

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**TECNOLOGÍA GPS Y SENSORES REMOTOS PARA  
PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL**

**UTILIZACIÓN DE DRONES EN LEVANTAMIENTO  
TOPOGRÁFICO PARA EL ANÁLISIS DE CÁRCAVA EN  
RESIDENCIAL SANTA LUCÍA, MUNICIPIO DE ILOPANGO**

PRESENTADA POR:

**JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ ZAVALETA**

**SAMUEL ADONAY MARTÍNEZ GARCÍA**

**DENNIS ISIDRO MARTÍNEZ MEJÍA**

**OSCAR ARMANDO PINEDA MEJÍA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO(A) CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2023

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL:

**LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCIA**

SECRETARIO :

**ARQ. RAUL ALEXANDER FABIAN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. CARLOS ALBERTO ESCOBAR FLORES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Curso de Especialización previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO(A) CIVIL**

Título

:

**TECNOLOGÍA GPS Y SENSORES REMOTOS PARA  
PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL**

**UTILIZACIÓN DE DRONES EN LEVANTAMIENTO  
TOPOGRÁFICO PARA EL ANÁLISIS DE CÁRCAVA EN  
RESIDENCIAL SANTA LUCÍA, MUNICIPIO DE ILOPANGO**

Presentado por

:

**JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ ZAVALETA**

**SAMUEL ADONAY MARTÍNEZ GARCÍA**

**DENNIS ISIDRO MARTÍNEZ MEJÍA**

**OSCAR ARMANDO PINEDA MEJÍA**

Curso de Especialización Aprobado por:

Docente Asesor

:

**ING. WILFREDO AMAYA ZELAYA**

San Salvador, noviembre 2023

Curso de Especialización aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. WILFREDO AMAYA ZELAYA**

## INDICE

INTRODUCCIÓN	XV
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4 Alcances	5
1.5 Limitaciones	6
1.6 Justificación	7
CAPÍTULO II: GENERALIDADES DE UNA CÁRCAVA	9
2.1 Definición de cárcavas	9
2.1.2 Definición, origen y formación de cárcavas	9
2.2 Formación de cárcavas	10
2.3 Consecuencias de cárcavas en el medio	11
2.4 Clasificación de cárcavas	12
2.4.1 Según su origen y características	12
2.4.2 Según su profundidad	13
2.4.3 Por su profundidad y ancho	14
2.4.4 Por su pendiente	15
2.4.5 Según la forma en planta	16
2.4.6 Por su perfil	17
2.4.7 Según actividad erosiva	19
CAPÍTULO III: FUNDAMENTOS DE GEODESIA	21
3.1 Sistemas de coordenadas	27
3.2 Sistema de coordenadas geográficas	28
3.3 Sistema de coordenadas cartesianas	32
3.4 Tipos de proyecciones cartográficas	33
3.5 Tipos de coordenadas	38
CAPÍTULO IV: SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS	41
4.1 Definición sistemas de referencia geodésico	41
4.2 Elipsoide de referencia	47
4.2.1 Geoide	52

4.2.2 Elipsoide WGS-1984	53
4.2.3 Datum geodésico	55
4.2.4 Datum Norteamericano 1927	58
4.2.5 Datum Global WGS-1984	59
<b>CAPÍTULO V: SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS MODERNOS</b>	<b>60</b>
5.1 Sistema Internacional de Referencia Terrestre	62
5.2 Marco Internacional de Referencia Terrestre ITRF	64
5.3 Sistemas y marcos de referencia regional SIRGAS	67
5.4 Sistemas y marcos de referencia local SIRGAS-ES2007	75
<b>CAPÍTULO VI: PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS</b>	<b>80</b>
6.1 Definición proyecciones cartográficas	80
6.2 Propiedades de una proyección cartográfica	81
6.3 Tipos de proyecciones cartográficas	82
6.4 Proyección Universal Transversal de Mercator UTM	84
6.5 Proyección Cónica Conformal de Lambert Secante	85
6.6 La Proyección de Gall-Peters	85
6.7 La Proyección de Van Der Grinten	86
6.7 La Proyección de Aitoff	86
6.7 La Proyección de Robinson	86
6.8 La Proyección de Winkel-Tripel	87
<b>CAPÍTULO VII: FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA</b>	<b>88</b>
7.1 Fotogrametría	88
7.2 Historia de la fotogrametría	89
7.3 Evolución de la fotogrametría	93
7.4 Tipos de fotogrametría	95
7.5 Método de la fotogrametría	97
7.6 Fotogrametría con drones	98
<b>CAPÍTULO VIII: GENERALIDADES DE LOS DRONES</b>	<b>100</b>
8.1 Funcionamiento de drones	101
8.2 Tipos de Drones Según su Estructura	102
8.3 Tipos de drones según el número de hélices o brazos	104
8.4 Tipos de sensores en los drones	107
<b>CAPÍTULO IX: RECONOCIMIENTO EN CAMPO</b>	<b>112</b>

9.1 Descripción del lugar de levantamiento	112
9.2 Medición GPS de estación de referencia	113
9.3 Medición RTK de los Puntos de Control Fotogramétricos (PCF)	115
9.3.1 Ubicación de los Puntos de Control Fotogramétricos (PCF) en campo	116
9.3.2 Medición con RTK	117
CAPÍTULO X: PLAN DE VUELO	119
10.1 DJI GO 4	119
10.2 Configuración de Return to Home (RTH) por batería baja	120
10.3 Plan de vuelo con Pix4Dcapture	122
10.4 Descripción del plan de vuelo	125
10.5 Armado De Dron Phantom 4 para despegue	126
CAPÍTULO XI: PROCESAMIENTO DE DATOS	130
11.1 Procesamiento de datos con el software Pix4D	130
11.1.2 Paso 1: Procesamiento Inicial	132
11.1.3 Paso 2: Nube de puntos y malla	147
11.1.4 Paso 3: Procesamiento para generar DMS y Ortomosaico	163
11.2 Análisis de resultados	169
11.2.1 Reporte de calidad Pix4D	169
11.3 Obtención de superficies, volúmenes y modelado de taludes en Civil 3D.	172
CAPÍTULO XII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	197
Conclusión	197
Recomendaciones	198
BIBLIOGRAFÍA	199
ANEXOS	200
GLOSARIO	205

## INDICE DE IMÁGENES

Imagen 2-1. Tipos de cárcavas según la forma en planta: 1) Lineal, 2) Bulbosa, 3) dendrítica, 4) enrejada y 5) paralela .....	17
Imagen 2-2. Cinco tipos de cárcavas según los perfiles transversales: 1) En "V" o en garganta, 2) cóncava o en "U", 3) cuadrada o en cajón, 4) escalonada, y 5) irregular. ....	19
Imagen No 3-1. Teoría de Tales de Mileto de una tierra plana.	
Imagen No 3-2. Teoría de los Hindúes .....	22
Imagen No 3-3. Teoría de los Chinos y Egipcios. ....	22_Toc149848911
Imagen No 3-4. Teoría de Anaximandro de Mileto .....	23
Imagen No 3-5. Teoría de Eratóstenes.....	24
Imagen No 3-6. Forma real de la Tierra debido a la fuerza de gravedad. ....	26_Toc149848915
Imagen No 3-7. Paralelos y Meridianos	
Imagen No 3-8. Paralelos.....	30
Imagen No 3-9. Meridianos. ....	31
Imagen No 3-10. Tipos de Proyecciones Cartográficas.....	32
Imagen No 3-11. Proyección cilíndrica. ....	34
Imagen No 3-12. Proyección Cónica .....	36_Toc149848927
Imagen No 3-13. Proyección polar o acimutal.....	37
Imagen No 3-14. Sistema de Coordenadas Planas .....	38
Imagen No 3-15. Tipos de Coordenadas .....	39
Imagen No 4-1. Forma real de la Tierra debido a la fuerza de gravedad. 42	
Imagen No 4-2. Representación de coordenadas geográficas de la Tierra.	
Imagen No 4-3. Representación geodésica de la figura terrestre, esferoide o elipsoide de revolución. ....	44
Imagen No 4-4. Satélite GNSS en la órbita terrestre. ....	46
Imagen No 4-5. Fórmula general del elipsoide.....	48
Imagen No 4-6. Verdadera forma de la Tierra.....	52
Imagen No 4-7. Elipsoide WGS-84. ....	53
Imagen No 4-8. Representación del punto fundamental.....	55
Imagen No 5-1. Localización de estaciones ITRF .....	65

Imagen No 5-2. Estaciones SIRGAS95 ubicadas en América del Sur. ....	69
Imagen No 5-3. Estaciones SIRGAS2000 ubicadas en toda América. ....	71
Imagen No 5-4. Estaciones SIRGAS-CON a nivel global. ....	74
Imagen No 7-1. Catedral de Reims en Francia. ....	90
Imagen No 7-2. Componentes de una cámara fotogramétrica analógica. ....	95
Imagen No 7-3. Equipo utilizado en fotogrametría analítica. ....	96
Imagen No 7-4. Restitución fotogramétrica con el uso de drones y procesada mediante software. ....	96
Imagen No 7-5. Dron DJI PHANTOM 4 RTK. ....	99
Imagen No 8-1 Drones más utilizados. ....	106
Imagen No 8-2. Termografía o Cámara térmica RGB E10T para dron ...	109
Imagen No 8-3. DJI P4 Multiespectral RTK.....	110
Imagen No 8-4. Sensores para Mapeo o Cartografía en drones.....	111
Imagen No 9-1. Residencial Santa Lucía.....	112
Imagen No 9-2. Quebrada El Chagüite.....	113
Imagen No 9-4. Vértice geodésico. Fuente: Elaboración Propia. ....	115
Imagen No 9-5. Mojón usado para el vértice geodésico. ....	115
Imagen No 9-6. Equipo GPS usado para el levantamiento de los puntos de control. ....	115
Imagen No 9-7. Lonas con equipo Carlson GPS. ....	116
Imagen No 9-8. Llevando lonas a su lugar para levantamiento de puntos de control. ....	116
Imagen No 9-9. Puntos de Control Fotogramétricos (PCFs). ....	117
Imagen No 9-10. Colocación de trípode. Fuente: Elaboración Propia .....	117
Imagen No 9-11. Equipo Utilizado. Fuente: Elaboración Propia .....	117
Imagen No 9-12. Levantando punto de control con el uso del rover. Fuente: Elaboración Propia.....	118
Imagen No 9-13. Puntos de control en quebrada. ....	118
Imagen No 10-1. Logo de DJI GO 4. ....	119
Imagen No 10-2. Interfaz de Pix4Dcapture.....	119
Imagen No 10-3. Interfaz de batería en DJI GO 4. ....	120
Imagen No 10-4. Interfaz de batería en DJI GO 4. ....	121

Imagen No 10-5. Dron Phantom 4. ....	122
Imagen No 10-6. Opción de Double Grid para modelos 3D.....	123
Imagen No 10-7.Ejemplo de área de vuelo.....	124
Imagen No 10-8.Ejemplo de botón de inicio del programa Pix4D.....	124
Imagen No 10-9. Ensamble de hélices. Fuente: Elaboración Propia. ....	126
Imagen No 10-10. Control remoto con dispositivo IOS.....	127
Imagen No 10-11. Encendido de dron.....	128
Imagen No 10-12. Plan de vuelo en el lugar.....	129
Imagen No 11-1. Interfaz inicial de PIX4DMapper. ....	132
Imagen No 11-2. Interfaz inicial de PIX4DMapper. ....	133
Imagen No 11-3. Ventana de selección de imágenes.....	134
Imagen No 11-4. Importación de Imágenes. ....	135
Imagen No 11-5. Subida de Imágenes. ....	136
Imagen No 11-6. Subida de Imágenes. ....	137
Imagen No 11-7. Selección de Sistema de Coordenadas. ....	138
Imagen No 11-8. Parámetros del Sistema de Coordenadas Lambert-Sirgas 2007.....	139
Imagen No 11-9. Selección de Sistema de Coordenadas Vertical, Geoide EGM 2008. ....	140
Imagen No 11-10. Selección de Plantilla de Opciones de Procesamiento. ....	141
Imagen No 11-11. Plan de vuelo realizado.....	142
Imagen No 11-12. Configuración de parámetros del paso 1, Procesamiento Inicial.....	143
Imagen No 11-13. Inicio del paso 1, Procesamiento Inicial. ....	144
Imagen No 11-14. Procesamiento Inicial. ....	145
Imagen No 11-15. Reporte de calidad. ....	145
Imagen No 11-16. Reporte de calidad. ....	146
Imagen No 11-17. Creación de puntos de paso.....	147
Imagen No 11-18. Creación de puntos de paso.....	148
Imagen No 11-19. Creación de puntos de paso.....	149
Imagen No 11-20. Gestor GCP/MTP. ....	150

