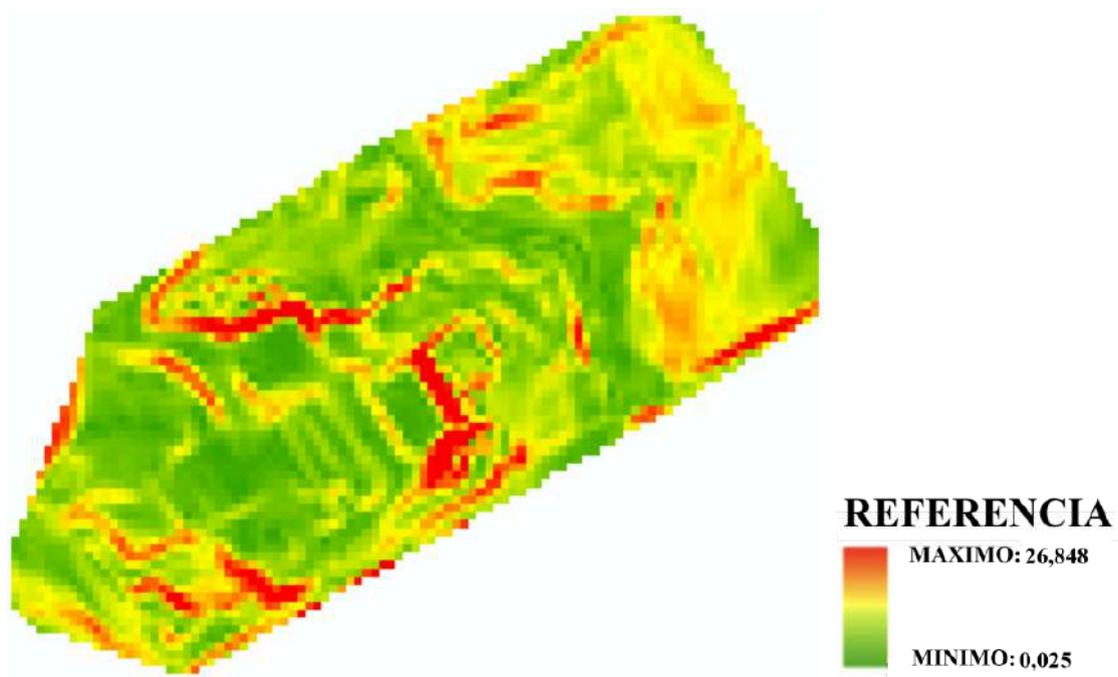
Con el objetivo de analizar cómo la resolución del modelo influye en los resultados obtenidos, se replica el procedimiento previamente descrito en el apartado “1. Cálculo y Análisis”. En esta ocasión, se emplean datos provenientes de un relevamiento LiDAR realizado con un dron equipado con el sensor DJI Zenmuse L2.

En ArcGIS, se trabaja con datos en formato .las. A partir de estos datos, se crea un MDE. Una vez generado, se procede a calcular el modelo de pendiente del terreno utilizando herramientas específicas de análisis espacial. Este cálculo permite cuantificar la inclinación del relieve en cada celda del raster. En la imagen N°57 se muestra el modelo digital de elevación generado a partir de la nube de puntos provenientes del vuelo LiDAR. Se menciona que el tamaño del píxel con el que se trabaja es 10x10 metros para replicar lo realizado antes.



*Imagen 57: Modelo digital de elevación generado a partir de los puntos LAS del vuelo LiDAR.  
 Fuente: Creación Propia.*

Como se menciona anteriormente, a partir del MDE se genera el MDP. En la imagen N°58 se visualizan los resultados obtenidos.



*Imagen 58: Modelo de pendientes generado a partir de los puntos LAS del vuelo LiDAR.  
 Fuente: Creación Propia.*

Una vez generado el modelo de pendiente (MDP), este se exporta al formato .asc (ASCII raster). Este archivo es utilizado para estimar la pérdida de suelo en el área de estudio correspondiente a la zona de la Facultad de Veterinaria, y con los parámetros estimados para esta zona. En forma de recordatorio, se cita nuevamente las tablas de parámetros a colocar en la RUSLE.

Factor	Valor
R	427,4
K	0,2625
S	Depende del MDP generado. Ver punto 3. de "Cálculo y Análisis"
L	1000
P	1
C	0,049

**Tabla 13:** Parámetros para formula RUSLE para predio de la Facultad de Veterinaria. **Fuente:** Creación Propia.

Para ello, se integra en Octave, donde se ejecuta en el script previamente desarrollado para calcular el valor promedio del factor A (pérdida de suelo) a partir del modelo de pendiente.

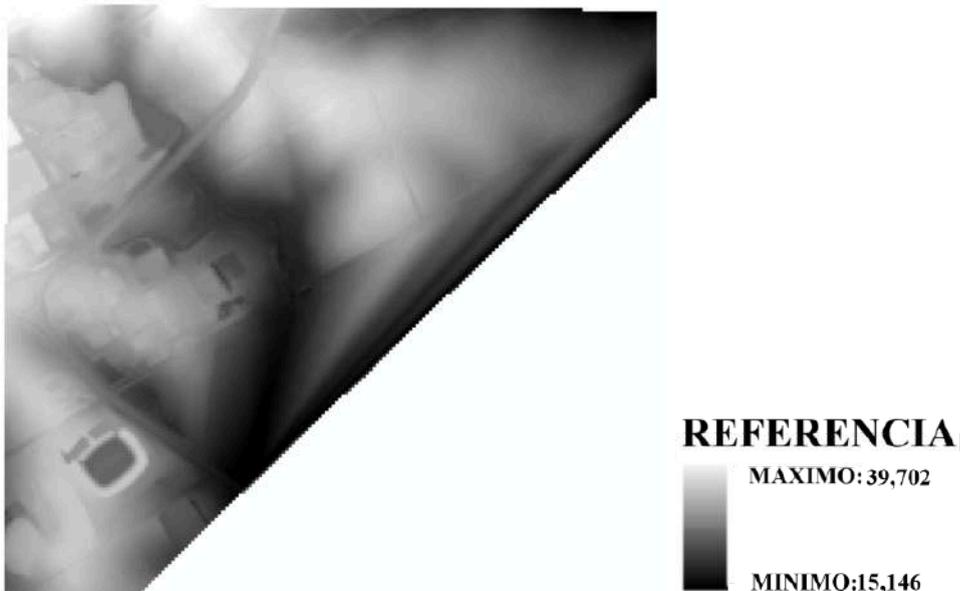
El resultado que se obtiene de pérdida de suelo para el predio de la facultad de Veterinaria es de **15,297 toneladas por hectárea por año (t/ha·año)**, para el vuelo realizado con dron y sensor LiDAR.

## **4. Procesamiento de datos de la IDE UY - Facultad de Veterinaria**

### **4.1 Grilla Urbana**

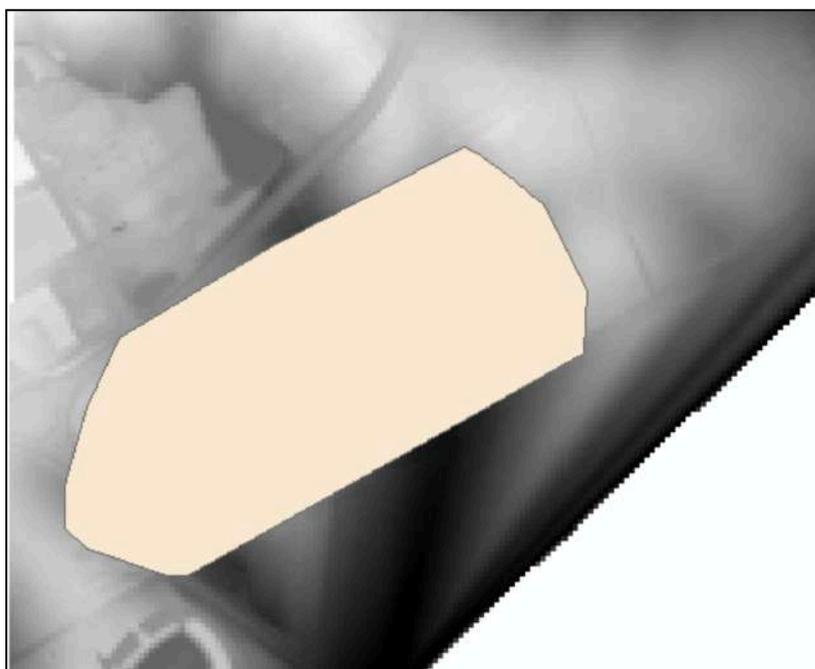
Tal como se menciona anteriormente, se repite el procedimiento descrito en el punto “1. Cálculo y Análisis”. En esta instancia, se procesa la nube de puntos obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE UY), en formato .las, correspondientes a la zona de la Facultad de Veterinaria. A partir de esta información, se generan los productos necesarios para el análisis, siguiendo la misma metodología aplicada en la sección previa.

Desde el visualizador de la IDE UY, se descargan las grillas urbanas J29A5N1, J29A5N2 y J29A5N4, correspondientes al área que abarca la zona de vuelo sobre la Facultad de Veterinaria. Una vez obtenidos los archivos en formato .las, se procesan en ArcGIS, donde se genera un raster para construir el MDE. A partir de este modelo, se calcula la pendiente del terreno, es decir el MDP, siguiendo la misma metodología aplicada en los análisis anteriores. En la imagen N°59 se presenta el MDE correspondientes a los puntos de las grillas mencionadas. El tamaño de pixel con el que se trabaja es de 10x10 metros.



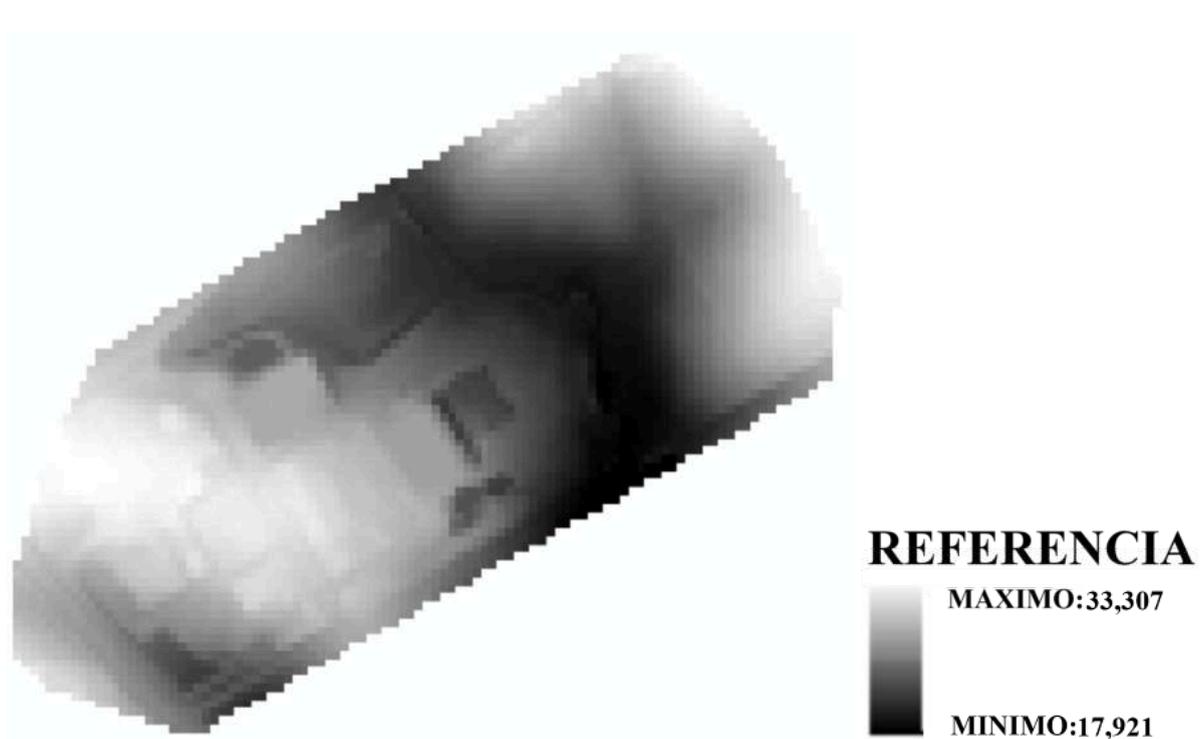
**Imagen 59:** Modelo digital de elevación generado a partir de los puntos LAS descargados de la IDE UY- Facultad de Veterinaria-Grilla Urbana. **Fuente:** Creación Propia.

Para delimitar el área de estudio, en este caso se traza un polígono que representa el perímetro del predio de la Facultad de Veterinaria, el cual fue utilizado para recortar el raster y enfocar el análisis exclusivamente en dicha zona. Esta posee una densidad de puntos de 584.534. (Ver imagen N° 60).