Imagen No 11-21. Importación de Puntos de Control Fotogramétricos. .	151
Imagen No 11-22. Importación de Puntos de Control Fotogramétricos. .	152
Imagen No 11-23. Georreferenciación del proyecto. ....	152
Imagen No 11-24. Visualización de Puntos de Control. ....	153
Imagen No 11-25. Ajuste de Puntos de Control. ....	154
Imagen No 11-26. Reemparejar y optimizar. ....	155
Imagen No 11-27. Parámetros para iniciar la nube puntos y malla. ....	156
Imagen No 11-28. Parámetros para iniciar la nube puntos y malla. ....	157
Imagen No 11-29. Inicio de paso 2: Nube de puntos y Malla. ....	158
Imagen No 11-30. Reporte de calidad, paso 2. ....	159
Imagen No 11-31. Carga de nube de puntos. ....	160
Imagen No 11-32. Nube de puntos. ....	161
Imagen No 11-33. Carga de malla de triángulos. ....	162
Imagen No 11-34. Parámetros de MDS, Ortomosaicos e Índices. ....	164
Imagen No 11-35. Parámetros de MDS, Ortomosaicos e Índices. ....	165
Imagen No 11-36. Inicio de paso 3, MDS, ortomosaico e índices. ....	166
Imagen No 11-37. Ortofoto generada. ....	167
Imagen No 11-38. Modelo Digital de Superficie (DSM) generado. ....	168
Imagen No. 11-39 Visualización de Ortomosaico generado por Pix4DMapper en Google Earth Pro. ....	171
Imagen No 11-40. Inserción de ortofoto a Civil 3D. ....	172
Imagen No 11-41. Inserción de ortofoto a Civil 3D. ....	173
Imagen No 11-42. Verificación de curvas de nivel. ....	174
Imagen No 11-43. Contorno de Pix4D agregado a Civil 3D. ....	174
Imagen No 11-44. División de curvas de nivel. ....	175
Imagen No 11-45. Creación de superficie de terreno. ....	175
Imagen No 11-46. Creación de superficie de terreno. ....	176
Imagen No 11-47. Añadir información a la superficie creada. ....	176
Imagen No 11-48. Añadir información a la superficie creada. ....	177
Imagen No 11-49. Superficie de terreno. ....	177
Imagen No 11-50. Trazo de polilínea. ....	178
Imagen No 11-51. Barra de herramientas de Grading Creation. ....	179

Imagen No 11-52. Creación de superficie de Taludes. ....	179
Imagen No 11-53. Selección de superficie. ....	180
Imagen No 11-54. Creación de talud. ....	180
Imagen No 11-55. Creación de talud. ....	181
Imagen No 11-56. Creación de talud. ....	181
Imagen No 11-57. Creación de talud. ....	182
Imagen No 11-58. Creación de talud. ....	182
Imagen No 11-59. Creación de talud. ....	183
Imagen No 11-60. Creación de talud. ....	183
Imagen No 11-61. Creación de Berma. ....	184
Imagen No 11-62. Creación de Berma de 4 metros de ancho. ....	184
Imagen No 11-63. Creación de Berma. ....	185
Imagen No 11-64. Creación de Berma. ....	185
Imagen No 11-65. Creación de canaleta. ....	186
Imagen No 11-66. Creación de canaleta. ....	186
Imagen No 11-67. Creación de canaleta. ....	187
Imagen No 11-68. Creación de canaleta. ....	187
Imagen No 11-69. Superficie de talud creada. ....	188
Imagen No 11-70. Superficie de taludes de diseño. ....	188
Imagen No 11-71. Bordeado de intersección de superficies. ....	189
Imagen No 11-72. Recorte de superficie de taludes. ....	189
Imagen No 11-73. Corte de superficie de talud. ....	190
Imagen No 11-74. Corte de superficie de talud. ....	190
Imagen No 11-75. Parámetros para la creación de superficie recortada. .....	191
Imagen No 11-76. Superficie de taludes recortada. ....	191
Imagen No 11-77. Colocación de ambas superficies en un mismo dibujo. .....	192
Imagen No 11-78. Creación de superficie final. ....	192
Imagen No 11-79. Creación de superficie final. ....	193
Imagen No 11-80. Selección de superficies a fusionar. ....	193
Imagen No 11-81. Superficie de diseño. ....	194

Imagen No 11-82. Cálculo de volúmenes.....	194
Imagen No 11-83. Cálculo de volúmenes.....	195
Imagen No 11-84. Generación de reporte de volúmenes de corte.....	195
Imagen No 11-85. Creación de tabla de volúmenes de corte.....	196

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1. Clasificación de las cárcavas según la profundidad y el área de la cuenca de contribución .....	13
Tabla 2-2. Tipos de cárcavas según profundidad y anchura. ....	15
Tabla 2-3. Tipos de cárcavas según las pendientes longitudinales. ....	16
Tabla No 4-1. Elipsoides de referencia y sus zonas de uso. ....	51
Tabla No 4-2. Datums más utilizados. ....	57
Tabla No 5-1. Principales estaciones y sus excéntricas de la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador (SIRGAS-ES2007). ....	77
Tabla 11-1 Comparación de valores establecidos por los lineamientos del software Pix4DMapper y los valores resultantes del proyecto. ....	170

## **INTRODUCCIÓN**

Las ventajas de utilizar drones en el estudio de cárcavas son numerosas gracias a su versatilidad. Por ejemplo, eliminan la necesidad de acceder personalmente a lugares peligrosos o de difícil acceso para realizar mediciones. Además, permiten obtener resultados de alta calidad de manera segura, rentable y rápida.

Esto es especialmente beneficioso en las áreas propensas a cárcavas y deslizamientos de tierra debido a su topografía compleja.

La utilización de drones en este proceso permite obtener información topográfica detallada y precisa, lo que facilita la identificación de áreas de riesgo y la toma de decisiones para su mitigación. Además, al eliminar la necesidad de acceder físicamente a las áreas de estudio, se reducen los riesgos para los profesionales involucrados y se optimiza el tiempo empleado en la recopilación de datos.

Para llevar a cabo este estudio, se utilizan drones equipados con sistemas de posicionamiento global (GPS) y sensores de alta resolución. Estos dispositivos capturan imágenes aéreas y recopilan datos topográficos que se procesan utilizando software especializado. La información obtenida se utiliza para crear modelos digitales del terreno y evaluar posibles movimientos de suelos.

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **1.1 Antecedentes**

El fenómeno de las cárcavas en el país no es nuevo. El problema se agudizó en los últimos años, debido a la expansión urbanística, a los daños en el sistema de drenajes de la ciudad y a las condiciones volcánicas del suelo.

Esta densa población se ha asentado en zonas, en algunos casos, no aptas para el desarrollo urbanístico, lo que ha repercutido en la falta de capacidad de absorción del suelo durante las precipitaciones. Además, la insuficiencia de las alcantarillas y de los cauces de ríos y quebradas ha generado que las aguas lluvias se desbordan sobre las carreteras, terrenos aledaños y laderas, generando problemas de erosión y daños en la red vial.

El suelo del área metropolitana está formado por ceniza volcánica joven o blanca, no es extraño que se generen grandes erosiones y, por ende, aparecen enormes barrancos.

Desde luego, el fenómeno se agudiza por la pendiente descendente en que se encuentra la zona metropolitana del país, desde El Picacho del volcán de San Salvador hasta el lago de Ilopango.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Las cárcavas representan un problema que exige reacción inmediata. En un estudio en el que se destaca que la causa más significativa de la formación de cárcavas es el fenómeno de la erosión.

La formación de cárcavas en El Salvador, como producto de la erosión por la deforestación y el desgaste de la tierra resultantes de las malas políticas del aparato de la construcción, han puesto sobre el lienzo del espectador salvadoreño un panorama de depresiones que amenaza con engullir a las poblaciones circundantes.

Cada vez son más las personas cuya necesidad de establecer una vivienda y formar asentamientos humanos las orienta a la tala indiscriminada de árboles. También, cada vez son más las empresas constructoras que se suman a esta tarea, con el fin de proporcionar vivienda digna a todos aquellos capaces de acceder a ella. Estas viviendas, a menudo son erigidas sobre terrenos rellenados y compactados, que antes fueron viejos cauces de ríos o pozas secas proclives, sin duda, a ser futuras cárcavas si no reciben el tratamiento adecuado. A esto se debe agregar las construcciones de aquellos que, obligados por la pobreza, la guerra, la desintegración familiar y la migración, entre otros fenómenos, se han sumado a un desorden habitacional que refleja la insuficiencia de los gobiernos para solventar ese derecho a la vivienda digna.

Las familias pobres deben asentarse en zonas alejadas, carentes de servicios básicos y en viviendas precarias. El problema se agrava si como ocurre en El Salvador no se cuenta con una política de vivienda ni con normativas jurídicas específicas que enfrenten el problema habitacional desde un enfoque de derechos humanos.

La población de nuestro país vive día a día las consecuencias de una planificación urbana deficiente y una política de aprovechamiento agresivo de los pocos recursos naturales que tenemos. Cada invierno, la población capitalina sufre los estragos de vivir en un medio cuyo entorno ambiental es incapaz de mantener un equilibrio de subsistencia debido al abuso mediante la deforestación, entre otros factores. De tal forma, se hace indispensable determinar a priori las causas de la formación de cárcavas para tener insumos para el diseño de políticas públicas y ambientales que consideren la relación de los habitantes y su entorno a largo plazo.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Utilizar drones en levantamiento topográfico para el análisis de cárcava en residencial santa lucía, municipio de Ilopango.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un vuelo fotogramétrico, para obtener Modelos Digitales de Terreno y su representación gráfica para realizar obras de mitigación.

Obtener curvas de nivel y calcular perfiles longitudinales y transversales para cálculo de volumen de corte y relleno.

- Crear un plan de vuelo conveniente para el dron, donde se contemple la cárcava que desea analizar en su totalidad
- Realizar el vuelo fotogramétrico de la zona en estudio tomando en cuenta los parámetros y especificaciones mínimas para la obtención de datos.

#### 1.4 Alcances

- Se utilizarán distintos sistemas y procedimientos tanto en campo como en oficina para llevar a cabo el estudio de la cárcava en el área de la Residencial Santa Lucía, ubicada en el municipio de Ilopango, en el departamento de San Salvador. Estas labores incluirán la realización de un levantamiento fotogramétrico, que consistirá en la recolección de datos relacionados con la topografía de la zona. Estos datos serán posteriormente procesados utilizando programas especializados en oficina.
- Se creará un plan de vuelo para el dron teniendo en cuenta la exactitud de la forma del terreno, la ubicación ideal de los puntos de referencia, un área adicional suficiente para obtener imágenes de alta calidad, las condiciones climáticas actuales y las reglas locales, entre otros factores
- Los productos resultantes del procesamiento serán insumos cartográficos y topográficos en digital y en físico, además de fotografías Aéreas (Ortofoto), modelos digitales del terreno, curvas de nivel del terreno, perímetros y áreas.
- Se realizará un modelo de corte de superficie de taludes y bermas según diseño previo aplicado a mitigación de cárcavas en el lugar de estudio.

## 1.5 Limitaciones

- Al momento de realizar el vuelo y por ser una zona restringida por la cercanía con el Aeropuerto Internacional de Ilopingo, hubo fallas y restricciones en el sistema de vuelo al punto de dejar inutilizable una de las baterías del dron.
- El procesamiento de los datos obtenidos por medio de un levantamiento con Dron necesita una computadora dedicada (Procesador i9 o similar, RAM 16 Gb, Tarjeta de video), por lo cual el procesamiento de los datos del levantamiento puede tardar horas y hasta días en realizarlos.
- La vegetación en algunas zonas donde se voló el dron era abundante, esto obstruye la visibilidad hacia algunos detalles en las fotografías aéreas haciendo que las curvas de nivel no sean del todo precisas acordes a la realidad.

## 1.6 Justificación

El levantamiento de datos con drones y su posterior procesamiento ofrece varias ventajas significativas y una mayor importancia en comparación con la toma de datos tradicional como lo es la topografía en terrenos difíciles. Algunas de estas ventajas son las siguientes:

**Acceso a terrenos difíciles:** Los drones pueden fácilmente acceder a áreas de difícil acceso, como terrenos montañosos, selvas densas o áreas inaccesibles debido a desastres naturales. Esto permite obtener datos precisos de áreas que de otro modo serían difíciles o imposibles de alcanzar.

**Mayor velocidad y eficiencia:** Los drones pueden cubrir grandes extensiones de terreno en menos tiempo, lo que resulta en un levantamiento de datos más rápido y eficiente en comparación con los métodos tradicionales. Esto ahorra tiempo y recursos, al tiempo que aumenta la productividad.

**Mayor precisión y detalle:** Los drones están equipados con tecnología avanzada como cámaras de alta resolución, sensores LIDAR y GPS de alta precisión, lo que permite obtener datos altamente precisos y detallados. Esto es especialmente útil en proyectos que requieren un alto nivel de precisión, como la construcción de infraestructuras o mapeo de cambios en el terreno.

**Seguridad del personal:** Al utilizar drones para el levantamiento de datos, se reduce la necesidad de que el personal humano se exponga a situaciones peligrosas o difíciles, como trabajar en alturas o entornos

inestables. Esto mejora la seguridad y minimiza los riesgos para el personal en terrenos peligrosos.

El levantamiento de datos con drones y su procesamiento en terrenos difíciles ofrece una serie de ventajas, como acceso a áreas inaccesibles, mayor velocidad y eficiencia, mayor precisión y detalle, seguridad del personal y menor impacto ambiental. Estas ventajas hacen que el uso de drones sea cada vez más importante en una variedad de industrias, incluyendo ingeniería civil, agricultura, gestión de desastres, inspecciones de infraestructuras y mapeo topográfico.

## **CAPÍTULO II: GENERALIDADES DE UNA CÁRCAVA**

### **2.1 Definición de cárcavas**

#### **2.1.2 Definición, origen y formación de cárcavas**

Las cárcavas son una de las expresiones más evidentes de los procesos erosivos, sin embargo, son también de las geoformas menos estudiadas de modo sistemático. Son zanjas que se forman en el suelo debido a diferentes causas, las cuales dañan al medio ambiente. Radulovich (1997) dice que son zanjas naturales causadas por el paso del agua, que socava el suelo y lo arrastra. Rogers (2002) explica que las cárcavas son abarrancamientos formados en los materiales blandos por el agua de arroyos que, cuando falta una cobertura vegetal suficiente, ataca las pendientes excavando largos surcos de bordes vivos Conacher, A., & Sala (1998) señalan que una cárcava es un conjunto de zanjas o conjuntos de canales que se desarrollan sobre capas de materiales no consolidados de la superficie terrestre. En la terminología internacional se les conoce como badlands. Pueden medir desde aproximadamente 30 centímetros hasta varias decenas de metros de anchura. Al principio son surcos ramificados donde corre el agua, que progresivamente van creciendo de forma vertical, longitudinal y lateral hasta convertirse en torrentes.

## **2.2 Formación de cárcavas**

Las cárcavas o badlands aparecen con frecuencia en el relieve arcilloso, pues la arcilla es una roca impermeable pero blanda. Martínez, Rubio, Oropeza, & Palacios (2009) indican que, siendo producto de la erosión, las cárcavas generalmente siguen la pendiente máxima del terreno y constituyen un cauce natural en donde se concentra y corre el agua proveniente de las lluvias, arrastrando gran cantidad de partículas del suelo. Los autores continúan diciendo que se inician cuando el suelo ha sido removido por el flujo superficial formando pequeños surcos, considerado como zanjeado incipiente; y a medida que aumenta el escurrimiento se forman pequeños canalillos que van creciendo en ancho y en profundidad hasta producir secciones transversales de diferentes formas, que se agrandan con la presencia de las avenidas máximas. Consecuentemente, las cárcavas se originan por la concentración de los escurrimientos superficiales en determinados puntos críticos del terreno.

### **2.3 Consecuencias de cárcavas en el medio**

La degradación de las funciones de los ecosistemas, un mayor riesgo de deslizamiento e inundación, pérdidas considerables de biodiversidad, daños a la infraestructura urbana y, en casos severos, el desplazamiento de los habitantes locales.

Además de las consecuencias mencionadas, la erosión del suelo también puede tener otros efectos negativos como:

Disminución de la calidad del agua: Puede llevar a la sedimentación de los cuerpos de agua cercanos, lo que puede afectar la calidad del agua.

Cambio en los patrones climáticos: Puede alterar los patrones de lluvia y la infiltración del agua en el suelo. Esto puede contribuir a la sequía y a la desertificación en áreas afectadas.

Es importante implementar medidas de conservación del suelo, como la reforestación, la construcción de terrazas y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, para prevenir y mitigar los efectos de la erosión del suelo.

## 2.4 Clasificación de cárcavas

### 2.4.1 Según su origen y características

Las cárcavas se pueden clasificar en diferentes categorías. A continuación, se presentan algunas clasificaciones comunes:

- **Cárcavas naturales:** Son aquellas que se forman de manera natural debido a la erosión causada por el agua de lluvia, los ríos u otros procesos naturales. Estas cárcavas pueden ser temporales o permanentes, dependiendo de las condiciones climáticas y geológicas.
- **Cárcavas antropogénicas:** Son aquellas que se forman como resultado de la actividad humana. Esto puede incluir la construcción de carreteras, la urbanización, la deforestación, la minería o la agricultura intensiva. Las cárcavas antropogénicas suelen ser más comunes en áreas con pendientes pronunciadas y suelos poco estables.
- **Cárcavas en áreas urbanas:** Son cárcavas que se forman en áreas urbanas debido a la erosión causada por el flujo de agua, la falta de drenaje adecuado o la construcción inadecuada. Estas cárcavas pueden afectar la infraestructura urbana, como edificios, calles y sistemas de alcantarillado.
- **Cárcavas en áreas rurales:** Son cárcavas que se forman en áreas rurales debido a la erosión causada por la agricultura intensiva, la deforestación o el pastoreo excesivo.

### 2.4.2 Según su profundidad

Es el criterio más comúnmente utilizado. Sin embargo, las clases establecidas basadas únicamente en este parámetro pueden no ser completamente convincentes. Por lo tanto, es necesario agregar otros tipos de clasificación. En la tabla siguiente se puede observar la propuesta de clasificación presentada, que además de considerar la profundidad, incorpora el área de la cuenca de contribución como un segundo criterio.

Profundidad (m)	Área de la cuenca (ha)	Tipo de cárcava
< 2.5	< 10	Pequeña
2.5 - 4.5	10 a 50	Mediana
< 4.5	>50	Grande

*Tabla 2-1. Clasificación de las cárcavas según la profundidad y el área de la cuenca de contribución*

*Fuente: Hacia un sistema de clasificación de cárcavas, Jesús E. Santiago*

### **2.4.3 Por su profundidad y ancho**

El problema con esta clasificación radica en que no se debe considerar únicamente la profundidad de las cárcavas, sino también su dimensión en planta. Es decir, es importante observar su ancho y área de cobertura. Por ejemplo, una cárcava puede tener una profundidad de 3 metros, pero solo tener un ancho de 2 metros, lo que la clasificaría como mediana o pequeña. Además, el tamaño de una cárcava o sistema de cárcavas no necesariamente está relacionado con el tamaño de su cuenca de contribución. De hecho, a medida que un sistema de cárcavas se extiende, su cuenca de contribución puede volverse menos extensa. Morfológicamente, una cárcava de 2 metros de profundidad puede ser considerada pequeña, pero desde el punto de vista de los riesgos para las comunidades, puede representar una seria amenaza. Es importante considerar el área de la cuenca de contribución del barranco para estimar el caudal máximo que fluye por su cabecera, lo que también es útil para los ingenieros al diseñar medidas de control de la erosión, como canales. Otras variables que se pueden combinar con las dimensiones verticales son la superficie cubierta por el barranco y el volumen de material desplazado dentro del sistema de cárcavas.

Tipos de cárcavas	Profundidad (m)	Anchura (m)
Pequeñas	< 1.5	< 1
Pequeñas a medianas	1.51 – 3	1.1 – 3
Medianas	3.1 – 6	3.1 – 10
Grandes	6.1 – 12	10.1 – 25
Muy grandes	>12	>25

*Tabla 2-2. Tipos de cárcavas según profundidad y anchura.*

*Fuente: Hacia un sistema de clasificación de cárcavas, Jesús E. Santiago*

#### **2.4.4 Por su pendiente**

En los perfiles transversales, al igual que en las cárcavas, se puede observar que hay variaciones a lo largo de su curso. Por lo general, las cárcavas tienen una forma cóncava hacia arriba, con pendientes pronunciadas en la parte superior y más suave en la parte inferior. Debemos tener en cuenta que estas observaciones son muy importantes, ya que la longitud y la inclinación del canal influyen en la velocidad y la fuerza del agua que se desplaza. A mayor velocidad, mayor será el poder de erosionar el terreno.

Tipos de cárcavas	Pendientes (%)
Poco inclinadas	0 - 4
Poco a moderadamente inclinadas	4.1 -16
Moderadamente inclinadas	16.1 -30
Inclinadas	30.1 - 60
Muy inclinadas	> 60

*Tabla 2-3. Tipos de cárcavas según las pendientes longitudinales.*

*Fuente: Hacia un sistema de clasificación de cárcavas, Jesús E. Santiago*

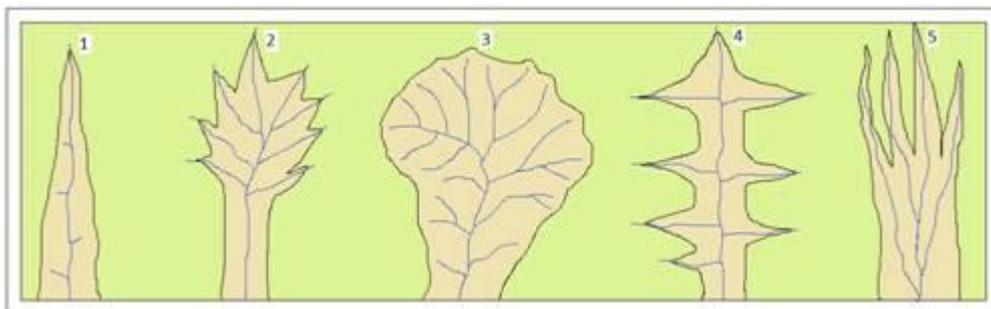
#### 2.4.5 Según la forma en planta

Las cárcavas o sistemas de cárcavas presentan una amplia variedad de formas cuando se observan en planta. Una clasificación práctica propuesta utiliza términos similares a los utilizados en la clasificación de cuencas de drenaje, que se encuentran comúnmente en la geomorfología clásica.

- **Cárcava lineal:** Es una cárcava alargada, con una cabecera estrecha y pocos tributarios que desembocan en ella.
- **Cárcava dendrítica:** Presenta múltiples tributarios ramificados, con una cabecera en forma de semicírculo. Sigue el curso de un drenaje natural.
- **Cárcava bulbosa:** Tiene una anchura mayor en las cabeceras, con pequeños tributarios en todos los flancos. Puede ser más estrecha

en la parte inferior. Su forma se asemeja a la silueta de un árbol de palma.

- 
- **Cárcava enrejada:** Se origina en zonas planas y tiene tributarios que desembocan en ángulos cercanos a los 90°.
- **Cárcava paralela:** Consiste en varias cárcavas bastante alargadas que desembocan en una sola. Son más comunes en pendientes pronunciadas. Su forma se asemeja a un guante de hule.
- **Cárcava compuesta:** Combina dos o más de las formas mencionadas anteriormente.



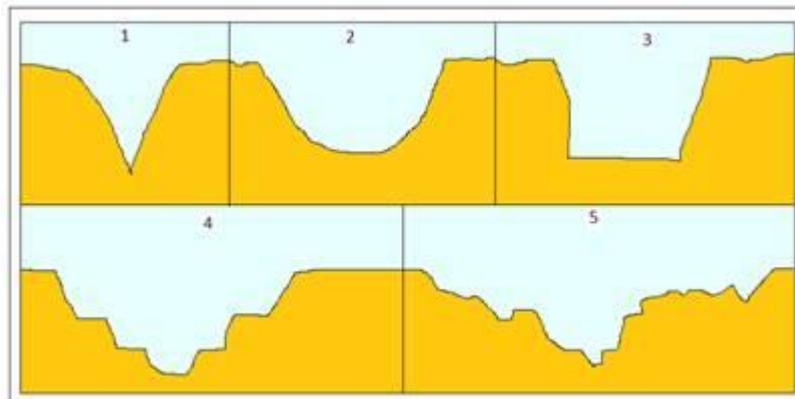
*Imagen 2-1. Tipos de cárcavas según la forma en planta: 1) Lineal, 2) Dendrítica, 3) Bulbosa, 4) enrejada y 5) paralela.*

*Fuente: Hacia un sistema de clasificación de cárcavas, Jesús E. Santiago*

#### 2.4.6 Por su perfil

Las cárcavas pueden presentar diferentes perfiles según su etapa de desarrollo y las condiciones del terreno. Estos perfiles nos brindan información sobre la forma y características de las cárcavas. A continuación, se describen algunos perfiles comunes:

- **Perfil en "V" o en garganta:** Este perfil se encuentra en las cárcavas incipientes y más pequeñas. Tiene una forma puntiaguda y suele crecer en tres dimensiones: largo, ancho y profundidad.
- **Perfil cóncavo o en "U":** Este perfil es la fase posterior al perfil en "V". En este caso, el crecimiento vertical se detiene y se enfatiza el crecimiento lateral de la cárcava.
- **Perfil cuadrado o en cajón:** En este perfil, la escorrentía erosiona más los materiales de las paredes de la cárcava que los del lecho, lo que resulta en una forma más cuadrada.
- **Perfil escalonado:** Este perfil parece una escalera que desciende hacia el fondo de la cárcava y luego vuelve a subir hacia el otro lado. Se forma debido a la re-excavación del lecho en diferentes ocasiones, creando un relieve escalonado.
- **Perfil irregular:** Este perfil tiene una forma general cóncava hacia arriba, pero presenta múltiples quiebres en las vertientes. Esto se debe a la presencia de bloques desprendidos en los bordes y montículos afilados en el medio de dos o más canales que se unen, entre otras formas menores.