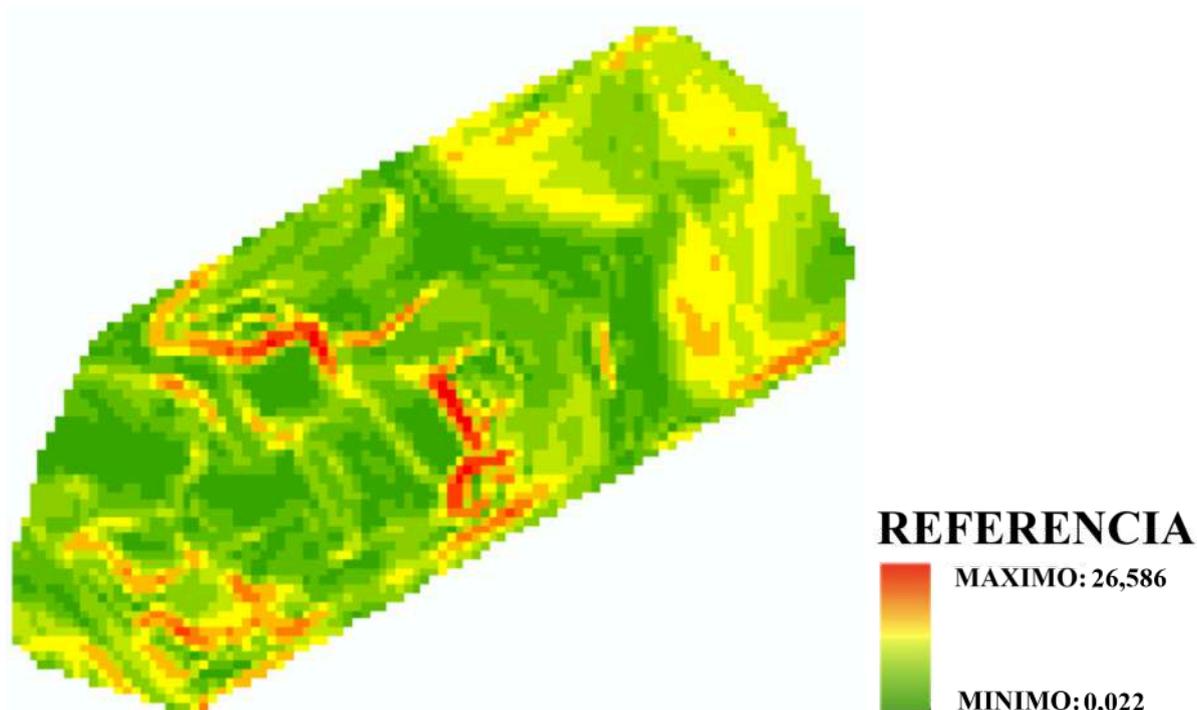
**Imagen 60:** Polígono delimitador de la Facultad de Veterinaria - Zona de Estudio. **Fuente:** Creación Propia.

Al trazar el polígono representado en la imagen N°60, se utiliza como máscara en la herramienta *Extract by Mask*. De este modo, se obtuvo un raster que conserva únicamente la información correspondiente al área delimitada. En la imagen N°61 se muestra el MDE resultante con el polígono aplicado, representando exclusivamente la zona de interés.



**Imagen 61:** Modelo digital de elevación de la zona de estudio con datos LAS de la IDE UY-Grilla Urbana. **Fuente:** Creación Propia.

Sobre el MDE resultante, se calcula el modelo de pendientes (MDP) expresado en porcentaje. En la imagen N°62 se presentan los resultados obtenidos, es decir, el modelo de pendientes correspondiente al predio de la Facultad de Veterinaria.



**Imagen 62:** Modelo de pendientes de la facultad de veterinaria con los datos LAS de la IDE UY-Grilla Urbana. **Fuente:** Creación Propia.

Una vez generado el MDP, se procede a exportarlo en formato .asc. Este archivo se utiliza para estimar la pérdida de suelo en el área de estudio correspondiente al predio de la Facultad de Veterinaria, pero esta vez con los datos LAS descargados de la IDE UY. Para ello, se integra en Octave, y se ejecuta el script previamente elaborado, diseñado para calcular el valor promedio del factor A (pérdida de suelo) a partir de los valores de pendiente contenidos en el modelo.

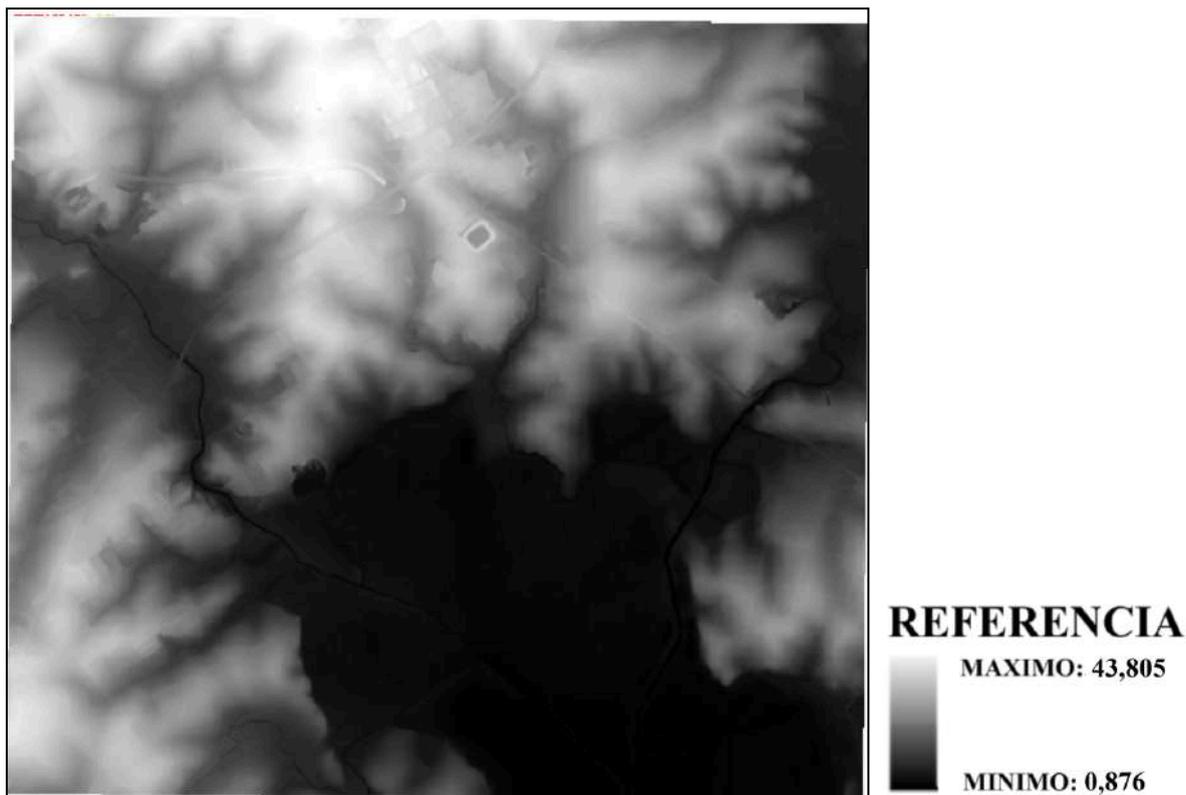
Como resultado del procesamiento, se obtuvo un valor estimado de **14,342 toneladas por hectárea por año (t/ha·año)** de pérdida de suelo para el área delimitada.

#### **4.2 Grilla Nacional**

Repitiendo el procedimiento descrito en el punto 1. de Cálculo y Análisis y en el punto 4.1 de Cálculo y Análisis, se procesan los datos obtenidos a través de la IDE UY, en formato .las, correspondientes a la zona de la Facultad de Veterinaria.

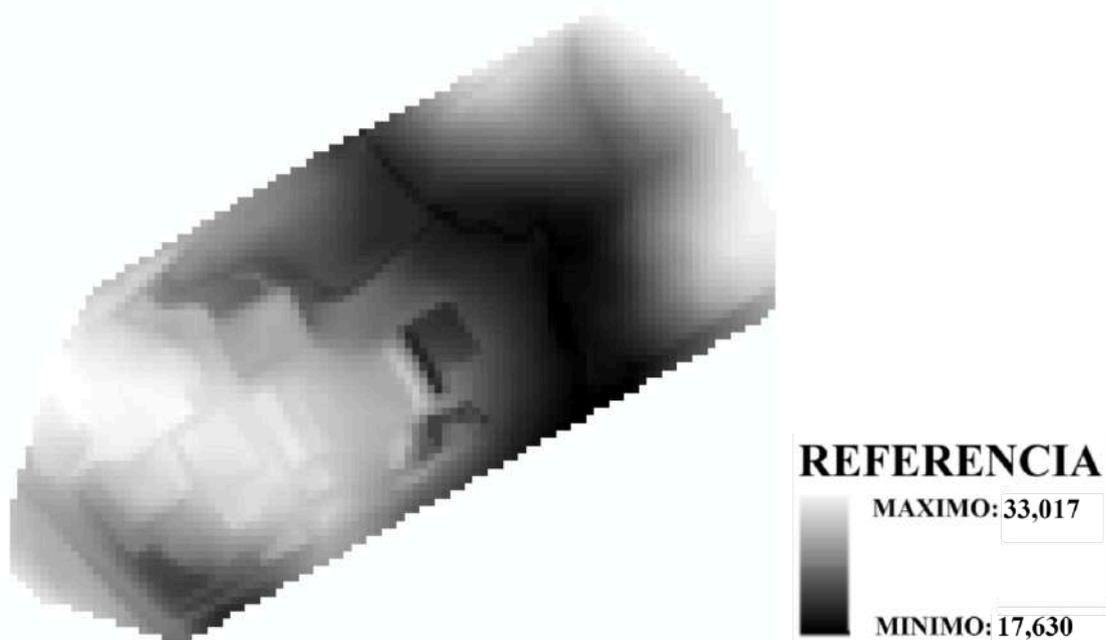
La grilla nacional que se descarga es la identificada como J29A5. Esta se procesa en ArcGIS, donde se genera un raster para construir el MDE. A partir de este modelo, se calcula la pendiente del terreno, es decir el MDP, siguiendo la misma metodología aplicada en los análisis anteriores.

En la imagen N°59 se presenta el MDE correspondientes a los puntos de la grilla citada. El tamaño de pixel con el que se trabaja es de 10x10 metros. (Ver imagen N° 63).



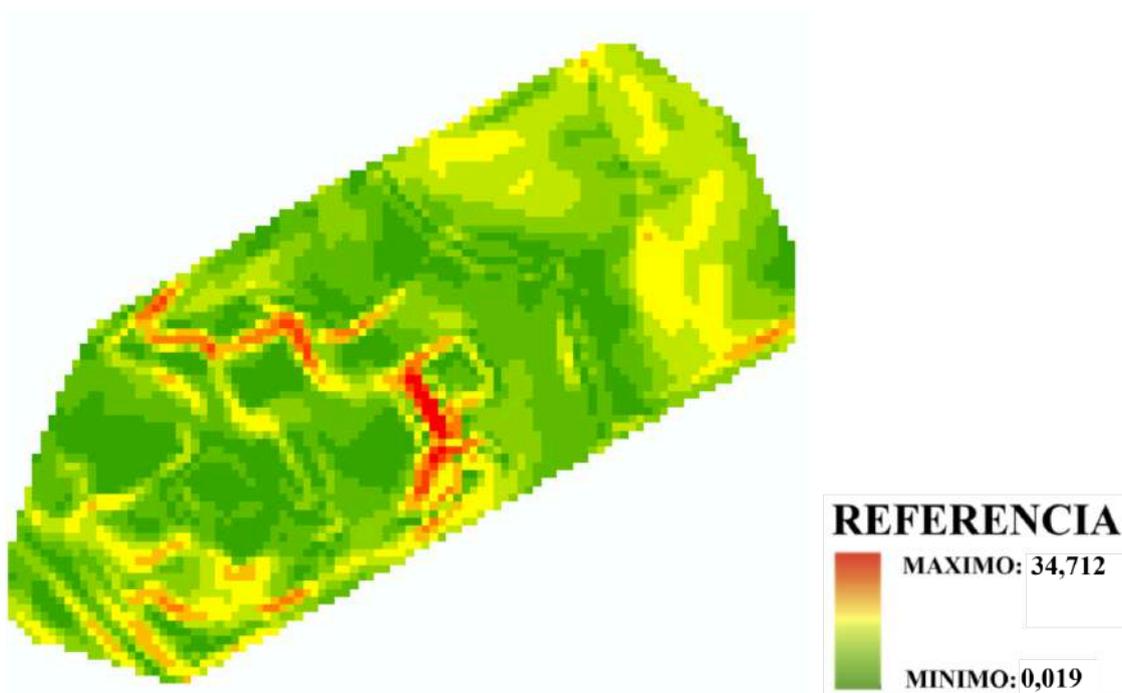
**Imagen 63:** Modelo digital de elevación generado a partir de los puntos LAS descargados de la IDE UY- Facultad de Veterinaria-Grilla Nacional. **Fuente:** Creación Propia.

Se traza un polígono que representa el perímetro del predio de la Facultad de Veterinaria, el cual fue utilizado para recortar el raster y enfocar el análisis exclusivamente en la zona de estudio. La densidad de puntos de la zona de estudio es de 75.367 puntos. (Ver imagen N°64).



**Imagen 64:** Modelo digital de elevación de la zona de estudio con datos LAS de la IDE UY-Grilla Nacional. **Fuente:** Creación Propia.

Sobre el MDE resultante, se aplica la herramienta *Slope*, con la cual se calcula el MDP expresado en porcentaje. En la imagen N°64 se presentan los resultados obtenidos, es decir, el modelo de pendientes correspondiente al predio de la Facultad de Veterinaria, generado con los datos de la grilla nacional.



**Imagen 65:** Modelo de pendientes de la facultad de veterinaria con los datos LAS de la IDE UY-Grilla Nacional. **Fuente:** Creación Propia.

Una vez generado el MDP, se ejecuta el script previamente elaborado, diseñado para calcular el valor promedio del factor A (pérdida de suelo), a partir de los valores de pendiente contenidos en el modelo.

Como resultado del procesamiento, se obtuvo un valor estimado de **14,811 toneladas por hectárea por año (t/ha·año)** de pérdida de suelo para el área delimitada, correspondiente a los datos descargados de la IDE UY de la grilla nacional.