*Imagen 2-2. Cinco tipos de cárcavas según los perfiles transversales: 1) En "V" o en garganta, 2) cóncava o en "U", 3) cuadrada o en cajón, 4) escalonada, y 5) irregular.*

*Fuente: Hacia un sistema de clasificación de cárcavas, Jesús E. Santiago*

#### **2.4.7 Según actividad erosiva**

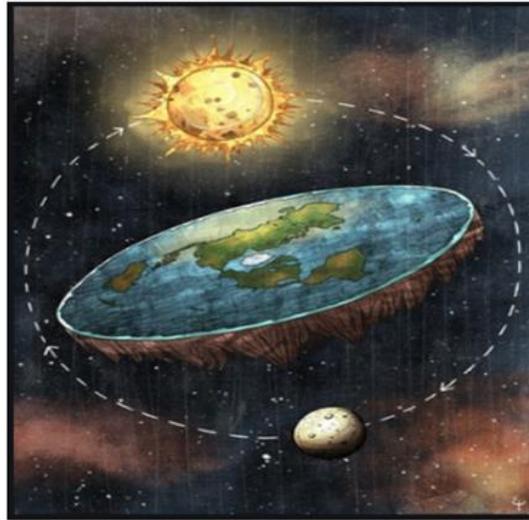
El grado de desgaste o pérdida de materiales que presenta una cárcava en el momento de su estudio se puede clasificar en diferentes tipos.

- **Cárcavas activas:** Estas cárcavas muestran un alto grado de crecimiento, que puede medirse en varios centímetros o incluso metros durante un mismo período de lluvias. Por lo general, están asociadas a áreas con poca vegetación o que han sido alteradas de manera artificial.
- **Cárcavas poco activas:** Aunque presentan cierta actividad, el crecimiento es menor en comparación con las cárcavas activas. Esto puede deberse a la presencia de cubiertas parciales de vegetación natural o a la implementación de medidas de control artificial.

- **Cárcavas incipientes:** Estas son las cárcavas más pequeñas, que están en proceso de transición desde surcos hasta cárcavas más grandes. Suelen ubicarse en las cabeceras de las cárcavas de mayor tamaño.
- **Cárcavas estables:** En estas cárcavas, el crecimiento es imperceptible o casi nulo debido a la efectiva protección proporcionada por la vegetación o a la implementación de medidas de control artificiales.

### CAPÍTULO III: FUNDAMENTOS DE GEODESIA

Tales de Mileto (624 aC - 547 aC) nacido en Mileto, Turquía. Tales de Mileto concebía una TIERRA PLANA con forma de DISCO con bordes que además flotaba en el agua, sustancia primaria de todo lo conocido. Esta visión de mundo era ampliamente conocida en el mundo egipcio, es muy probable que la heredara de ahí en mayor medida que de los babilonios.



*Imagen No 3-1. Teoría de Tales de Mileto de una tierra plana.  
Fuente: Módulo N°1 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería  
civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

Para los hindúes, la tierra era plana también, pero descansaba sobre cuatro elefantes, que a la vez descansaban sobre una tortuga que nadaba en el agua, otros que se desplazaban en el espacio.



*Imagen No 3-2. Teoría de los Hindúes.*

*Fuente: Módulo N°1 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

Mientras que, para los chinos y egipcios, la tierra era plana, rectangular y reposaba directamente sobre las aguas, estando la bóveda celeste, apoyada sobre cuatro montañas colocadas en las esquinas del mundo.



*Imagen No 3-3. Teoría de los Chinos y Egipcios.*

*Fuente: Módulo N°1 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

Durante largo tiempo, la gente creyó que la tierra era plana y que, si una persona viajaba en línea recta, hasta llegar al final, se caería por el borde. La gente quedó atrapada en un mundo que se extendía sólo hasta lo que podían ver.

Por su parte, Anaximandro de Mileto. Filósofo griego, materialista, espontáneamente dialéctico, discípulo de Tales. Según la teoría cosmológica de Anaximandro, en el centro del universo se encuentra la Tierra, que tiene la forma de cilindro achatado. Alrededor de la Tierra giran tres círculos celestes: el del Sol, el de la Luna y el de las estrellas. Anaximandro fue el primero en la historia que expuso la idea de evolución: el hombre, al igual que los otros seres vivos, procede de un pez.

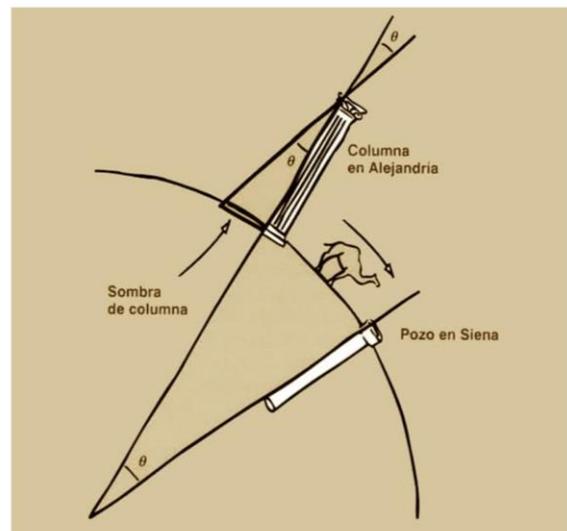


*Imagen No 3-4. Teoría de Anaximandro de Mileto.*

*Fuente: Módulo N°1 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

En torno al 340 a.C. Aristóteles afirma que la Tierra es redonda, no plana, y da tres argumentos a favor de esta tesis: En los eclipses lunares siempre se observa que la sombra de la Tierra sobre la Luna tiene forma de arco de circunferencia.

Eratóstenes 284 – 192 a.C Es conocido principalmente por ser la primera persona en calcular la circunferencia de la Tierra, lo que hizo al comparar las altitudes del Sol del mediodía en dos lugares separados por una distancia Norte-Sur. Su cálculo fue notablemente preciso.



*Imagen No 3-5. Teoría de Eratóstenes.*

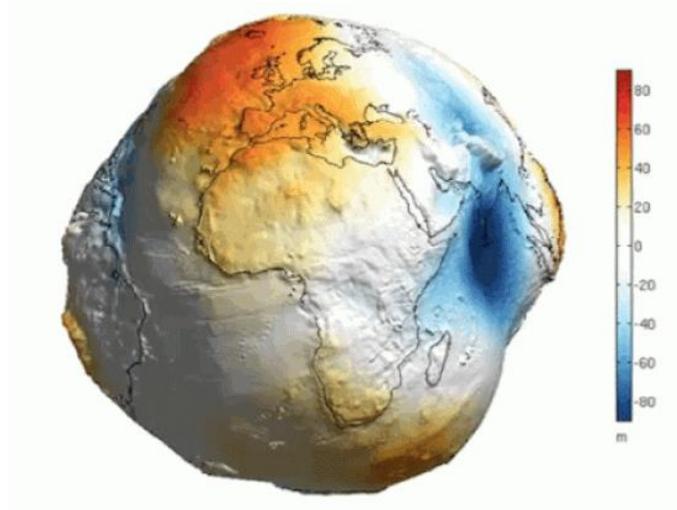
*Fuente: Módulo N°1 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

El concepto de Tierra esférica data de la filosofía griega antigua de alrededor del siglo VI a. C. pero permaneció como materia de especulación filosófica hasta el siglo III a. C., cuando Eratóstenes estableció la esfericidad de la Tierra como un dato físico. El paradigma

helénico fue gradualmente adoptado en el viejo mundo en la Antigüedad y la Edad Media. Una demostración práctica de la esfericidad de la Tierra fue llevada a cabo por Fernando de Magallanes y Juan Sebastián Elcano en su expedición de circunnavegación del mundo (1519–1523).

Cuando la tierra gira (movimiento de rotación) lo hace sobre un eje, en este caso ese eje es vertical y va de polo a polo. Ahora, debido a este giro se produce una mayor fuerza centrífuga en las zonas más alejadas a los polos, que en este caso sería en el Ecuador. Entonces, como esa fuerza es mayor en el ecuador que en los polos, la Tierra se fue, y se está, achatando, pasando de ser esférica a una forma geoide.

De esta manera aprendemos que dicho término es fruto de la suma de dos partes claramente diferenciadas como son la palabra geo que es sinónimo de “tierra” y el vocablo “eidos” que puede traducirse a su vez como “aspecto o apariencia visual”. Un geoide, por lo tanto, es un cuerpo de formato casi esférico que evidencia un leve achatamiento en sus extremos. Este aplanamiento polar con su consecuente ensanchamiento ecuatorial se debe a los efectos de la gravitación y de la fuerza centrífuga que se genera con el movimiento de rotación sobre su eje.



*Imagen No 3-6. Forma real de la Tierra debido a la fuerza de gravedad.*

*Fuente: <https://www.catalunyapress.es/texto-diario/mostrar/1094551/asi-verdadera-forma-planeta-tierra>*

### **3.1 Sistemas de coordenadas**

Un sistema de coordenadas es un marco para definir las ubicaciones relativas de los objetos en un área determinada; por ejemplo, un área en la superficie de la tierra o la superficie de la tierra en su totalidad. Se pueden mencionar las siguientes:

- **Sistema de coordenadas geográficas**

Un sistema de coordenadas geográficas es aquél que utiliza una superficie esférica tridimensional para determinar ubicaciones en la tierra. Se puede hacer referencia a cualquier ubicación de la tierra mediante un punto con coordenadas de latitud y longitud basadas en unidades angulares de medida.

- **Sistema de coordenadas proyectadas**

Un sistema de coordenadas proyectadas es una representación bidimensional plana de la tierra. Utilice coordenadas rectilíneas (cartesianas) basadas en unidades lineales de medida. Se basa en un modelo esférico (o esferoidal) de la tierra y sus coordenadas se relacionan con coordenadas geográficas mediante una transformación de proyección.

### 3.2 Sistema de coordenadas geográficas

Es un sistema que referencia que permite ubicar cualquier punto de la superficie terrestre y que utiliza para ello dos coordenadas angulares, LATITUD (norte o sur) y LONGITUD (este u oeste), y una elevación sobre un elipsoide, para determinar los ángulos laterales de la superficie terrestre con respecto al centro de la Tierra y alineadas con su eje de rotación. De acuerdo a la posición geográfica de nuestro país, tomando como referencia el paralelo de origen o sea el Ecuador la Latitud es Norte, y de igual manera tomando como referencia el Meridiano de Origen o sea Greenwich la Longitud es Oeste.

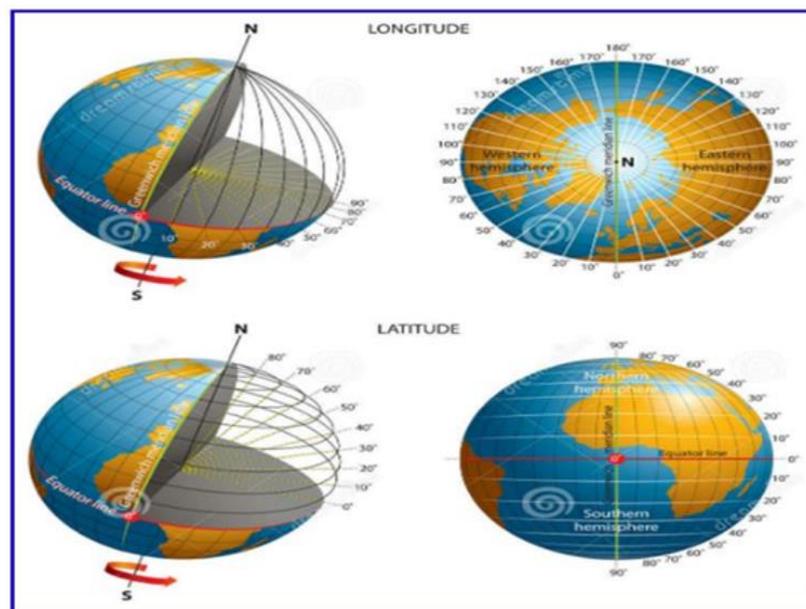


Imagen No 3-7. Paralelos y Meridianos

Fuente: Módulo N°2 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.

Los meridianos y paralelos son conceptos geográficos que consisten en líneas imaginarias que se utilizan para orientarse en la superficie de un planeta, como por ejemplo la Tierra. Los meridianos y los paralelos forman el sistema de coordenadas geográficas basado en latitud y longitud. La latitud determina la posición con respecto al plano ecuatorial, dividiendo el mundo entre norte y sur. La longitud indica la posición con respecto al meridiano de referencia (usualmente el Meridiano de Greenwich), dividiendo entre este y oeste.

Los paralelos son unas líneas imaginarias circulares que se utilizan en las coordenadas geográficas para determinar la latitud de un lugar, es decir, qué tan lejos se encuentra ese punto del ecuador. La latitud va de  $0^{\circ}$  (ecuador) a  $90^{\circ}$  (polos) y puede ser Norte o Sur. Los paralelos van disminuyendo su circunferencia desde el ecuador a los polos y en éstos se reducen a un punto. De todos los paralelos, el plano que lo incluye (llamado plano ecuatorial) es el único que pasa por el centro del planeta. El ecuador se toma como referencia u origen para expresar la latitud de un punto cualquiera de los hemisferios, por lo cual se le conoce también como paralelo cero ( $0^{\circ}$ ).

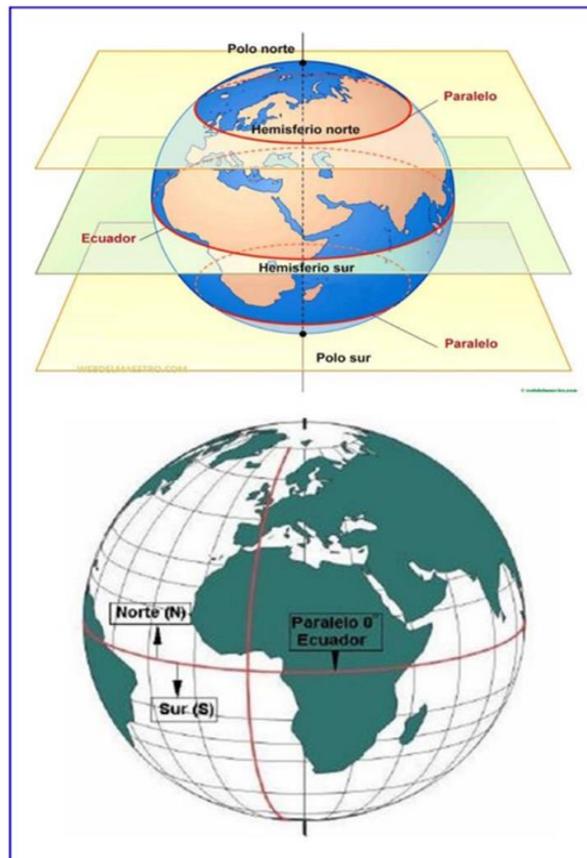


Imagen No 3-8. Paralelos

Fuente: Módulo N°2 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.

Por otra parte, los meridianos son unas líneas imaginarias usadas en las coordenadas geográficas. Son semicircunferencias que pasan por los dos polos. Se utilizan para determinar la longitud de un punto de la Tierra. Hay 60 meridianos principales (180 al oeste y 180 al este del primer meridiano o meridiano de Greenwich). El meridiano de Greenwich, también conocido como meridiano cero, meridiano base o primer meridiano, es el meridiano a partir del cual se miden las longitudes.

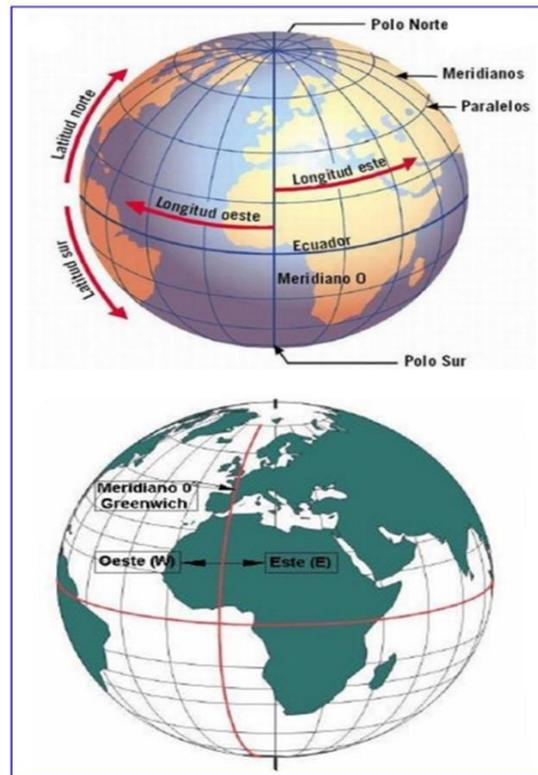


Imagen No 3-9. Meridianos

Fuente: Módulo N°2 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.

### 3.3 Sistema de coordenadas cartesianas

El sistema de coordenadas cartesianas es aquel creado para representar la superficie terrestre en un plano bidimensional. El proceso por el cual se transforma la superficie terrestre de una forma esférica a una forma plana se denomina proyección cartográfica, estas proyecciones pueden ser de tipo cónica, cilíndrica, plana o polar. (Wolf-Ghilani, 11a Edición)



Imagen No 3-10. *Tipos de Proyecciones Cartográficas.*  
Fuente: <https://sites.google.com/site/sigarcgis/proyecciones-cartograficas>

### 3.4 Tipos de proyecciones cartográficas

**Proyección cilíndrica:** Es una proyección cartográfica que usa un cilindro tangente. Las proyecciones cilíndricas se obtienen al proyectar la superficie esférica sobre un cilindro secante o tangente a la esfera.

En la proyección cilíndrica, el mapa resultante presenta una red de paralelos y meridianos perpendiculares. La deformación de la escala es creciente al alejarse de la línea de tangencia, el Ecuador, donde se conserva la escala. A pesar de esta deformación, el hecho de que se mantenga la perpendicularidad entre meridianos y paralelos conduce a una representación sencilla y útil en diversas situaciones como la navegación.

La más famosa es una proyección de Robinson modificada conocida por proyección de Mercator que revolucionó la cartografía. En ella, una recta no es (salvo cuando coincide con un meridiano o con el ecuador) la distancia más corta entre dos puntos, pero tiene la gran ventaja, para el navegante, que el ángulo con el norte es constante. Una desventaja de esta proyección, y en general de todas las cilíndricas, es la gran distorsión de la escala en zonas de latitud alta (de los 60 a los 90 grados, tanto al norte como al sur del Ecuador).

### Características

- La proyección resultante es triangular.
- Meridianos y paralelos se cortan perpendicularmente.
- Los paralelos se separan más a medida que aumenta la latitud (hay mayor distorsión en latitudes altas).
- Los meridianos son equidistantes entre sí.



Imagen No 3-11. Proyección cilíndrica.

Fuente: <https://educahistoria.com/que-son-las-proyecciones-de-mapa/>

**Proyección cónica:** Es la proyección cartográfica que representan mapas elaborados mediante proyecciones cilíndricas. Es una proyección tangente, que toca una línea con otra, proyectando los elementos de la superficie esférica terrestre sobre una superficie geométrica (cono).

La proyección cónica cartográfica se obtiene proyectando los elementos de la superficie esférica terrestre sobre una superficie cónica tangente o secante a la esfera, tomando el vértice en el eje que une los dos polos.

En la proyección cónica los meridianos se transforman en líneas rectas que parten del polo y los paralelos en circunferencias concéntricas con centro en él. El mapa resultante al extender el cono en un plano es un sector circular mayor o menor que un semicírculo. El paralelo o paralelos de contacto entre el cono y la esfera se denominan paralelos de referencia y sobre él la escala es la misma que sobre el globo original. Las deformaciones aumentan a medida que se aleja del paralelo de referencia. Cuando los paralelos mantienen las mismas distancias entre sí son equidistantes.

La forma y área de la superficie se conservan iguales en las latitudes medias. La imagen proyectada en la superficie cónica se "despliega", resultando un dibujo plano, de fácil reproducción en una hoja de papel. En esta proyección se origina una distorsión asimétrica que afecta, en gran medida, a las zonas polares, pero ofrece aceptable precisión en las zonas del hemisferio donde el cono de proyección es tangente.

Características:

- Los meridianos son líneas rectas que convergen en un punto polar.
- Los paralelos son arcos de círculo concéntricos, con centro en uno de los polos.
- No se puede presentar el globo completo solamente uno de sus hemisferios.

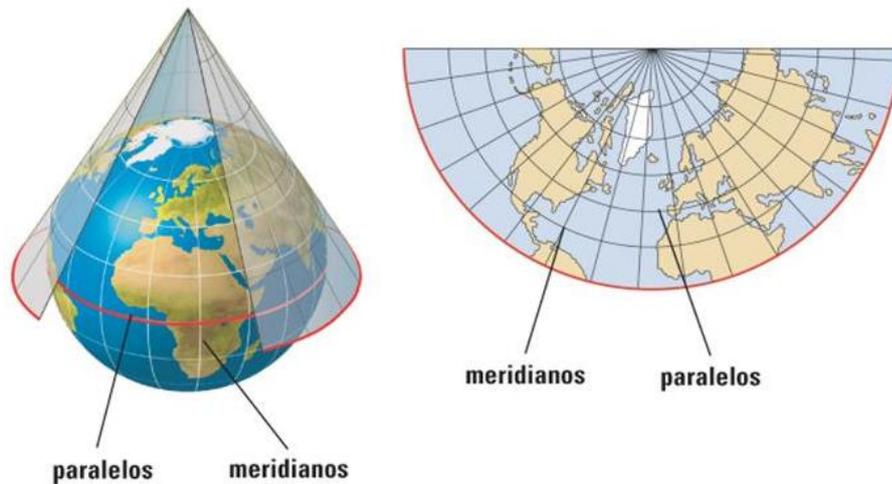


Imagen No 3-12. *Proyección Cónica*

Fuente: <https://blogdesecundaria.wordpress.com/2015/10/07/proyecciones-cartograficas/>

**Proyección polar (azimutal):** Se obtiene al proyectar el globo terráqueo sobre una hoja de papel que está en contacto con la superficie de dicho globo en un solo punto. Aunque puede utilizarse para representar cualquier parte de la superficie terrestre, por lo general se utiliza para hacer mapas de regiones polares.

Características:

- Muestra la verdadera dirección entre dos puntos del mapa, lo que hace muy útil para la navegación, especialmente aérea.
- No puede representarse el globo completo, sino únicamente la mitad.

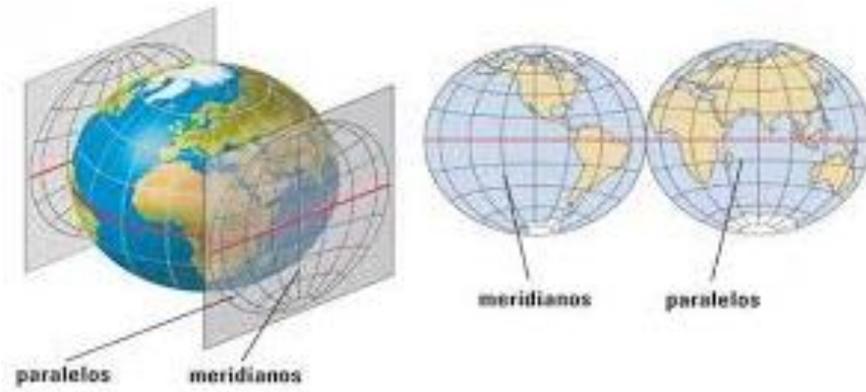
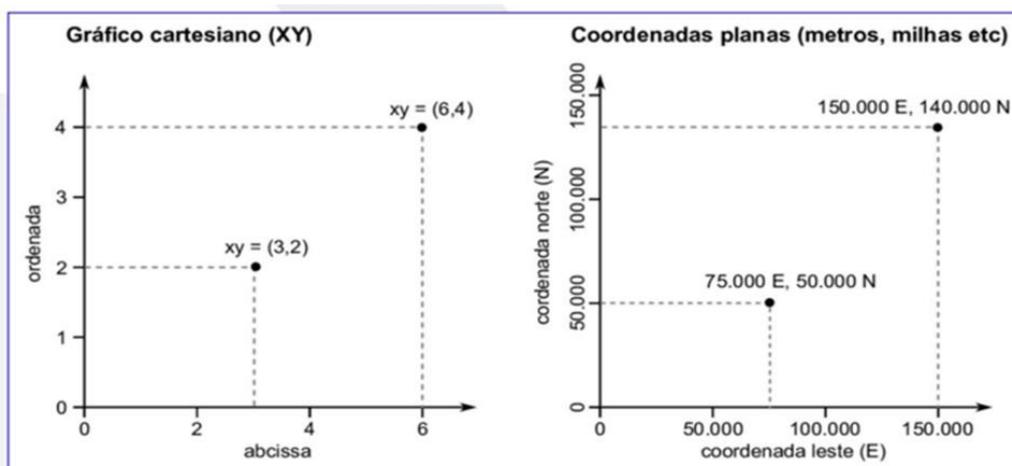


Imagen No 3-13. *Proyección polar o acimutal.*  
Fuente: <https://blogdesecundaria.wordpress.com/2015/10/07/proyecciones-cartograficas/>

### 3.5 Tipos de coordenadas

El Sistema de Coordenadas Planas es un Sistema de Coordenadas Bidimensional resultante de una Proyección Cartográfica. Las coordenadas se presentan como (X, Y) o (E, N) y también son denominadas coordenadas proyectadas, y estas resultan de proyectar la superficie del elipsoide sobre un plano.



*Imagen No 3-14. Sistema de Coordenadas Planas*

*Fuente: Módulo N°3 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

Coordenadas planas son coordenadas planas u horizontales referidas a un Datum local y un Elipsoide asociado y se expresan en Este (X) y Norte (Y); y de acuerdo a la Proyección Cartográfica adoptada de cada país, estas pueden ser: Cónicas Lambert (asociadas al Datum de Referencia) o UTM (Universal Transversal de Mercator). Para nuestro país las coordenadas planas se denominan: Cónica Conformal de Lambert y Universal Transversal de Mercator UTM zona 16 N.