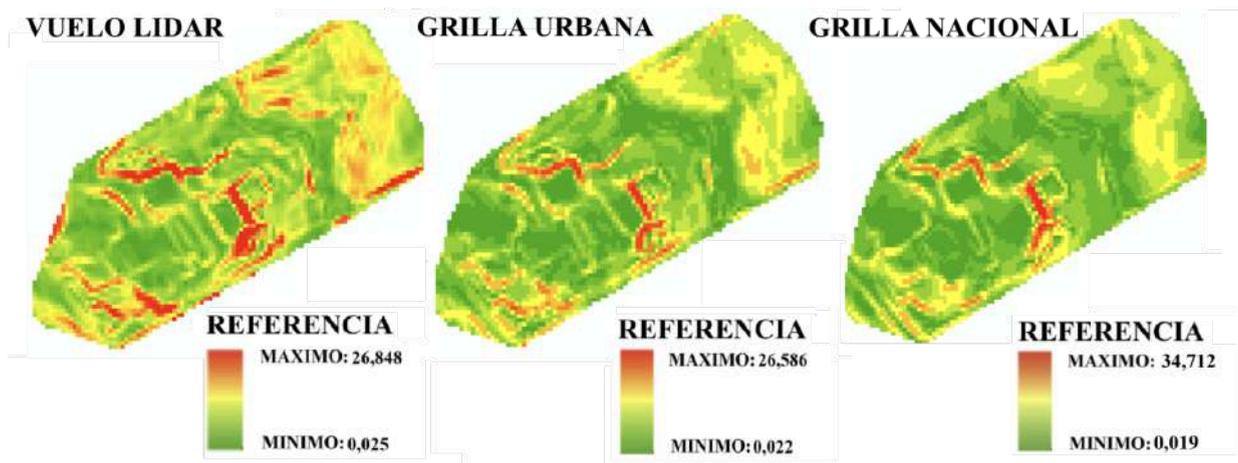
	Vuelo LiDAR	IDE UY Urbano	IDE UY Nacional
<b>Factor A</b>	<b>15,297</b>	<b>14,342</b>	<b>14,811</b>
<b>Densidad de puntos</b>	<b>56.585.026</b>	<b>584.534</b>	<b>75.367</b>

**Tabla 14:** Pérdida de suelo calculada a partir del Vuelo LiDAR y de la nube de puntos de la IDE UY (urbano y rural). **Fuente:** Creación Propia.

En la Tabla N°14 se pueden comparar los resultados obtenidos de pérdida de suelo para el caso del vuelo con sensor LiDAR y para los MDE extraídos de la IDE UY. Los valores se pueden considerar cercanos. Sin embargo, cabe destacar que el cálculo basado en el vuelo

LiDAR arroja un valor más alto, el cual debería indicar la representación del terreno con mayor detalle, teniendo en cuenta las variaciones topográficas que inciden en la pérdida de suelo.

La comparación revela que el vuelo LiDAR, con una densidad de puntos alta (56 millones), estimó un factor A mayor (15,297 t/ha·año) que la IDE UY Urbana (14,342) y la IDE UY Nacional (14,811), las cuales emplean densidades mucho menores.



**Imagen 66:** Comparación de los MDP. **Fuente:** Creación Propia.

En la imagen N° 66 se comparan los MDP generados a partir de tres fuentes distintas: el vuelo LiDAR, la grilla urbana y la grilla nacional de la IDE UY.

Se observa una disminución en el nivel de detalle a medida que se pasa del modelo LiDAR a los modelos provenientes de la IDE UY. En particular, el MDP derivado del vuelo LiDAR muestra una mayor presencia de zonas en color rojo, que representan áreas con pendientes más pronunciadas. Estas áreas tienden a reducirse visualmente en las representaciones generadas a partir de las grillas urbana y nacional, lo que evidencia una menor capacidad de estos modelos para capturar variaciones del relieve.

# Conclusiones

## **1. Conclusión - Fórmula RUSLE**

La aplicación de la fórmula RUSLE para estimar la erosión del suelo demuestra la relevancia de una correcta selección de sus factores. En este estudio, se observa que el factor R es fundamental para reflejar la erosividad de la lluvia, aunque se utiliza un mapa que detalla los periodos de lluvias con estimación en un único punto por departamento. El factor K, que depende de la susceptibilidad erosiva del suelo, subraya la importancia de caracterizar adecuadamente el tipo de suelo, ya que errores en esta etapa pueden distorsionar considerablemente los resultados. El factor LS también muestra su influencia directa en la estimación de la pérdida de suelo, siendo clave la metodología que se aplica en la medición de la pendiente y su longitud. El factor P permite considerar el impacto de las prácticas de conservación del suelo.

Sin embargo, el factor C, que se refiere al uso y manejo del suelo, se presenta como el más desafiante debido a la necesidad de conocimientos agronómicos detallados. En nuestro caso, debido a la falta de experiencia en esta área, se recurre a la asesoría de ingenieros agrónomos para definir adecuadamente la rotación de cultivos y el manejo del terreno, lo que demuestra la importancia de contar con un enfoque interdisciplinario para este factor.

En general, el correcto manejo y actualización de los factores de RUSLE es crucial para obtener estimaciones de erosión confiables, y subraya la necesidad de seguir analizando y adaptando esta fórmula para su aplicación en contextos actuales.

## **2. Conclusión - Tamaño de pixel**

El análisis realizado muestra que la variación del tamaño de píxel, obtenida mediante procesos de remuestreo, no produce un impacto en la estimación del factor A cuando se conserva el modelo base, ya que no se incorpora nueva información al sistema, sino que solo se modifica la escala de representación espacial.

No obstante, la forma en que se genera el MDP sí tiene una influencia directa en los resultados. En particular, los modelos construidos a partir de muestreos aleatorios con grandes distancias entre puntos tienden a simplificar el relieve, reduciendo la variabilidad de las pendientes y, en consecuencia, subestimando la pérdida de suelo. Esto confirma que la precisión del modelo topográfico es un factor determinante en la aplicación de la ecuación RUSLE.

Asimismo, se constata que el remuestreo del modelo digital de elevación, modificando la resolución del píxel de 10×10 metros a 100×100 metros, produjo variaciones mínimas en la estimación del factor A, resultados que pueden considerarse insignificantes para el análisis visibles en la tabla N°4; lo que indica que el tamaño de píxel (dentro de ese rango), no influye de manera relevante en los resultados. Se invita a seguir analizando los resultados con variaciones de tamaño de pixel mayores a 100 metros.

Por lo tanto, para obtener estimaciones en estudios de erosión hídrica, es fundamental emplear modelos digitales con una densidad de datos adecuada, que reflejen las características del terreno y eviten distorsiones en los resultados.

### **3. Conclusión - Densidad de puntos**

El análisis desarrollado confirma que la densidad de puntos utilizada en un relevamiento topográfico tiene una incidencia directa en la calidad del modelo generado y, por ende, en los resultados derivados, como la estimación de la pérdida de suelo mediante la ecuación RUSLE. A medida que se incrementa la distancia entre puntos, disminuye la capacidad del modelo para representar su topografía, lo cual reduce la variabilidad de la pendiente y simplifica la morfología del terreno, como se puede ver en la tabla N°5 y en la tabla N°6. Esta pérdida de detalle se traduce en una subestimación sistemática del factor A.

La comparación entre modelos generados con diferentes densidades de puntos evidencia que, al aumentar la distancia de muestreo a 25 metros, se pierde más del 50 % de la información original, lo que implica una disminución del 16 % en la estimación de la pérdida de suelo. Esta brecha se amplía cuando la separación entre puntos alcanza los 50 metros o más, llegando incluso a subestimar en un 50 % la pérdida de suelo.

Como se ha mencionado anteriormente, en este estudio se generaron los modelos de pendiente a partir de modelos digitales de elevación, utilizando puntos seleccionados aleatoriamente a distancias de 25, 50, 100 y 250 metros. Sin embargo, se sugiere que en futuros análisis, exploren otras formas de selección de puntos, como la triangulación a las mismas distancias o el uso de otros métodos.

### **4. Conclusión - Importancia de la densidad de muestreo en la precisión de modelos de pérdida de suelo**

El análisis estadístico de los modelos de pendiente mediante la desviación estándar, la mediana y los cuartiles permite evaluar la variabilidad del relieve y su impacto en la estimación de la pérdida de suelo. Se observa que, en todos los modelos, los valores de promedio y mediana son similares, lo que indica una distribución simétrica y un relieve homogéneo según criterios citados en punto 1.10-Cálculo y Análisis.

A medida que se reduce la densidad de muestreo (mayor distancia entre puntos), aumenta la desviación estándar, reflejando una pérdida en la representación del terreno. Esta pérdida de detalle también se evidencia en el rango intercuartílico, que disminuye en modelos con menor densidad de puntos, indicando una subestimación de zonas con pendientes altas, visible en las tablas N°7, N°8, N°9, N°10.

Al analizar el Factor A, se concluye que los modelos con mayor densidad (original y 25 m) superan el umbral aceptable de erosión (7 t/ha·año), mientras que modelos con menor densidad de puntos tienden a subestimarla.

## **5. Conclusión - Comparación de resultado del método tradicional vs datos LAS provenientes de la IDE UY**

El análisis comparativo entre el método tradicional de cálculo de pendiente y pérdida de suelo y el enfoque basado en el uso de modelos de pendiente y la ecuación RUSLE revela una subestimación de la pérdida de suelo con el método tradicional. A pesar de que el procedimiento basado en el cálculo de la pendiente entre puntos de máxima y mínima elevación ofrece resultados de pérdida de suelo cercanos a 2,2–2,4 t/ha·año, estos valores se mantienen debajo del umbral tolerable de erosión (7 t/ha·año), indicando una subestimación significativa.

El uso de MDP con diferentes densidades de puntos (25, 50, 100 y 250 metros) arroja valores de pérdida de suelo más altos, reflejando en la tabla N°11, la diferencia con los resultados del método tradicional.

Por lo tanto, el método tradicional no ofrecería una estimación técnica confiable de la pérdida de suelo y podría conducir a conclusiones erróneas en la planificación de medidas de conservación de suelos. En cambio, el método RUSLE aplicado con MDP proporciona estimaciones más realistas y consistentes con los criterios de tolerancia establecidos, siendo más adecuado para la evaluación de riesgos y la definición de estrategias de manejo y conservación del suelo.

Se recomienda que en futuros proyectos, se explore el uso del método de línea de máxima pendiente, que traza el camino real del flujo superficial, capturando con detalles la topografía y pendiente, como alternativa al método tradicional basado en un perfil longitudinal tomando el punto más alto y el más bajo del predio en estudio para el cálculo de pendiente y así, aplicar la RUSLE.

## **6. Conclusión - Vuelo de dron y posterior procesamiento**

En cuanto al vuelo de dron, se destaca la herramienta de *DJI PILOT* como software para simulaciones de vuelo, ya que permite estimar la duración del vuelo dron y con ello la cantidad necesaria de baterías con las que se debe contar, aunque el vuelo real tuvo una duración de aproximadamente 6 minutos y 50 segundos, menor a lo estimado con el software (10 minutos).

Es importante mencionar que siempre se debe realizar la clasificación de la nube de puntos, lo que permite discriminar entre distintos tipos de superficie, por ejemplo, terreno, vegetación, edificaciones, entre otros.

En cuanto a la clasificación de la nube de puntos, se utiliza la clasificación automática provista por el software TBC, conservando únicamente la clase correspondiente al terreno. No obstante, podría ser útil realizar una verificación manual del resultado, especialmente en las zonas con vegetación densa y alta, donde suelen generarse vacíos. En estos casos, una revisión detallada podría permitir identificar si efectivamente existen puntos del terreno ocultos bajo la vegetación que no fueron correctamente clasificados. Además, se distingue un

déficit de cobertura en determinadas áreas, zonas con cuerpos de agua, como lagunas, donde el sistema LiDAR tampoco pudo registrar puntos del suelo debido a la absorción del láser por el agua, impidiendo la continuidad del MDE.

Lo recomendable sería realizar un control de calidad sobre la clasificación automática, con el fin de asegurarse de que los puntos válidos del terreno no sean excluidos o clasificados erróneamente, ya que esto podría significar una pérdida de puntos importantes para el análisis.

## **7. Conclusión - Comparación de resultado de vuelo de drone con sensor LiDAR vs datos LAS provenientes de la IDE UY**

Al comparar los resultados obtenidos a partir de las dos fuentes de datos, el vuelo con drone equipado con sensor LiDAR y los archivos LAS descargados desde la IDE UY, en la tabla N°14 se observa una diferencia en el valor estimado de pérdida de suelo en el predio de la Facultad de Veterinaria.

El vuelo con drone proporciona una nube de puntos con mayor densidad y precisión, lo que permite construir un modelo digital de elevación y un modelo de pendientes más detallado, captando pequeñas variaciones del relieve. Por otro lado, los datos provenientes de la IDE UY, aunque con menor resolución, ofrecen resultados bastante cercanos al comportamiento real del terreno.

Es relevante destacar que los puntos LAS descargados de la Infraestructura de Datos Espaciales provienen de un modelo digital de elevación generado mediante fotogrametría, y no directamente de un levantamiento LiDAR. Para mejorar la representación del terreno, la IDE UY llevó a cabo una serie de correcciones sobre el MDE utilizando técnicas como líneas de quiebre, puntos de control geodésicos, digitalización de cursos de agua y ejes de calles, entre otras. Estas correcciones fueron implementadas con el fin de obtener una interpretación más realista de la topografía del terreno. Además, es importante señalar que el error en este modelo no es uniforme; existen áreas con mayor dispersión en los valores, es decir, zonas con un mayor margen de error y otras con menor incertidumbre.

La comparación revela que el vuelo LiDAR, con una densidad de puntos alta, estima un factor A mayor (15,297 t/ha·año) que la IDE UY Urbana (14,342) y la IDE UY Nacional (14,811), las cuales emplean densidades mucho menores, ver tabla N°14. Esta pequeña variación (menos de 1 t/ha·año entre ellos), sugiere que a partir de cierto umbral, agregar más densidad de datos no mejora significativamente el resultado. En otras palabras, el alto costo de capturar y procesar millones de puntos vía LiDAR no siempre se traduce en una estimación sustancialmente más precisa de la pérdida de suelo, lo que indica que densidades intermedias pueden ser suficientes para estudios similares.

En este sentido, se puede concluir que, si bien los levantamientos LiDAR con drone aportan una gran densidad de puntos, el uso de datos LAS disponibles en la IDE UY permite obtener resultados aceptables para trabajos de este estilo. La diferencia en los resultados no

justifica, en todos los casos, la necesidad de realizar un vuelo de gran porte, ya que con los archivos descargados de la IDE UY se pueden obtener estimaciones técnicamente aceptables para la mayoría de las aplicaciones similares a esta.