Ejemplo típico de Coordenadas:

Planas Lambert:

Este (X) = 476686.535

Norte (Y) = 286691.937

Ejemplo típico de Coordenadas

Planas UTM (zona 16 N):

Este(X) = 260386.447

Norte(Y) = 1515844.529

Coordenadas Geográficas:	Coordenadas Planas Lambert:	Coordenadas Planas UTM (zona 16 N):
Latitud: <b>13° 42' 06.46315" N</b>	Este (X) = <b>476686.535</b>	Este(X) = <b>260386.447</b>
Longitud: <b>89° 12' 55.84453" W</b>	Norte (Y) = <b>286691.937</b>	Norte(Y) = <b>1515844.529</b>

*Imagen No 3-15. Tipos de Coordenadas*

*Fuente: Módulo N°3 Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*

Ahora bien, todas las coordenadas arriba descritas corresponden al mismo punto, pero se expresan de diferente manera de acuerdo a su uso, ya sea Cartografía, Topografía o Geodesia, etc. por tanto todas las Coordenadas son Geodésicas pues tienen como referencia Datums, Elipsoides, Proyecciones Cartográficas y otros parámetros para su conceptualización y definición en forma correcta. Existe otro tipo de

coordenadas que utilizan los topógrafos llamadas coordenadas asumidas, las cuales no tienen Referencia alguna (datum, elipsoide, etc) y por tanto ninguna validez geodésica y sirven solamente para trabajos topográficos cuyos resultados posteriormente los pueden georreferenciar.

## **CAPÍTULO IV: SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS**

### **4.1 Definición sistemas de referencia geodésico**

En primer lugar, es importante definir que es Geodesia, la cual tiene su origen del griego gêodaisia (geo, Tierra; daien, dividir) que significa dividir la Tierra. En la actualidad, puede definirse de manera más extendida como la ciencia que estudia la determinación de la forma, dimensiones exactas y campo gravitatorio de la Tierra, y la localización precisa de puntos sobre la superficie terrestre, en un espacio tridimensional variante con el tiempo.

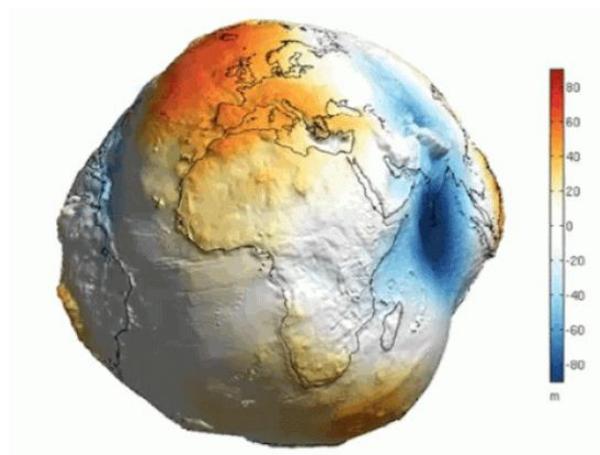
Con el pasar de los años, la aplicación de la Geodesia ha evolucionado de algo básico como es dividir propiedades en parcelas hasta hacer mediciones submarinas del fondo oceánico o poder determinar el campo gravitatorio terrestre y la ubicación de la misma Tierra u otros cuerpos celestes en el espacio.

A causa del gran número de aplicaciones, la geodesia se clasifica en cuatro partes que corresponde a la Geodesia física, Geodesia astronómica, Geodesia geométrica y Geodesia espacial o satelital.

### 4.1.2 Geodesia Física

La geodesia física es la parte de la geodesia superior que analiza los métodos de estudio de la figura de la Tierra como cuerpo físico y geométrico. En la geodesia física se analizan los métodos de determinación de los parámetros del elipsoide terrestre y los métodos de estudio de la figura real de la Tierra.

El estudio de la figura de la Tierra está basado en la figura del campo gravitacional exterior real de la Tierra, por eso en la geodesia física se le otorga gran importancia a la teoría del potencial de la fuerza de gravedad de la Tierra. Con la geodesia física se relaciona también el problema de la reducción de la geodesia superior, entendida habitualmente como el conjunto de tareas para el cálculo de las correcciones a los valores de los ángulos, de las líneas y de otros elementos medidos directamente mediante el traslado a la superficie de relación.



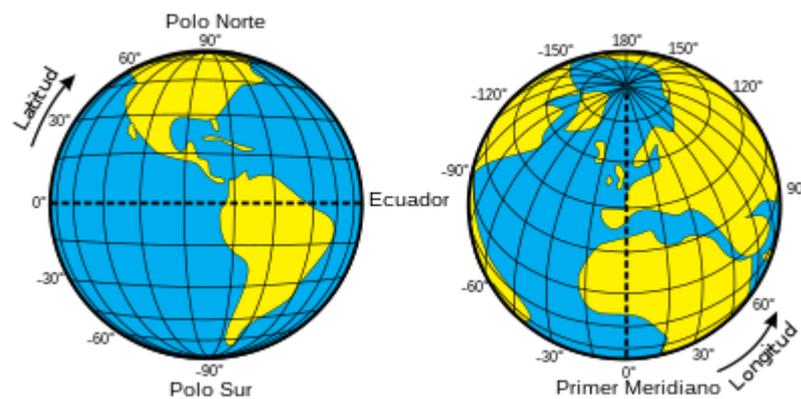
*Imagen No 4-1. Forma real de la Tierra debido a la fuerza de gravedad.*

*Fuente: <https://www.catalunyapress.es/texto-diario/mostrar/1094551/asi-verdadera-forma-planeta-tierra>*

#### 4.1.2 Geodesia Astronómica

Es aquella parte de la geodesia que tiene por objeto la determinación de las coordenadas geográficas astronómicas, Latitud y Longitud, de puntos de la superficie terrestre y de acimuts astronómicos de direcciones en la Tierra.

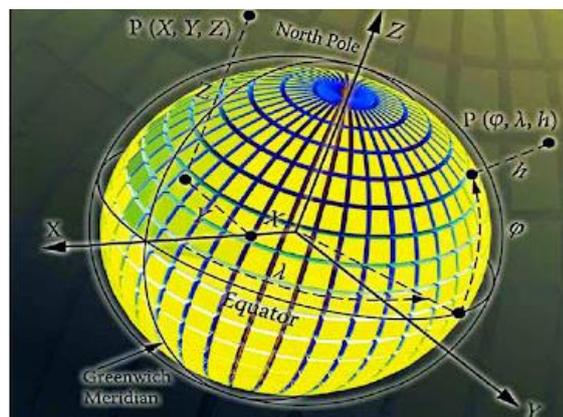
Estas determinaciones se realizan por métodos astronómicos de observación de estrellas en posiciones convenientes, utilizándose principalmente métodos de cálculo de trigonometría esférica y de álgebra matricial junto al ajuste de observaciones por mínimos cuadrados. Las principales aplicaciones geodésicas de los resultados obtenidos son la determinación de la figura de la Tierra (geoide) y la compensación astro geodésica de redes.



*Imagen No 4-2. Representación de coordenadas geográficas de la Tierra. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas\\_geogr%C3%A1ficas](https://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_geogr%C3%A1ficas)*

### 4.1.3 Geodesia Geométrica

Esta ha sido la rama de la Geodesia encargada del estudio de la superficie y propiedades geométrico-matemáticas del elipsoide de revolución terrestre (esferoide), de los métodos matemáticos utilizados para resolver los problemas geodésicos sobre su superficie, y la representación de ésta sobre el plano.



*Imagen No 4-3. Representación geodésica de la figura terrestre, esferoide o elipsoide de revolución.*

*Fuente: (Burkholder E.F., "The 3-D Global Spatial Data Model". CRC Press. 2008)*

Por otra parte, la Geodesia Geométrica proporciona a las restantes ramas de la Geodesia estructuras, patrones y modelos de referencia que sirven como base en la georreferenciación de observaciones geodésicas, posiciones y en el modelado de procesos como función de ciertos parámetros incógnita de interés.

Estas estructuras, patrones y modelos de referencia son agrupados en la actualidad bajo la forma de un sistema de coordenadas terrestre global, cartesiano, tridimensional, único, válido para toda la Tierra, de alta

calidad, realizado por un conjunto de coordenadas y velocidades de estaciones terrestres, densificable, en el cual pueden expresarse los resultados de las diferentes ramas de la Geodesia y de otras ciencias afines, facilitando su intercomparación y análisis multidisciplinario.

#### **4.1.4 Geodesia Espacial**

La Geodesia Espacial aparece con la aplicación de técnicas espaciales para la definición de marcos de referencia y el estudio de la forma de la Tierra, de su campo de gravedad y de su comportamiento. Incluye la Geodesia por satélite (GNSS, DORIS, GRACE) y técnicas de interferometría de muy larga base VLBI, SLR, LLR.

La Geodesia Espacial se basa en la recepción de señales electromagnéticas emitidas por dispositivos embarcados en satélites artificiales, o emitidas por cuásares extra galácticos, observaciones a la Luna y a las estrellas.

En lo referente a técnicas de medición espacial, podemos citar las que nos permiten trabajar con precisión centimétrica o milimétrica tanto en planimetría como en altimetría: GNSS (Global Navigation Satellite System), SLR (Satellite Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Interferometry) y DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Y las técnicas de medición espacial para altimetría: Radares altimétricos (Topex, ERS, Jason), Altimetría Láser (LIDAR), Técnicas de geofísica especial como el radar de apertura

sintética interferométrico InSAR, Técnicas de medidas gravimétricas (GOCE, GRACE)



*Imagen No 4-4. Satélite GNSS en la órbita terrestre.*

*Fuente: <https://www.mat.ucm.es/deptos/as/asignatura.php?asignaturaID=4>*

Finalmente podemos decir que un sistema de referencia geodésico es una definición conceptual de teorías, hipótesis y constantes que permiten situar una tripleta de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y su orientación, es decir es un recurso matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre. Son utilizados en geodesia, navegación, cartografía y sistemas globales de navegación por satélite para la correcta georreferenciación de elementos en la superficie terrestre. Estos sistemas son necesarios dado que la Tierra no es una esfera perfecta.

## 4.2 Elipsoide de referencia

En 1687 Isaac Newton hizo públicos los principios matemáticos que incluían una prueba de que un cuerpo fluido auto gravitatorio en rotación y en equilibrio adopta la forma de un elipsoide aplanado ("oblato") de revolución, generado por una elipse girada alrededor de su diámetro menor; una forma que denominó esferoide oblato.

En geofísica, geodesia, y áreas relacionadas, la palabra 'elipsoide' se entiende como 'elipsoide oblato de revolución', y el término más antiguo 'esferoide oblato' que ya poco se utiliza. Para los cuerpos que no pueden aproximarse bien mediante un elipsoide de revolución se utiliza un triaxial (o escaleno).

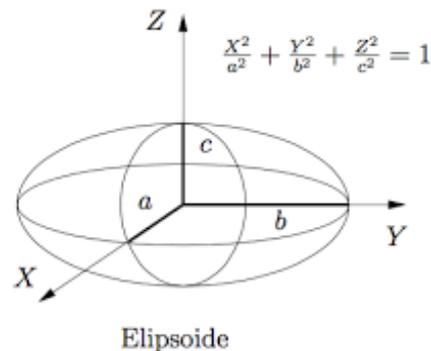
La forma de un elipsoide de revolución viene determinada por los parámetros de forma de dicha elipse. El semieje mayor de la elipse, "a", se convierte en el radio ecuatorial del elipsoide: el semieje menor de la elipse, "b", se convierte en la distancia del centro a cualquiera de los polos. Estas dos longitudes especifican completamente la forma del elipsoide.

$$f = \frac{a - b}{a}$$

Donde  $f$  es la cantidad de achatamiento en cada polo, respecto al radio en el ecuador. A menudo se expresa como una fracción  $\frac{1}{m}$ ;  $m = \frac{1}{f}$  es el

"achatación inversa". En geodesia se utilizan muchos otros parámetros de elipse, pero todos ellos pueden relacionarse con uno o dos de los conjuntos  $a$ ,  $b$  y  $f$ .

Debido a que la Tierra es un cuerpo en rotación y que es afectada por la fuerza de gravedad no es conveniente considerarla como una esfera perfecta, por lo tanto, surge la necesidad de crear un elipsoide de referencia, el cual se utiliza como un marco de referencia en cálculos geodésicos. Se trata de una asimilación ideal a la forma de la Tierra, con la que es más fácil trabajar que con el geoide, el cual sí representa la verdadera forma teórica de la Tierra.



*Imagen No 4-5. Fórmula general del elipsoide.*

*Fuente: [https://www.ugr.es/~arobles/MatApl%28CivilADE%29/Tema6\\_apendice.pdf](https://www.ugr.es/~arobles/MatApl%28CivilADE%29/Tema6_apendice.pdf)*

A medida que evoluciona la geodesia van surgiendo cambios que arrojan una mayor precisión, a continuación, se muestra un resumen de los distintos elipsoides que han sido creados a lo largo del tiempo.