## Webgrafia

- 1) AirClip. (s. f.). *Lidar for surveying drones: Functionality, advantages and disadvantages*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://www.airclip.de/LIDAR-for-surveying-drones-Functionality-advantages-and-disadvantages>
- 2) Dronerds Latam. (s. f.). *Cargas útiles DJI L1 y L2*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://dronerdslatam.com/cargas-utiles-dji-l1-l2/>
- 3) HP-Drones. (s. f.). *DJI Zenmuse L1 vs Zenmuse L2: Principales diferencias*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://hp-drones.com/dji-zenmuse-l1-vs-zenmuse-l2-principales-diferencias/>
- 4) NeonScience. (s. f.). *Los fundamentos del LiDAR*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>
- 5) Oil Spill Response Centre. (s. f.). *La capacidad de los vehículos aéreos no tripulados (UAV)*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://www.oilspillresponse.com/es/centro-de-conocimiento/vigilancia/La-capacidad-de-los-vehiculos-aereos-no-tripulados-UAV/>
- 6) Proyectos de drones – YellowScan. (s. f.). *Lidar drone*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://www.yellowscan.com/es/knowledge/lidar-drone/>
- 7) YellowScan. (s. f.). *Choosing the perfect drone for LiDAR mapping*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://www.yellowscan.com/es/knowledge/choosing-the-perfect-drone-for-lidar-mapping/>
- 8) UMiles Group. (s. f.). *Fotogrametría con drones*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://umilesgroup.com/fotogrametria-con-drones/>
- 9) EyesCloud3D. (s. f.). *LiDAR*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://eyescloud3d.com/blog/lidar>
- 10) USGS. (s. f.). *3DEP Program for 3D Elevation*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://www.usgs.gov/core-science-systems/ngp/3dep>
- 11) NOAA. (s. f.). *LiDAR 101*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>
- 12) Quentin Pentek. (2020). *Contribución a la generación de mapas 3D en color de entornos naturales utilizando datos de un sistema multisensor de drones* [Tesis]. <https://www.theses.fr/2020MONT037>

13) Universidad de Vermont – Centre for Geographic Information (VCGI). (s. f.). *General mapping FAQs*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://vcgi.vermont.gov/resources/frequently-asked-questions/general-mapping-faqs>

## Bibliografía

- 1) Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- 2) Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill.
- 3) Dooge, J. C. (1973). Linear theory of hydrologic systems. In *The rational method* (pp. 79–84). U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1468.
- 4) Fangmeier, D. D., Guertal, E. A., Randall, G. W., & Shapiro, C. A. (2006). *Soil and water conservation engineering* (5ª ed.). Thomson Delmar Learning.
- 5) Foster, A. (1967). *Métodos aprobados en conservación de suelos* (1ª ed.). Trillas S.A.
- 6) Hudson, N. (1981). *Soil conservation* (2ª ed.). Cornell University Press.
- 7) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). (2024). *Terra arbórea: conservación de suelos* (Tomo 1). <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/Terra-arb-2008-1.pdf>
- 8) Koolhaas, M. (2003). *Embalses agrícolas: diseño y construcción*. Hemisferio Sur.
- 9) Koolhaas, M. (2014). *Diseño de terrazas no cultivables*. Academia.edu.
- 10) López Freitas, N. A., & Sánchez Bentancur, M. E. (2020). *Desarrollo de metodología para actualización catastral de áreas construidas de la ciudad de Vergara, a partir de datos LiDAR* (Proyecto de grado). Universidad de la República.
- 11) Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (2020). *Impacto en Uruguay – Plan Nacional de Uso y Manejo de Suelos (PUMS)*. [https://www.gub.uy/.../Impacto%20en%20Uruguay\\_PUMS\\_05102020\\_publicado\\_OP\\_YPA.pdf](https://www.gub.uy/.../Impacto%20en%20Uruguay_PUMS_05102020_publicado_OP_YPA.pdf)
- 12) Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (s. f.). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1 000 000*. [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619\\_carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_del\\_uruguay\\_1.1.000.000\\_imprimir\\_a0\\_0.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf)
- 13) Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (s. f.). *Instructivo orientativo para la selección de los parámetros en el Programa Erosión 6.0*. [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Instructivo\\_orientativo\\_para\\_la\\_seleccion\\_de\\_los\\_par%C3%A1metros\\_en\\_el\\_programa\\_erosion\\_6.0.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Instructivo_orientativo_para_la_seleccion_de_los_par%C3%A1metros_en_el_programa_erosion_6.0.pdf)
- 14) Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (s. f.). *Introducción a la carta de reconocimiento detallado de suelos del Uruguay*. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Introducci%C3%B3n%20a%20la%20carta%20de%20reconocimiento%20detallado%20de%20suelos%20del%20Uruguay\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Introducci%C3%B3n%20a%20la%20carta%20de%20reconocimiento%20detallado%20de%20suelos%20del%20Uruguay_0.pdf)

- 15) Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (s. f.). *Manual de usuario – Programa Erosión* 6.0.  
[https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/manual\\_de\\_usuario\\_programa\\_erosion.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/manual_de_usuario_programa_erosion.pdf)
- 16) Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3ª ed.). Blackwell Publishing.
- 17) Phillips, R. L., & Beauchamp, K. H. (1966). *Parallel terrace systems: Planning, layout, design and construction*. USDA Soil Conservation Service.
- 18) Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall.
- 19) Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook No. 703.
- 20) Siri, G. (2009). *FPTA 251. Impacto de nuevas prácticas de manejo de suelo en la dinámica del agua en sistemas bajo siembra directa*. INIA-UdelaR.
- 21) USDA Soil Conservation Service. (1954). *Handbook of channel design for soil and water conservation* (SCS-TP-61).
- 22) USDA Soil Conservation Service. (1986). *Technical Release No. 55 (2ª ed.): Urban hydrology for small watersheds*.
- 23) Wilson, E. M. (1974). *Engineering hydrology* (2ª ed.). The McMillan Press.

# Anexos

## 1. Características de suelos

**Anexo 1:** Suelo 11.9. Según la Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay.

Este grupo se localiza en forma discontinua en el sur del Dpto. de Colonia y es observable por Ruta 1, en las proximidades de Nueva Helvecia. También aparecen en el Dpto. de San José, existiendo las últimas áreas en los alrededores de Ecilda Paullier. El material geológico corresponde a sedimentos provenientes de la formación Fray Bentos, la cual en algunos lugares aparece con características tilloides, ya que en su masa existen gravillas, gravas y cantos de litologías correspondientes al basamento cristalino. También existe aporte litológico de granulometría fina de los sedimentos cuaternarios que ocupan los interfluvios y disminuyen de espesor gradualmente, hasta desaparecer, en las laderas de disección características de este grupo. El relieve está constituido por laderas fuertes que conforman un frente de disección con pendientes de 4 a 8%. Los suelos predominantes son Brunosoles Subéutricos, a veces Eutricos, Típicos, a veces Lúvicos (Praderas Pardas medias a máximas), de color pardo grisáceo oscuro, textura franco arcillosa a franco arenosa pesada, fertilidad media, a veces alta y moderadamente bien drenados. El uso predominante de la tierra es con cultivos invierno-estivales y forrajeros para lechería, con tamaños medios de chacra y, en general, con muchos años de agricultura, por lo que no pueden señalarse características de la vegetación de campo natural. Este grupo integra la unidad Ecilda Paullier - Las Brujas en la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.). Índice de Productividad 201.

**Anexo 2:** Suelos 10.6 b. Según la Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay.

Este grupo se localiza como una franja en el sur de los Dptos. de Montevideo, Canelones y San José. El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos del Cuaternario, de color pardo a pardo naranja. El relieve es suavemente ondulado, con predominio de pendientes de 1 a 3%. En el Dpto. de Canelones, aproximadamente al este de Toledo el relieve es más fuerte ya que se encuentra influido por la proximidad del basamento cristalino dando un predominio de pendientes de 2 a 4%, presenta grados de erosión definibles en general como severa. Los suelos predominantes corresponden a Brunosoles Subéutricos, a veces Eutricos, Típicos y Lúvicos (Praderas Pardas medias y máximas), de color pardo a pardo oscuro, textura franco limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. El uso predominante es hortícola-frutícola y de cultivos a escala de pequeña chacra. Es común la existencia de tierras que actualmente no sirven para cultivos en forma intensiva, las cuales pasan a uso pastoril, que en algunos casos es limitado por la degradación de los suelos. Este grupo se encuentra integrado en la unidad Toledo de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.). Índice de Productividad 131. (Índice CONEAT - Carta de Suelos - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca).

## 2. Código de Octave

**Anexo 3:** Código en software Octave, para cálculo de promedios y desviaciones para las 100 simulaciones generadas del MDE original para cada distancia de puntos aleatorios.

```
1 folder = 'C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\Datos.gdb'; % Reemplaza por la ruta a tu carpeta
2 files = dir(fullfile(folder, '*.txt'));
3 num_files = length(files);
4
5 if num_files == 0
6     error('No se encontraron archivos .txt en la carpeta.');
```

```
7 endif
8
9 % Leer el primer archivo para obtener el tamaño de la matriz
10 sample_file = fullfile(folder, files(1).name);
11 data_sample = dlmread(sample_file, ',', 6, 0); % Empieza a leer desde la fila 7 (índice 6)
12 [m, n] = size(data_sample);
13
14 % Inicializar matrices para acumulación
15 sum_matrix = zeros(m, n);
16 sum_squared = zeros(m, n);
17
18 for i = 1:num_files
19     fname = fullfile(folder, files(i).name);
20     data = dlmread(fname, ',', 6, 0); % Ignorar las primeras 6 líneas
21     sum_matrix += data;
22     sum_squared += data.^2;
23 endfor
24
25 % Calcular promedio y desviación estándar
26 mean_matrix = sum_matrix / num_files;
27 std_matrix = sqrt((sum_squared - (sum_matrix.^2)/num_files) / (num_files - 1));
28
29 dlmwrite('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\Datos\promedio.asc', mean_matrix, 'delimiter', '\t');
30 dlmwrite('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\Datos\desviacion.asc', std_matrix, 'delimiter', '\t');
```

**Anexo 4:** Código para cálculo de pérdida de suelo con fórmula RUSLE.

```
1 % === Parámetros constantes de RUSLE ===
2 R = 300; % Erosividad de la lluvia
3 K = 0.32; % Erodabilidad del suelo
4 C = 0.1; % Factor de cobertura vegetal
5 P = 1.0; % Factor de prácticas de conservación
6 L = 100; % Longitud de pendiente (en metros)
7
8 % Leer pendiente promedio desde archivo ASC
9 pendiente_grados = dlmread('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\promedio.asc');
```

```
10
11 % Convertir grados a radianes
12 pend_rad = pendiente_grados * pi / 180;
13
14 % Calcular pendiente en porcentaje
15 pend_pct = tan(pend_rad) * 100;
16
17 % Calcular el valor de 'm' según pendiente en porcentaje
18 m = zeros(size(pend_pct));
19 m(pend_pct < 1) = 0.2;
20 m(pend_pct >= 1 & pend_pct < 3) = 0.3;
21 m(pend_pct >= 3 & pend_pct < 5) = 0.4;
22 m(pend_pct >= 5) = 0.5;
23
24 % Calcular el factor LS según nueva fórmula
25 LS = ((L / 22.1).^m) .* (0.065 + 0.04536 * pend_pct + 0.0065 * pend_pct.^2);
26
27 % Asignar -9999 a celdas sin datos
28 LS(pendiente_grados == -9999) = -9999;
29
30 % Calcular A usando RUSLE
31 A = R * K * C * P .* LS;
32 A(pendiente_grados == -9999) = -9999;
33
34 % Guardar resultados en archivo ASC
35 dlmwrite('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\salida2.asc', A, 'delimiter', '\t');
```

## Anexo 5: Código para obtener el valor promedio de pérdida de suelo.

```
prueba1.m x rusle.m x rusle2.m x promRusle.m x
1 % Leer pendiente promedio desde archivo ASC
2 rusle = load('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\Remuestreos Original\75\757octave.asc');
3
4 rusle(rusle == -9999) = NaN;
5
6 % Convertir grados a radianes
7 promedio = mean(rusle(~isnan(rusle)));
8
9 % Guardar resultados en archivo ASC
10 disp(['promedio: ', num2str(promedio)]);
```

## Anexo 6: Código para obtener el valor de Q1, Q2, Q3.

```
cuartiles.m x
1 % Leer la matriz desde el archivo
2 A = dlmread('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\pendienteOctave.txt');
3
4 % Convertir la matriz en un vector columna y ordenarlo
5 datos = sort(A(:));
6
7 % Total de elementos
8 n = length(datos);
9
10 % Índices de cuartiles (posición teórica)
11 i_Q1 = 0.25 * (n + 1);
12 i_Q2 = 0.50 * (n + 1);
13 i_Q3 = 0.75 * (n + 1);
14
15 % Función para interpolar cuartiles
16 function q = cuartil(datos, i)
17     abajo = floor(i);
18     arriba = ceil(i);
19     if abajo == arriba
20         q = datos(abajo);
21     else
22         q = datos(abajo) + (i - abajo) * (datos(arriba) - datos(abajo));
23     end
24 end
25
26 % Calcular cuartiles
27 Q1 = cuartil(datos, i_Q1);
28 Q2 = cuartil(datos, i_Q2);
29 Q3 = cuartil(datos, i_Q3);
30
31 % Mostrar resultados
32 fprintf('Primer cuartil (Q1): %f\n', Q1);
33 fprintf('Mediana (Q2): %f\n', Q2);
34 fprintf('Tercer cuartil (Q3): %f\n', Q3);
```

## Anexo 7: Código de cálculo de pérdida de suelo a partir de la mediana.

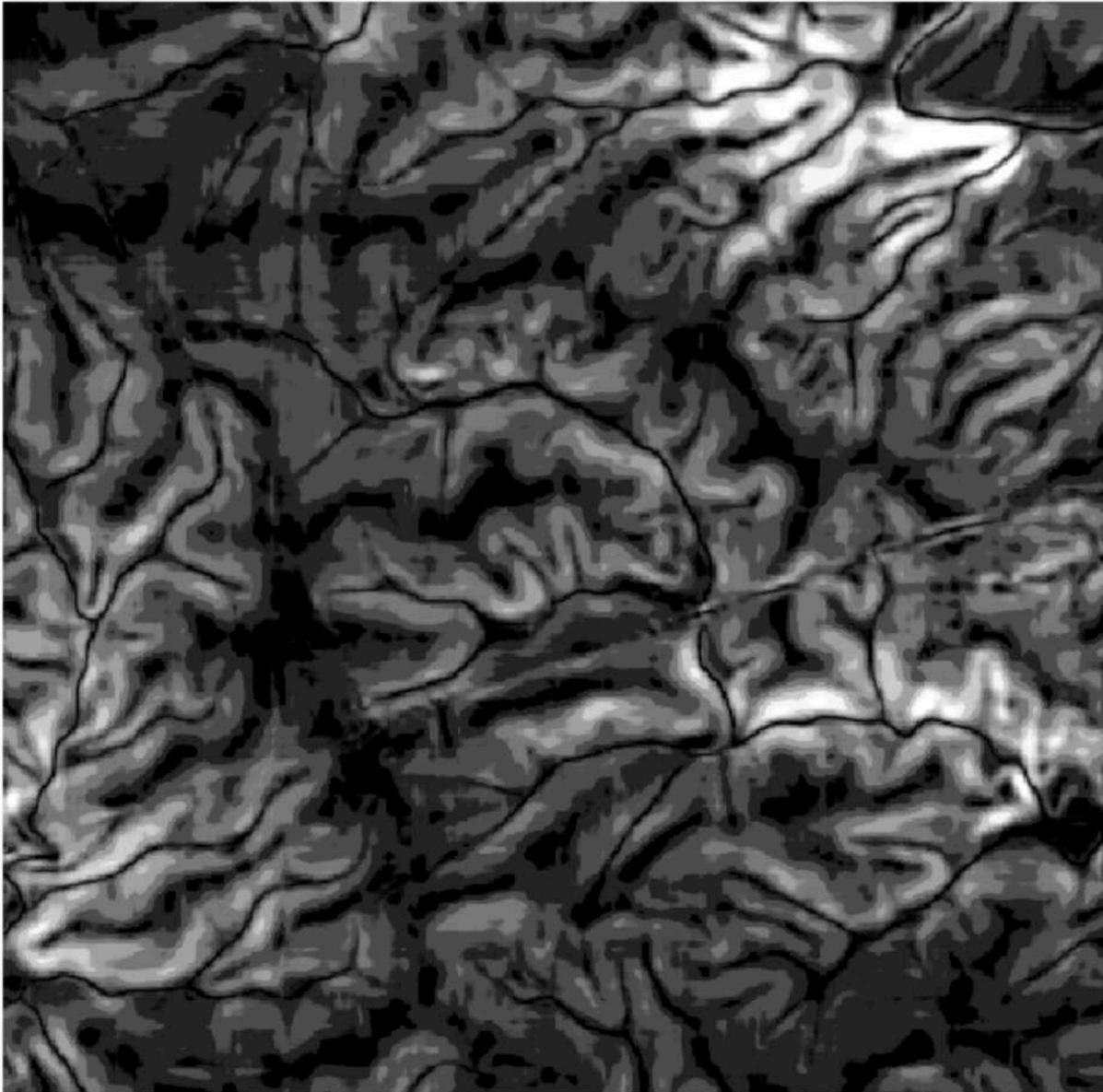
```
calculomediana.m
1 folder = 'C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\50\Simulacion50';
2 files = dir(fullfile(folder, '*.txt'));
3 num_files = length(files);
4
5 if num_files == 0
6     error('No se encontraron archivos .txt en la carpeta.');
```

```
7 endif
8
9 % Leer el primer archivo para obtener el tamaño de la matriz
10 sample_file = fullfile(folder, files(1).name);
11 data_sample = dlmread(sample_file, '', 6, 0); % Leer desde la fila 7
12 [m, n] = size(data_sample);
13
14 % Inicializar celdas para guardar valores por posición
15 values = cell(m, n);
16 for i = 1:m
17     for j = 1:n
18         values{i, j} = []; % Lista vacía para cada celda
19     end
20 end
21
22 % Leer cada archivo y acumular valores por posición
23 for f = 1:num_files
24     fname = fullfile(folder, files(f).name);
25     data = dlmread(fname, '', 6, 0); % Ignorar primeras 6 líneas
26     for i = 1:m
27         for j = 1:n
28             values{i, j}(end + 1) = data(i, j); % Agregar el valor
29         end
30     end
31 end
32
33 % Calcular la mediana para cada posición
34 median_matrix = zeros(m, n);
35 for i = 1:m
36     for j = 1:n
37         median_matrix(i, j) = median(values{i, j});
38     end
39 end
40
41 % Guardar la matriz de medianas
42 dlmwrite('C:\Users\julij\Desktop\Tesis\Resultados\50\mediana.asc', median_matrix, 'delimiter', '\t');
```

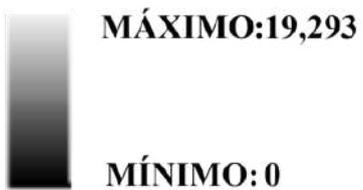
### 3. Resamleos

Resamleo de modelos digitales de elevación para los modelos generados con puntos aleatorios cada 25, 50, 100 y 250 metros.

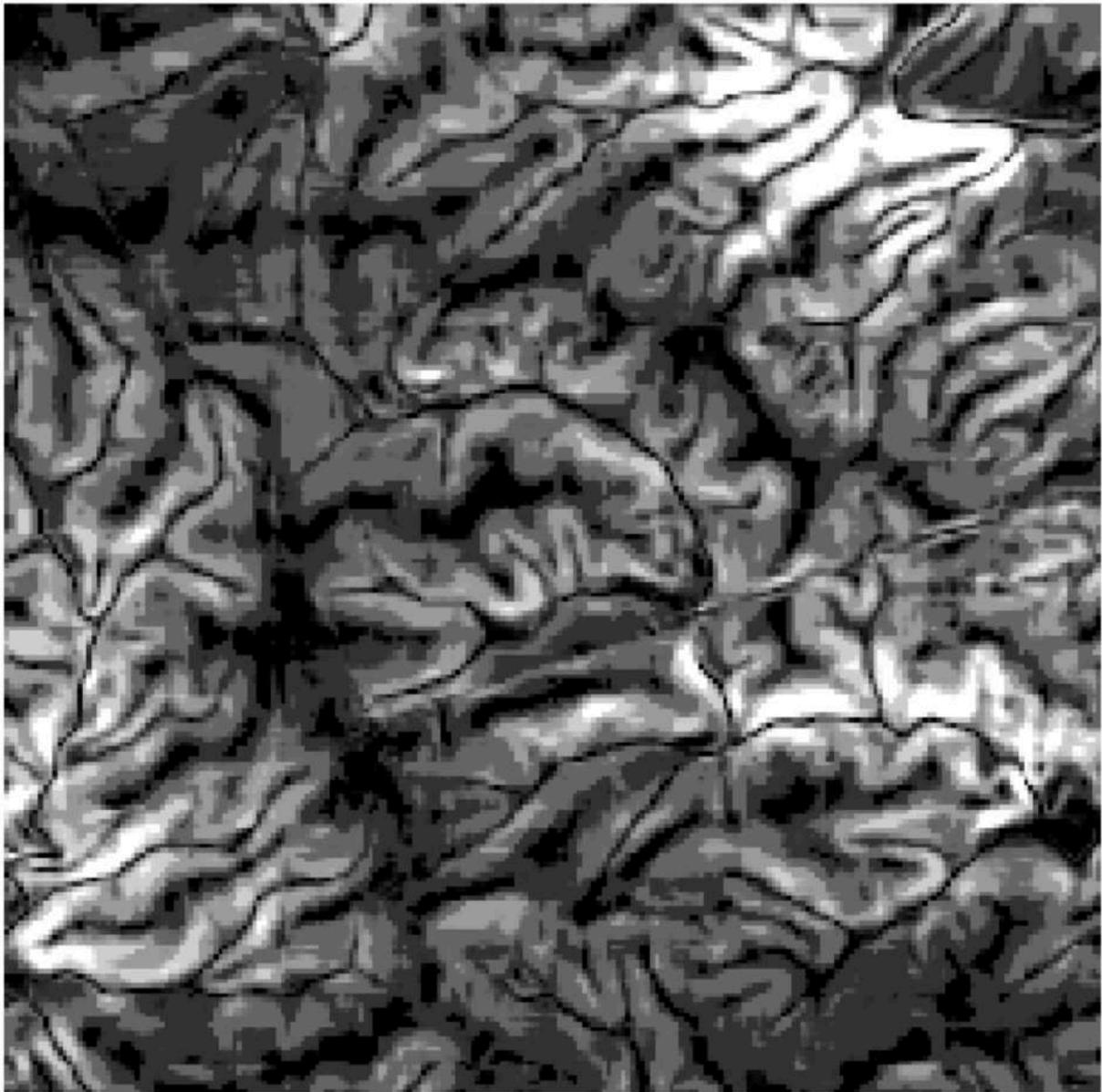
**Anexo 8:** MDP distancia 25 (10x10).