<b>Elipsoide de referencia</b>	<b>Radio ecuatorial (m)</b>	<b>Radio polar (m)</b>	<b>Aplanamiento inverso</b>	<b>Dónde se utiliza</b>
Maupertuis (1738)	6 397 300	6 363 806.283	191	Francia
Plessis (1817)	6 376 523.0	6 355 862.9333	308.64	Francia
Everest (1830)	6 377 299.365	6 356 098.359	300.801 725 54	India
Everest 1830 Modificado (1967)	6 377 304.063	6 356 103.0390	300.8017	Malasia Occidental y Singapur
Everest 1830 (definición de 1967)	6 377 298.556	6 356 097.550	300.8017	Brunéi y Malasia Oriental
Airy (1830)	6 377 563.396	6 356 256.909	299.324 964 6	Britania
Bessel (1841)	6 377 397.155	6 356 078.963	299.152 812 8	Europa, Japón
Clarke (1866)	6 378 206.4	6 356 583.8	294.978 698 2	América del Norte
Clarke (1878)	6 378 190	6 356 456	293.465 998 0	América del

				Norte
Clarke (1880)	6 378 249.145	6 356 514.870	293.465	Francia, África
Helmert (1906)	6 378 200	6 356 818.17	298.3	Egipto
Hayford (1910)	6 378 388	6 356 911.946	297	EE. UU.
International (1924)	6 378 388	6 356 911.946	297	Europa
Krassovsky (1940)	6 378 245	6 356 863.019	298.3	RSS, Rusia, Rumanía
WGS 66 (1966)	6 378 145	6 356 759.769	298.25	EE. UU./Departamen to de Defensa
Australian National (1966)	6 378 160	6 356 774.719	298.25	Australia
América del Sur (1969)	6 378 160	6 356 774.719	298.25	América del Sur
WGS-72 (1972)	6 378 135	6 356 750.52	298.26	EE. UU./Departamen to de Defensa

GRS-80 (1979)	6 378 137	6 356 752.3141	298.257 222 101	Global ITRS
WGS-84 (1984)	6 378 137	6 356 752.3142	298.257 223 563	Sistema de Posicionamiento Global GPS

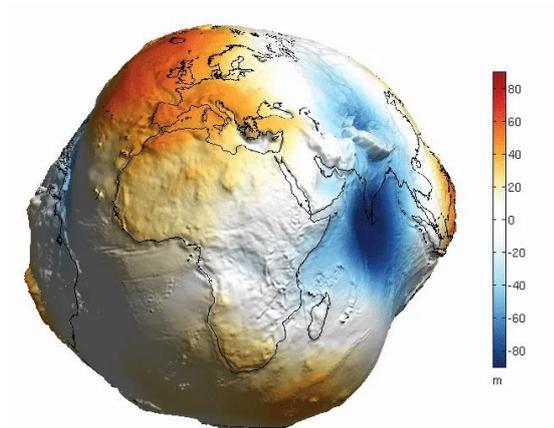
*Tabla No 4-1. Elipsoides de referencia y sus zonas de uso.*

*Fuente:* [https://es.wikipedia.org/wiki/Elipsoide\\_de\\_referencia#:~:text=Un%20elipsoide%20de%20referencia%20es,trabajar%20que%20con%20el%20geoides](https://es.wikipedia.org/wiki/Elipsoide_de_referencia#:~:text=Un%20elipsoide%20de%20referencia%20es,trabajar%20que%20con%20el%20geoides).

### 4.2.1 Geoide

Como se mencionó anteriormente, la Tierra no posee una forma esférica como todos podemos pensar, por el contrario, esta tiene una forma irregular a consecuencia de la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga que experimenta debido a su rotación. Surge entonces una figura matemática que considera el hecho de que la Tierra está cubierta por mares y océanos en un 70%, lo cual afecta al elipsoide cuando se desea medir altitudes.

Se entiende por Geoide (Geo: tierra, Eidos: aspecto o apariencia) a un cuerpo esférico que evidencia un leve achatamiento en sus extremos. Este aplanamiento polar con su consecuente ensanchamiento ecuatorial se debe a los efectos de la gravitación y de la fuerza centrífuga que se genera con el movimiento de rotación sobre su eje.

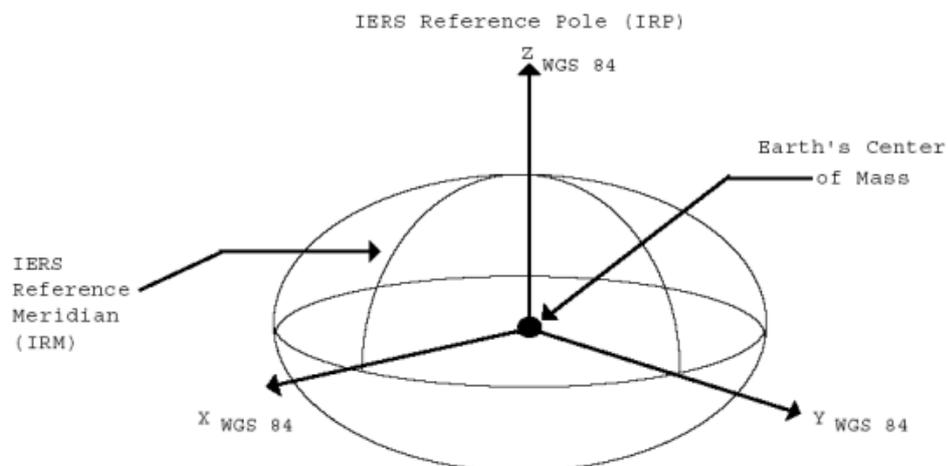


*Imagen No 4-6. Verdadera forma de la Tierra.*

*Fuente: <https://vividmaps.medium.com/geoid-height-of-new-global-gravity-field-models-on-the-3d-globe-earth-potato-4ddc3421475e>*

#### 4.2.2 Elipsoide WGS-1984

Por sus siglas (World Geodetic System) el elipsoide WGS-84 es un sistema de referencia terrestre convencional (Conventional Terrestrial Reference System CTRS), que fue creado en 1984 por el departamento de defensa de los Estados Unidos y tiene como origen el centro de masas de la Tierra. En su definición se siguen las recomendaciones del IERS (International Earth Rotation Service), se trata de un sistema de referencia geocéntrico fijo con la Tierra y orientado positivamente.



*Imagen No 4-7. Elipsoide WGS-84.*

*Fuente: <https://ecalero.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/wgs-84.pdf>*

De la imagen anterior se puede definir a un sistema cartesiano geocéntrico del siguiente modo:

- Origen, centro de masas de la Tierra, incluyendo océanos y atmósfera.

- El eje X la intersección del meridiano origen, Greenwich, y el plano que pasa por el origen y es perpendicular al eje Z, el meridiano de referencia coincide con el meridiano cero del BIH en la época 1984.0 con una precisión de 0,005". Realmente el meridiano origen se define como el IERS Reference Meridian (IRM).
- El eje Y ortogonal a los anteriores, pasando por el origen.
- Eje Z paralelo a la dirección del polo CIO o polo medio definido por el BIH (Bureau International de l'Heure), época 1984.0 con una precisión de 0,005".
- Terna rectangular dextrosum.

La fama de este elipsoide de referencia se debe a que es utilizado por el sistema de posicionamiento global por satélite GPS.

### 4.2.3 Datum geodésico

Al hablar de Datum nos referimos a un conjunto de parámetros y modelos matemáticos que describe la forma y el tamaño de la Tierra y establece un origen para los sistemas de coordenadas.

Cada Datum se encuentra compuesto por un punto llamado fundamental (en el que el elipsoide y la tierra son tangentes) y un elipsoide, el cual está definido por el radio ecuatorial (semieje mayor) y el radio polar (semieje menor).

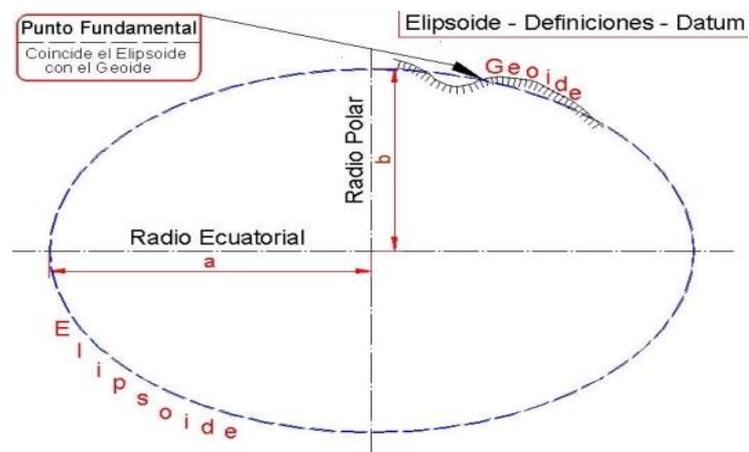


Imagen No 4-8. Representación del punto fundamental

Fuente: <https://www.aristasur.com/sites/as/users/3/arch/datum-cartografia.pdf>

El Datum puede clasificarse en local y global. El Datum local puede dividirse en vertical y horizontal, donde el primero describe la posición en la dirección (Z) que a menudo se basa en la altura sobre el nivel del mar; por otro lado, el horizontal, es el que se usa oficialmente en una región y se emplea con un elipsoide determinado el cual pasa por un punto

específico, es decir, un punto del elipsoide coincidente con un punto de la superficie terrestre.

Existe un gran número de Datums locales, a continuación, se muestran los más importantes y/o utilizados, así como su zona de aplicación.

Datum	Area	Nombre del Punto	Latitud $\omega$	$\xi$	Longitud $\lambda$	Eta	Elipsoide
Norte América 1927	Norte América	Meades Ranch	39 13 26.686 N	-1.32	98 32 30.506 W	1.93	Clarke 1866
Old Hawaiian	Hawaii	Oahu West Base Astro	21 18 13.89 N	0.00	157 50 55.79 W	0.00	Clarke 1866
Qomog	Greenland	Station 7008	54 31 06.27 N	0.00	51 12 24.86 W	0.00	Internacional
Hjorsey 1955	Iceland	Hjorsey	54 31 29.260 N	0.00	22 22 05.840 W	0.00	Internacional
Provisional South American 1956	Venezuela, Ecuador, Peru, Bolivia, Chile	La Canoa	08 34 17.17 N	2.42	63 51 34.88 W	-0.55	Internacional
Corrego Alegre	Brazil	Corrego Alegre	19 50 15.14 S	0.00	48 57 42.75 W	0.00	Internacional
Chua Astro	Paraguay	Chua Astro	19 45 41.16 S	0.00	48 06 07.56 W	0.00	Internacional
Campo Inchauspe	Argentina	Campo Inchauspe	35 58 16.56 S	0.00	62 10 12.03 W	0.00	Internacional
Yacare	Uruguay	Yacare	30 35 53.68 S	0.00	57 25 01.30 W	0.00	Internacional
European 50	Europe	Potsdam, Helmertturm	52 22 51.446 N	3.36	13 03 58.741 E	1.78	Internacional
Odnance Survey of Great Britain 1936	Great Britain: Northern Ireland	Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux	50 51 55.271 N	-1.14	00 20 45.882 E	-2.2	Airy
Ireland 1965	Ireland	Royal Greenwich, Herstmonceux	50 51 55.271 N	-1.14	00 20 45.882 E	-2.2	Modified Airy
Merchich	Morocco	Merchich	33 26 59.672 N	0.00	07 33 27.295 W	0.00	Clarke 1880
Voirol	Algeria	Voirol Observatory	36 45 07.9 N	0.00	03 02 49.45 E	0.00	Clarke 1880
Adindan	Sudan	Adindan	22 10 07.110 N	2.38	31 29 21.608 E	-2.51	Clarke 1880
Sierra Leone 1960	Sierra Leone	D.O.S. Astro SLX2	08 27 17.6 N	0.00	12 49 40.2 W	0.00	Clarke 1880
Liberia 1964	Liberia	Robertsfield Astro	06 13 53.02 N	0.00	10 21 35.44 W	0.00	Clarke 1880
Ghana	Ghana	GCS Pillar 547 Accra	05 32 43.30 N	0.00	00 11 52.30 W	0.00	War Office
Nigeria	Nigeria	Minna	09 39 08.87 N	0.00	06 30 58.76 E	0.00	Clarke 1880
Arc 1950	Africa (South of Equator)	Buffelsfontein	33 59 32.00 S	3.46	25 30 44.622 E	-0.88	Clarke 1880
Tananarive (Antananarivo) Obsy 1925	Malagasy Rep.	Tananarive (Antananarivo Obsy)	18 55 02.10 S	0.00	47 33 06.75 E	0.00	Internacional
World Geodetic System 1972	Sino-Soviet Bloc						World Geodetic System 1972
Herat North	Afghanistan	Herat North Astro	34 23 09.08 N	0.00	64 10 58.94 E	0.00	Internacional
Indian	India, Pakistan, Burma, Thailand, Southeast Asia	Kalianpur Hill	24 07 11.26 N	0.31	77 39 17.57 E	0.00	Everest
Tokyo	Japan	Tokyo Obsy	35 39 17.515 N	0.00	139 44 40.502 E	0.00	Bessel
Hu-Izu-Shan	Taiwan	Hu-Izu-Shan	23 58 32.340 N	0.00	120 58 25.975 E	0.00	Internacional
Luzon	Philippines	Balanacan	13 33 41.000 N	3.47	121 52 03.000 E	(9)	Clarke 1866
Kertau	West Malaysia	Kertau	03 27 50.71 N	3.47	102 37 24.55 E	-10.90	Modified Everest
Timbalai	East Malaysia	Timbalai	05 17 03.548 N	0.00	115 10 56.409 E	0.00	Everest
Djakarta	Indonesia (Sumatra, Java)	Butavia	06 07 39.522 S	0.00	106 48 27.79 E	0.00	Bessel
Bukit Rimpah	Indonesia (Bangka)	Bukit Rimpah	02 00 40.16 S	0.00	105 51 39.76 E	0.00	Bessel
G. Serindung	Kalimantan	Ep. A	01 06 10.60 N	0.00	105 00 59.82 E	0.00	Bessel
G. Segara	Indonesia (Kalimantan, East)	G. Segara (P5)	00 32 12.83 S	0.00	117 08 48.47 E	0.00	Bessel
Montiong Lowe	Indonesia (Sulawesi)	Montiong Lowe (P1)	05 08 41.42 S	0.00	119 24 14.94 E		Bessel
Australian Geodetic	Australia	Johnston Memorial Cairn	25 56 54.5515S	7.68	133 12 30.0771E	-4.19	Australian National
Geodetic Datum 1949	New Zealand	Papatahi Trng Station	41 19 08.900 S	-1.30	175 02 51.000 E	(9)	Internacional
Guam 1963	Marianas Islands	Tagcha	13 22 38.490 N	-10.35	144 45 51.560 E	24.12	Clarke 1866
Local Astrol							World Geodetic System 1972
Camp Area Astro	Antarctica	Camp Area Astro	77 50 52.521 S	0.00	166 40 13.753 E	0.00	Internacional

Tabla No 4-2. Datums más utilizados.