#### REFERENCIA



**Anexo 9:** Remuestreo MDP distancia 25 (22,1x22,1).



**REFERENCIA**



**MÁXIMO:19,185**

**MÍNIMO: 0**

**Anexo 10:** Remuestreo MDP distancia 25 (50x50).



**REFERENCIA**



**MÁXIMO: 17,633**

**MÍNIMO: 0**

**Anexo 11:** Remuestreo MDP distancia 25 (75x75).



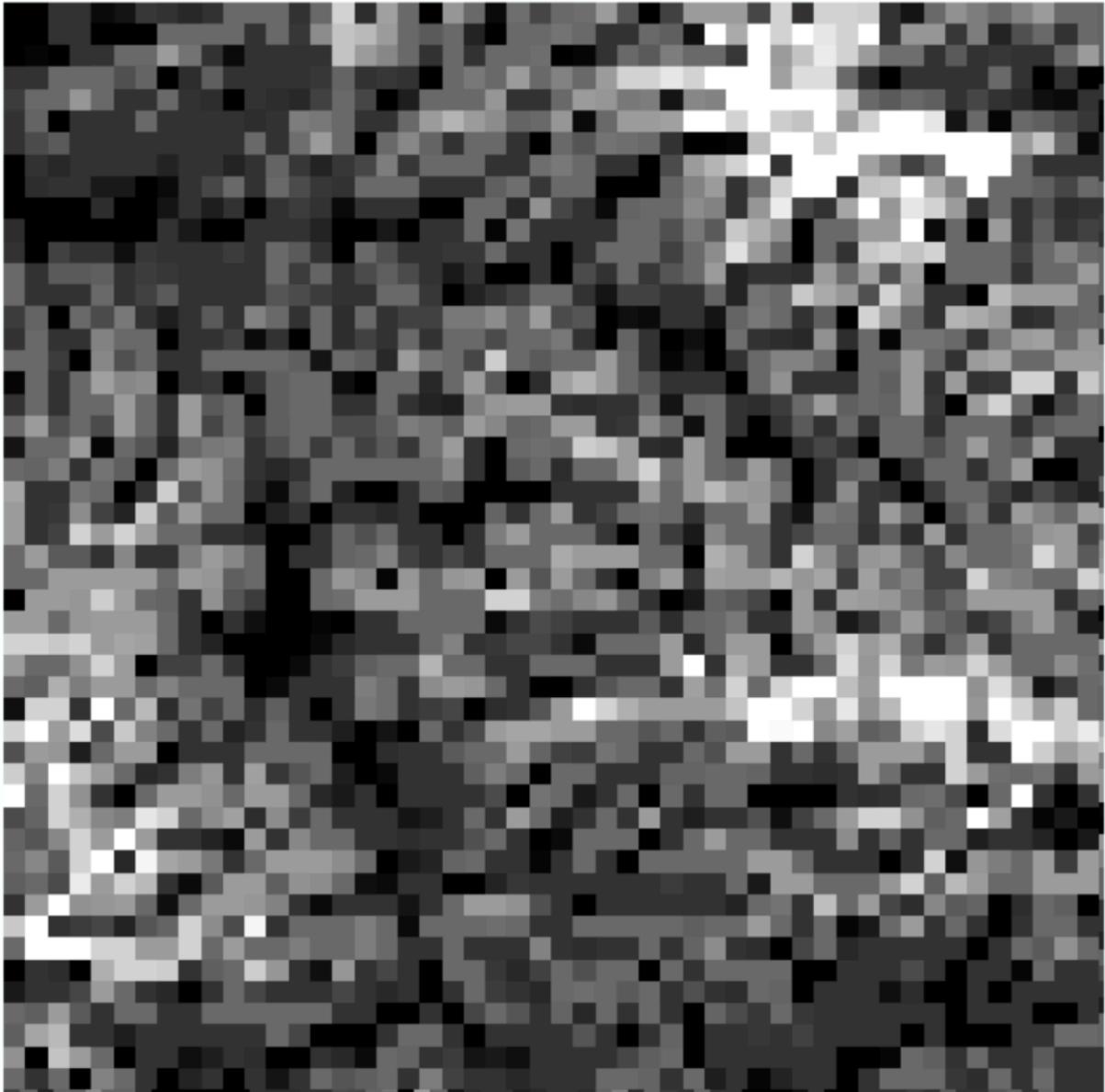
**REFERENCIA**



**MÁXIMO: 15,838**

**MÍNIMO: 0**

**Anexo 12:** Remuestreo MDP distancia 25 (100x100).



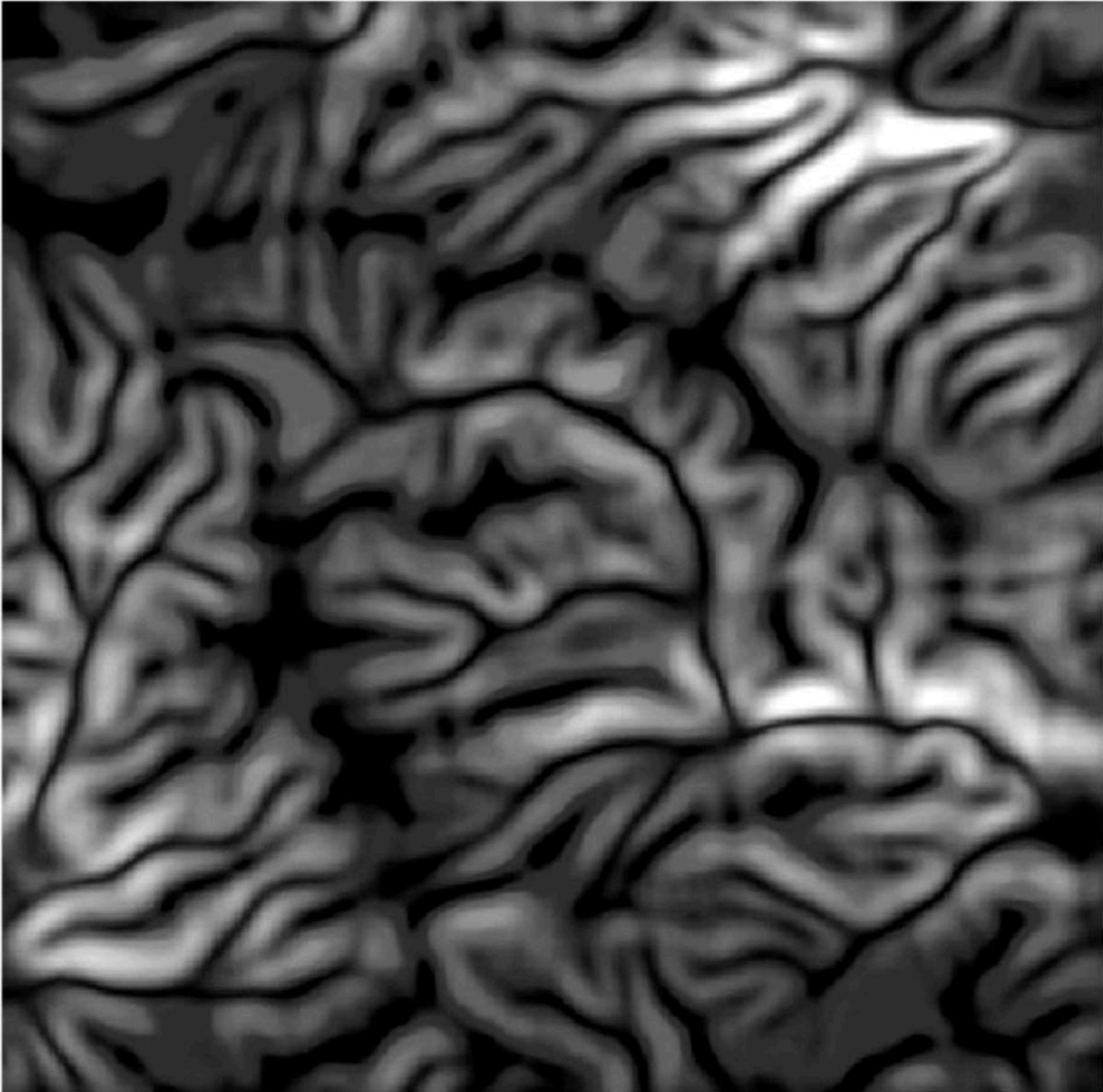
**REFERENCIA**



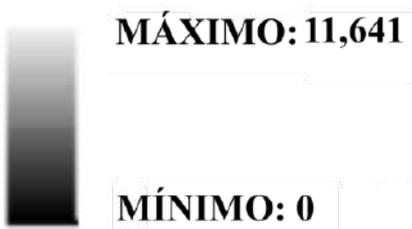
**MÁXIMO: 14,535**

**MÍNIMO: 0**

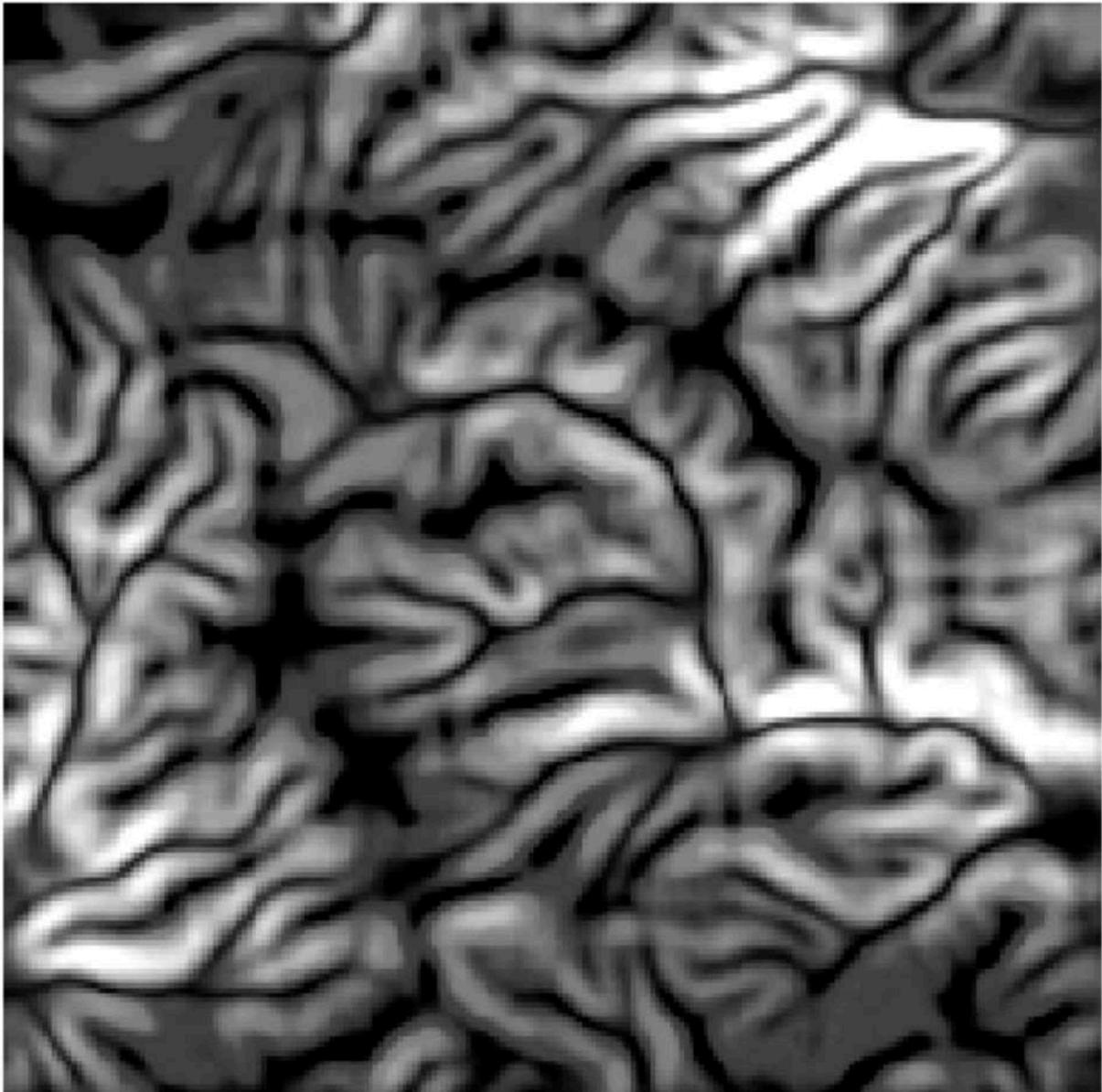
**Anexo 13:** MDP distancia 50 (10x10).



**REFERENCIA**



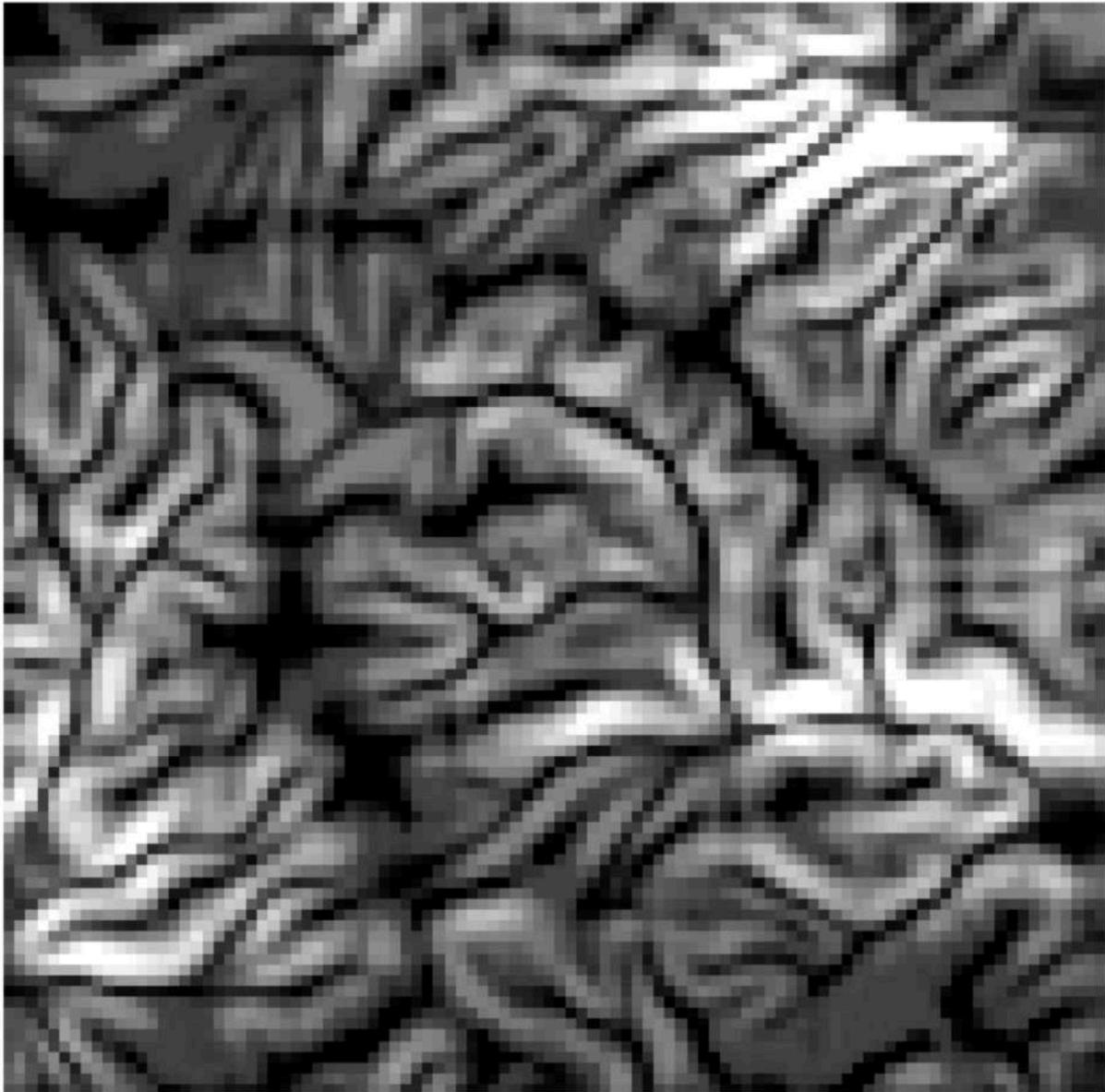
**Anexo 14:** Resmuestreo MDP distancia 50 (22,1x22,1).



**REFERENCIA**



**Anexo 15:** Resmuestreo MDP distancia 50 (50x50).



## REFERENCIA



**Anexo 16:** Resmuestreo MDP distancia 50 (75x75).

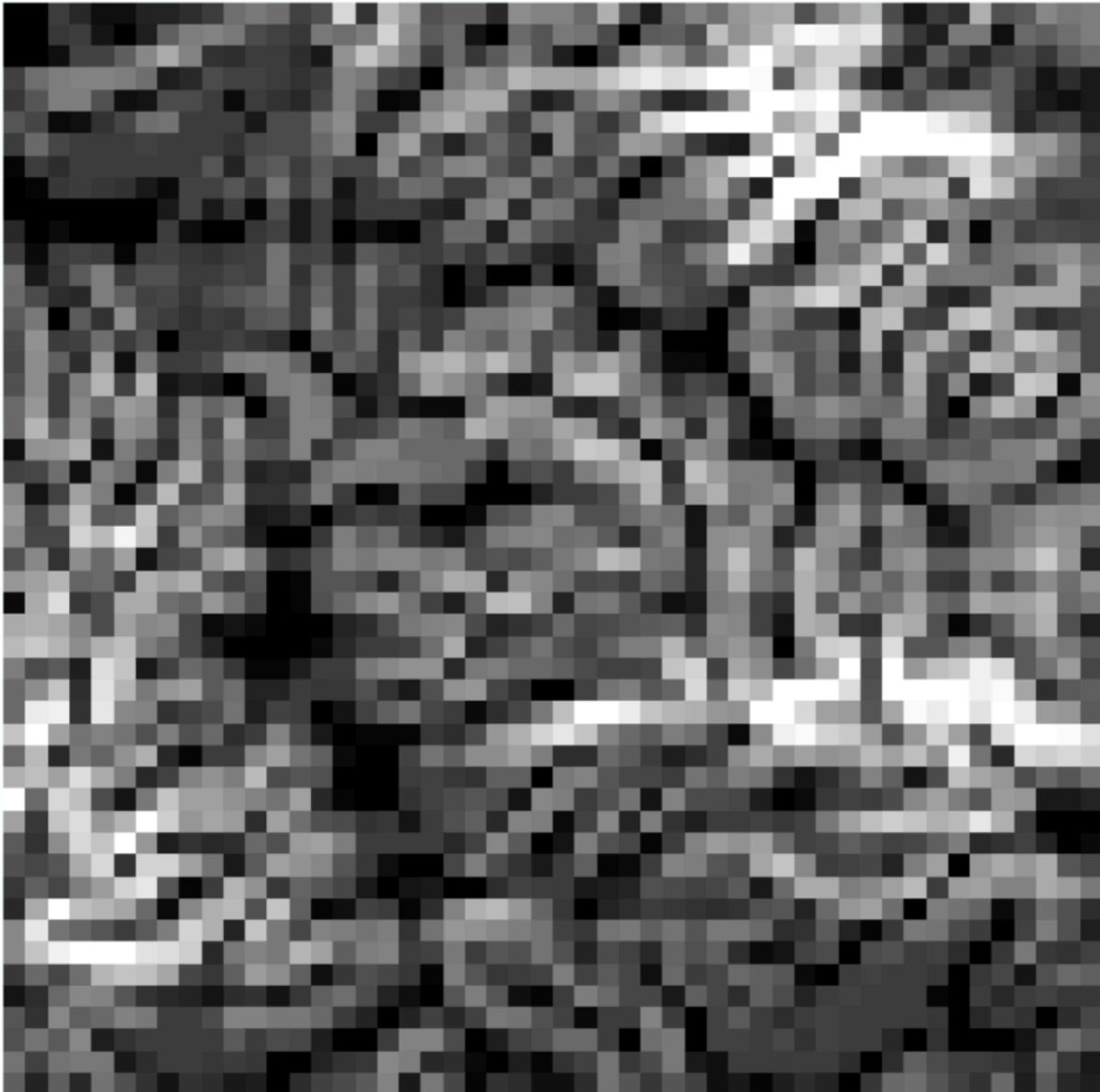


**REFERENCIA**

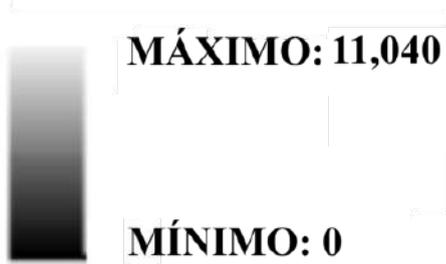
**MÁXIMO: 11,517**

**MÍNIMO: 0**

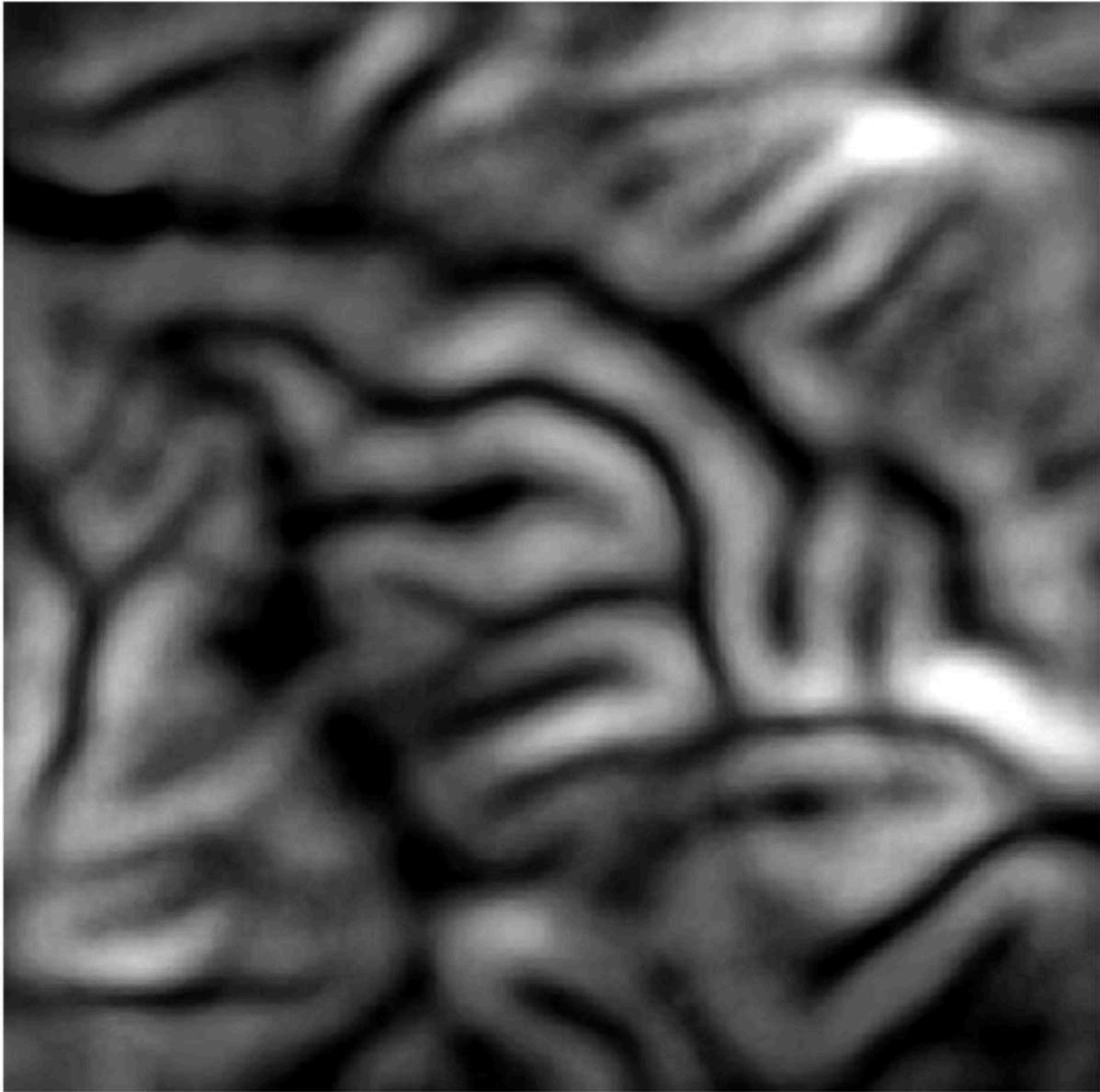
**Anexo 17:** Resmuestreo MDP distancia 50 (100x100).



**REFERENCIA**



**Anexo 18:** MDP distancia 100 (10x10).



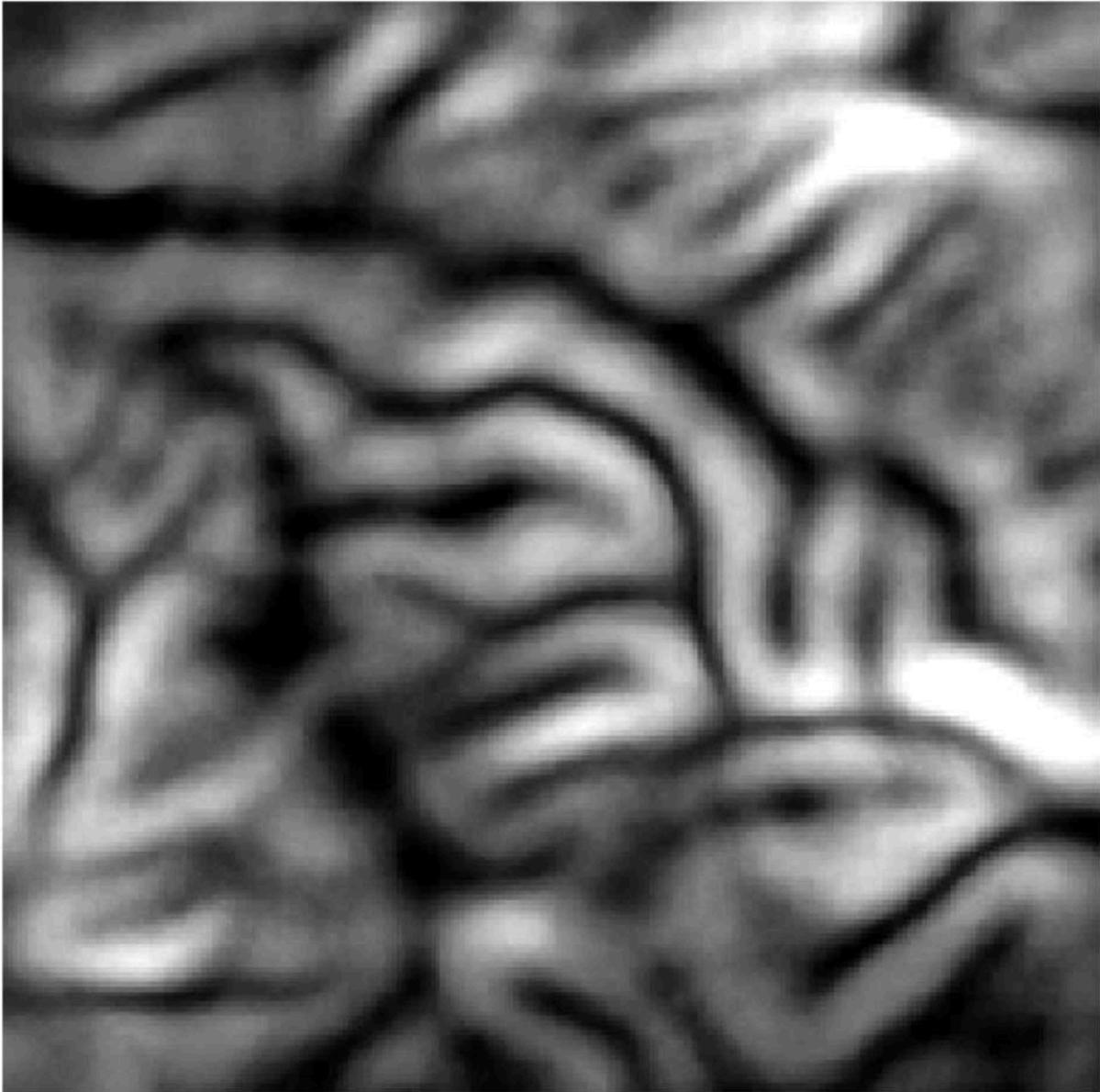
## REFERENCIA



**MÁXIMO: 5,783**

**MÍNIMO: 0**

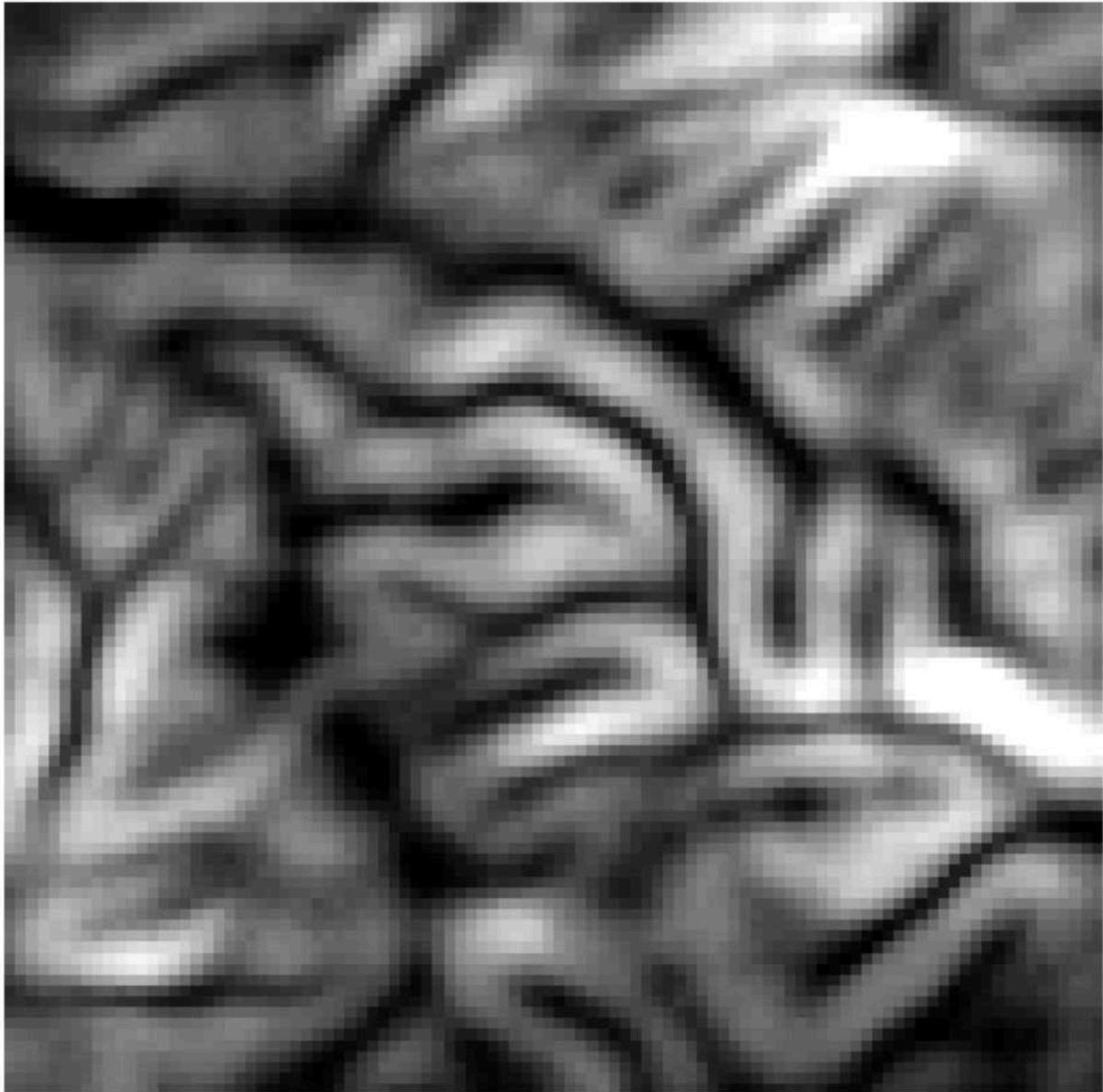
**Anexo 19:** Resmuestreo MDP distancia 100 (22,1x22,1).



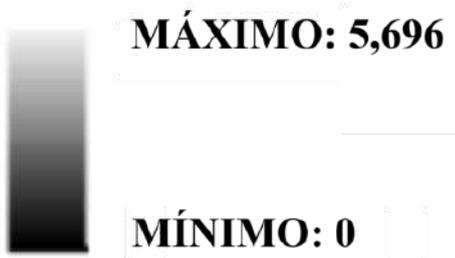
## REFERENCIA



**Anexo 20:** Resmuestreo MDP distancia 100 (50x50).



## **REFERENCIA**



**Anexo 21:** Resmuestreo MDP distancia 100 (75x75).



**REFERENCIA**



**MÁXIMO: 5,678**

**MÍNIMO: 0**

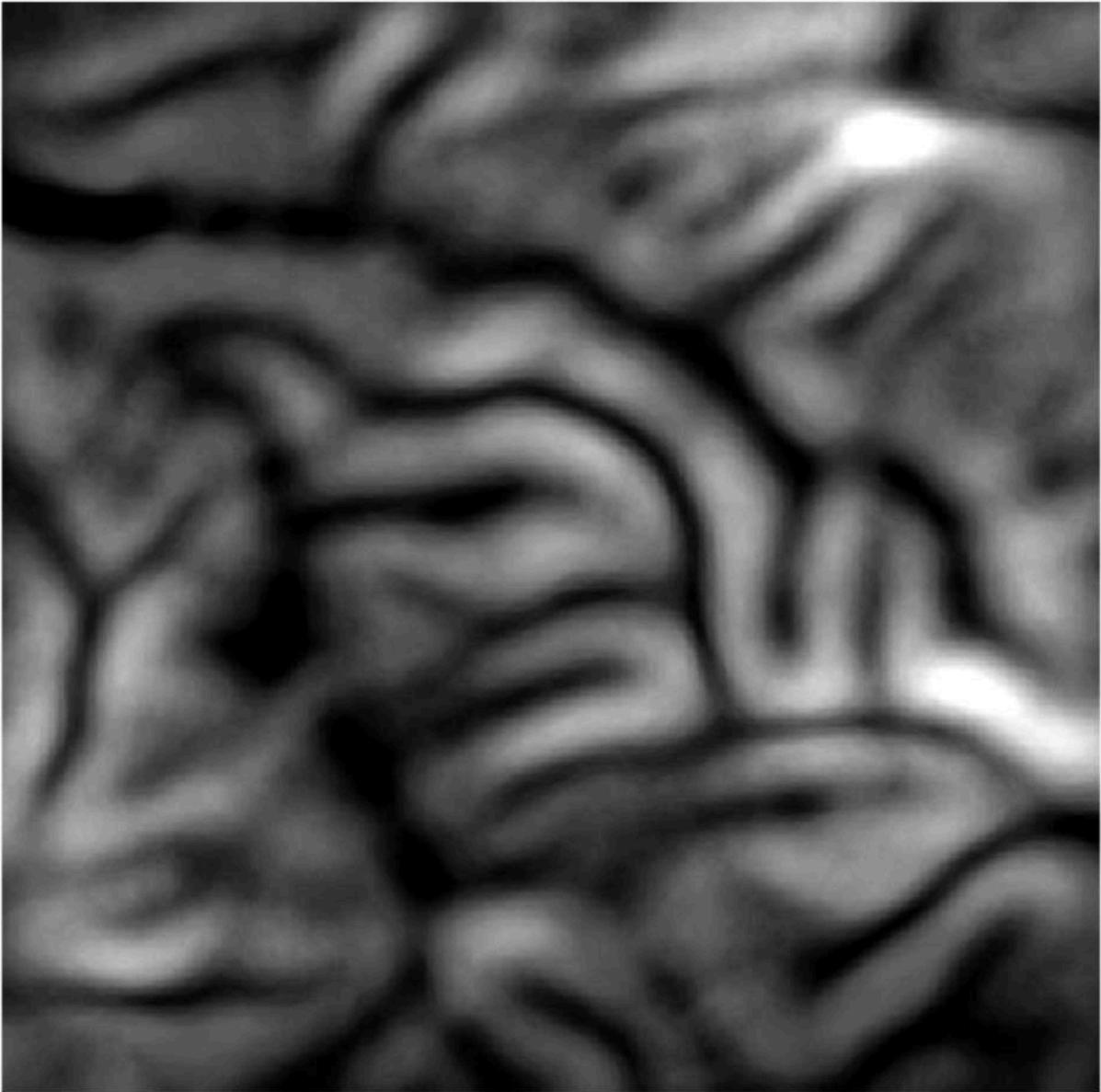
**Anexo 22:** Resmuestreo MDP distancia 100 (100x100).



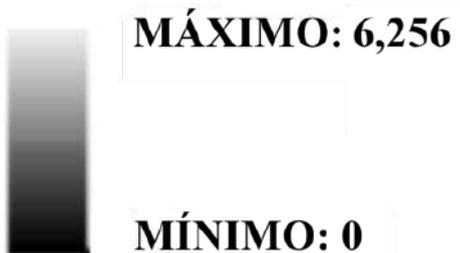
## REFERENCIA



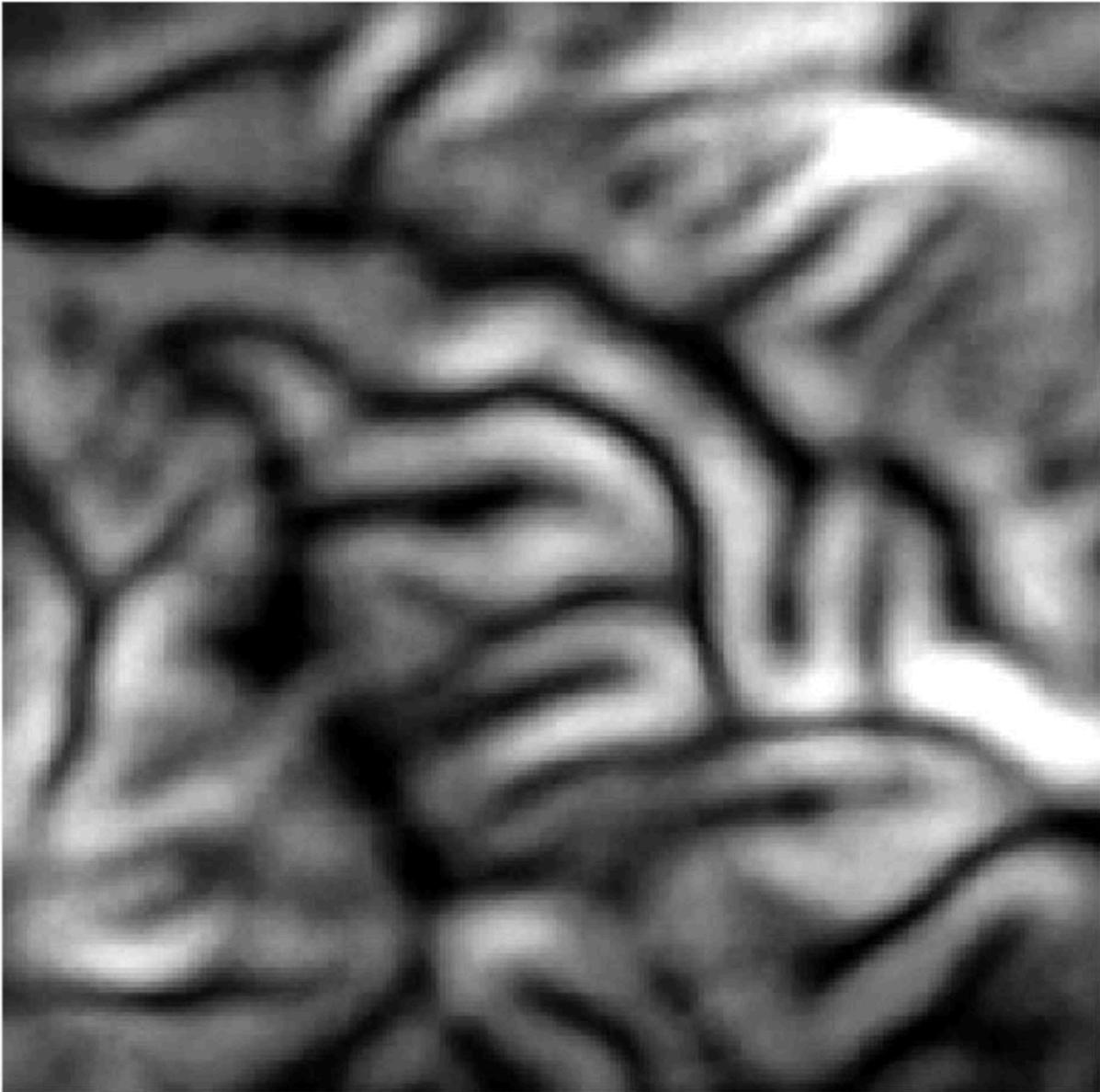
**Anexo 23:** MDP distancia 250 (10x10).



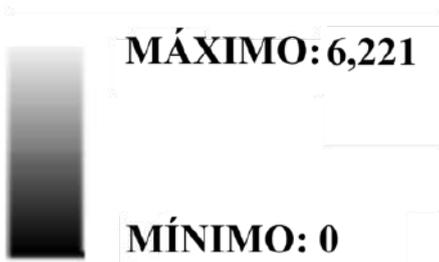
## **REFERENCIA**



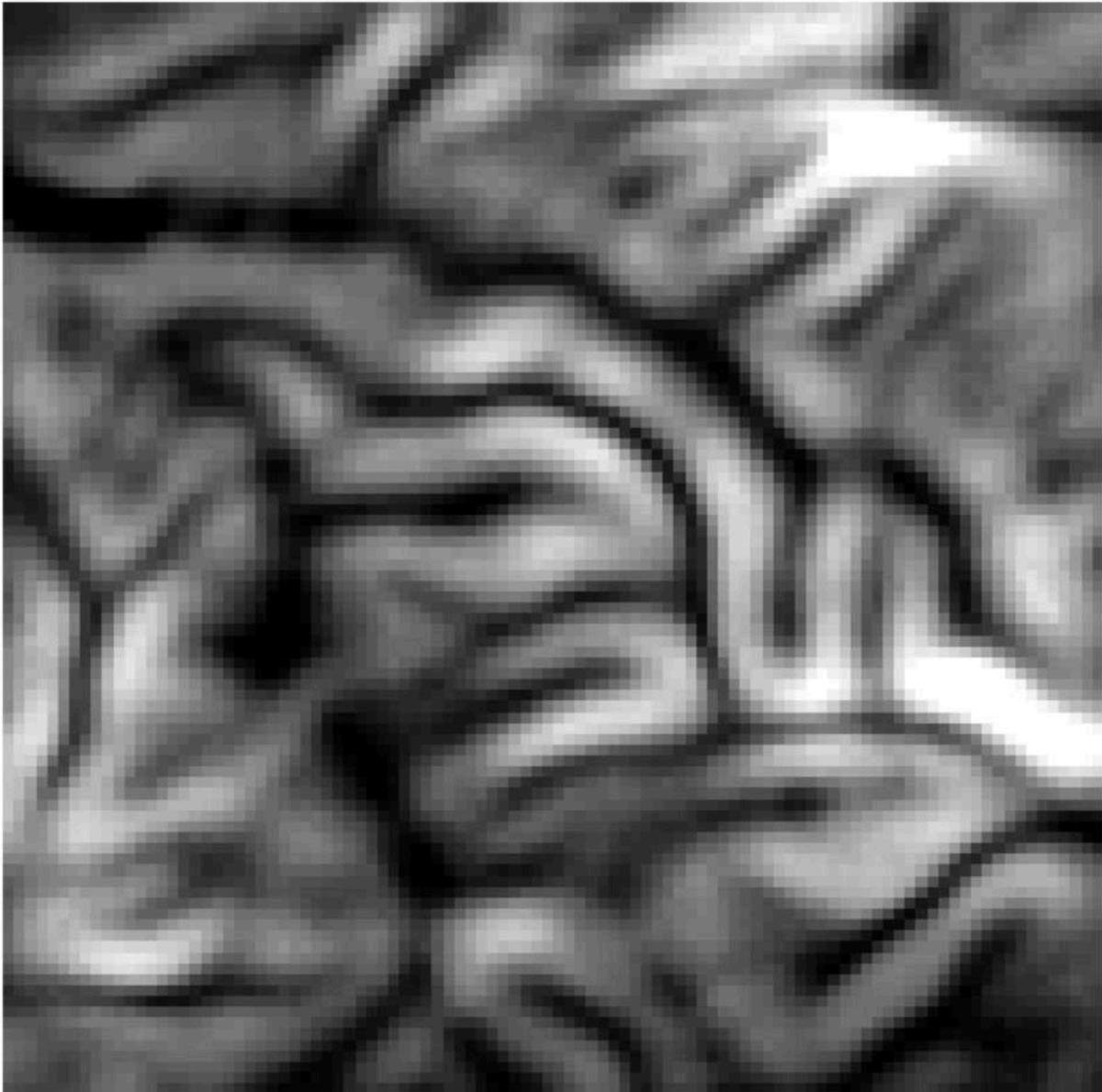
**Anexo 24:** Resmuestreo MDP distancia 250 (22,1x22,1).



## REFERENCIA



**Anexo 25:** Resmuestreo MDP distancia 250 (50x50).



## REFERENCIA



**MÁXIMO: 6,134**

**MÍNIMO: 0**

**Anexo 26:** Resmuestreo MDP distancia 250 (75x75).



## REFERENCIA



**MÁXIMO: 6,081**

**MÍNIMO: 0**

**Anexo 27:** Resmuestreo MDP distancia 250 (100x100).



## REFERENCIA