Fuente: <https://es.slideshare.net/henryhvelarde/cartografia-datum>

#### 4.2.4 Datum Norteamericano 1927

Conocido también como NAD27, acrónimo de North American Datum of 1927 (Datum de Norteamérica de 1927). Es el datum geodésico horizontal local principal y el sistema de coordenadas geográficas utilizado para realizar mapas de Estados Unidos durante la parte media del siglo XX. NAD 1927 hace referencia al esferoide de Clarke de 1866 y a un punto de origen en Meades Ranch, Kansas. Las entidades en los mapas topográficos de USGS (United States Geological Survey), incluidas las esquinas de los mapas de cuadrángulo de 7,5 minutos, hacen referencia a NAD27. Está siendo sustituido paulatinamente por el Datum de Norteamérica de 1983.

Actualmente el NAD27 es utilizado en algunos países de Centroamérica; El Salvador, en su momento en la década de los 60's lo adoptó definitivamente como el Datum asociado al elipsoide de Clark de 1886. Esto dio lugar a la creación de la información geodésica y cartográfica nacional.



*Imagen No 4-9. Meade's Ranch Triangulation Station, Kansas, EE.UU.*

*Fuente:*

*[https://en.wikipedia.org/wiki/North\\_American\\_Datum#/media/File:Meade\\_Ranch\\_triangulation\\_station\\_ca.\\_1940.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/North_American_Datum#/media/File:Meade_Ranch_triangulation_station_ca._1940.jpg)*

#### 4.2.5 Datum Global WGS-1984

Es el Datum global (World Geodetic System 1984), también conocido como geocéntrico o mundial, y está definido por el tamaño, forma, orientación de un elipsoide y la ubicación del centro de la Tierra.

Con el empleo de nuevas técnicas de posicionamiento, en especial la constelación GPS (Global Position System) se hace necesario disponer de un sistema para poder posicionar una situación geográfica con referencia a un Datum global con cobertura en toda la superficie terrestre, evitando así la "territorialidad" del resto de Datums existentes.

Para ello se creó el WGS con el primer sistema denominado WGS-74, revisado y modificado, estando actualmente vigente y en uso el WGS-84 en el cual, las coordenadas que se obtienen de la constelación de satélites pueden ser cartesianas en el espacio respecto al centro de masas de la Tierra (X,Y,Z) o geográficas. el sistema de referencia tiene las siguientes características:

- Origen: Centro de masa de la Tierra.
- Eje X: Es la intersección del meridiano de Greenwich y el plano del ecuador.
- Eje Y: Perpendicular a los ejes X y Z coincidiendo con ellos en el centro de masa terrestre.
- Eje Z: Paralelo al polo medio.
- Semieje mayor: 6,378,137 m, Semieje menor: 6,356,752.3142 m
- Inversa del aplanamiento (1/f): 298.257223563
- Velocidad angular de rotación:  $7,292,115 \times 10^{-11}$  rads/segundo.

## **CAPÍTULO V: SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS**

### **MODERNOS**

Cuando hablamos de sistemas de referencia debemos tener claro que estos son necesarios para poder hacer un modelaje de las observaciones geodésicas en función de parámetros aún no conocidos. Dichos sistemas, en principio son sistemas tridimensionales y están definidos en términos de orientación, métrica y curvatura. Una cuarta dimensión, el tiempo, se contempla en base a los movimientos de la Tierra, sus irregularidades y los movimientos que poseen. Así como pueden definirse sistemas de referencia para la Tierra, también se puede hacer para otros cuerpos celestes como la Luna y el resto de planetas del Sistema Solar.

Para poder referir las observaciones geodésicas y estimar parámetros en un único sistema global, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sistema de referencia, aquel en el cual se van a definir constantes, convenciones, modelos y parámetros, deben contar con un sistema cartesiano tridimensional con origen en el geo centro, orientación ecuatorial, escala métrica y que rote con la Tierra. Todo esto con el fin de tener una base matemática para la representación de cantidades geométricas y físicas.
- El sistema de referencia contempla dos partes: la física, que es la materialización sólida del sistema por medio de un conjunto de puntos, y la matemática, que es la determinación de parámetros.

- El Datum geodésico fija de una manera certera la relación que existe entre un marco de referencia y un sistema de referencia, todo esto por medio de la asignación de un conjunto de parámetros preestablecidos.

## 5.1 Sistema Internacional de Referencia Terrestre

A medida que la Tierra cambia constantemente de forma. y para entenderlo de una mejor manera, cuando se observa el movimiento de la corteza terrestre se debe hacer referencia a un marco de referencia terrestre el cual debe proporcionar un conjunto de coordenadas de puntos situados estratégicamente sobre la superficie terrestre.

El International Terrestrial Reference System, por sus siglas en inglés (ITRS), es un sistema de referencia espacial mundial el cual co-rotata con la Tierra en su movimiento diurno en el espacio. Dicho sistema forma parte del servicio del IERS (International Earth Rotation Service), el cual es el encargado de proporcionar referencias globales a las comunidades astronómicas, geodésicas, geofísicas, y supervisa la realización del ITRS. Las realizaciones del ITRS son producidas por el Centro de Productos ITRS del IERS bajo el nombre de Marcos de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

Entre las características más peculiares del ITRS se pueden destacar las siguientes:

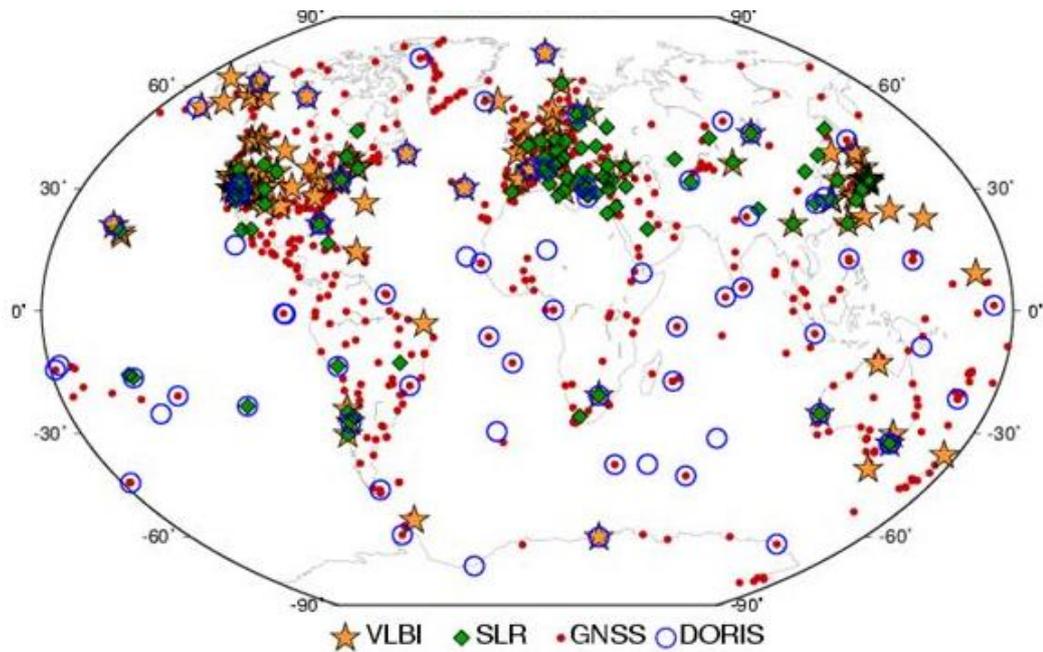
- Origen: Centro de masas definido para la Tierra (geocentro), incluyendo los océanos y la atmósfera.
- Escala: La unidad de longitud es el metro (SI).
- Orientación: Dada por la orientación del (BIH) en 1984.
- Evolución en el tiempo: La evolución en el tiempo de la orientación se asegura mediante el empleo de una condición de no rotación

neta (no-net rotation), considerando los movimientos tectónicos horizontales sobre toda la Tierra.

## **5.2 Marco Internacional de Referencia Terrestre ITRF**

Conocido por sus siglas en inglés como ITRF (International Terrestrial Reference Frame), el cual es una materialización del ITRS por aproximadamente 400 estaciones sobre la superficie terrestre, las cuales proporcionan valores de coordenadas muy precisas para una época determinada y las posibles variaciones que puedan surgir en el tiempo. Las estaciones que conforman dicha materialización toman en consideración la localización de un origen, la orientación del sistema de ejes cartesianos ortogonales y una escala.

Estas coordenadas ITRF se obtienen a partir de una combinación de soluciones TRF individuales calculadas por el IERS en centros de análisis utilizando las observaciones de técnicas de Geodesia Espacial tales como: GPS (Global Position System), VLBI (Very Long Base Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), LLR (Lunar Laser Ranging) y DORIS (Doppler Orbitography Determination and Radiopositioning Integrated on Satellites). Todos ellos utilizan redes de estaciones ubicadas en sitios que cubren toda la Tierra.



*Imagen No 5-1. Localización de estaciones ITRF*

*Fuente:*

[https://www.redalyc.org/journal/4517/451750038008/html/#redalyc\\_451750038008\\_ref15](https://www.redalyc.org/journal/4517/451750038008/html/#redalyc_451750038008_ref15)

Hasta la fecha existen 12 realizaciones del ITRF publicadas por el IERS: ITRF 88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005 e ITRF2008.

Entre las características más peculiares del ITRF se pueden destacar las siguientes:

- El marco de referencia proporciona un conjunto de coordenadas de puntos localizados sobre la superficie terrestre.
- Puede utilizarse para medir la tectónica de placas y subsidencia o carga regional o representar la Tierra cuando se mide su rotación en el espacio.

- Las realizaciones del ITRF (11 desde 1988) incluyen posiciones y velocidades de las estaciones y modelan los cambios seculares de la corteza terrestre. Por este motivo pueden emplearse para comparar observaciones de diferentes épocas.
- La continuidad de las soluciones se asegura mediante las Convenciones del IERS y el vínculo entre ellas son los parámetros de transformación.

### **5.3 Sistemas y marcos de referencia regional SIRGAS**

Originalmente, el acrónimo de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur) tuvo su primera modificación en enero del 2001, en la ciudad Nueva York, todo esto con el fin de atender las recomendaciones hechas en la 7ª Conferencia Cartográfica de las Naciones Unidas para las Américas; pasando a llamarse Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

En 2020 SIRGAS nuevamente cambió de nombre, llamándose Sistema de Referencia Geodésico para las Américas, todo esto debido a que los objetivos de la misma se ampliaron al grado de poder hacer la determinación de un sistema de referencia físico unificado para gravimetría, alturas físicas y geoide. Dicho cambio obedeció a las recomendaciones brindadas por el Taller Internacional para la Implementación del Marco de Referencia Geodésico Global en América Latina, el cual tuvo lugar en la ciudad de Buenos Aires, Argentina en septiembre del 2019.

Como sistema de referencia, SIRGAS se define de manera similar al Sistema Internacional de Referencia Terrestre ITRS (International Terrestrial Reference System), su realización es la densificación regional del marco global de referencia terrestre ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Las coordenadas SIRGAS están asociadas a una época específica de referencia y su variación con el tiempo es tomada en cuenta ya sea por las velocidades individuales de las estaciones SIRGAS

o mediante un modelo continuo de velocidades que cubre todo el continente.

Las realizaciones o densificaciones de SIRGAS asociadas a diferentes épocas y referidas a diferentes soluciones del ITRF materializan el mismo sistema de referencia y sus coordenadas, reducidas a la misma época y al mismo marco de referencia (ITRF), son compatibles en el nivel centimétrico. La extensión del marco de referencia SIRGAS está dada a través de densificaciones nacionales, las cuales a su vez sirven de marcos de referencia local.

En la actualidad, las realizaciones de SIRGAS son las siguientes:

- **SIRGAS95:** una red GPS de alta precisión con 58 estaciones distribuidas sobre América del Sur, cuyas posiciones se refieren al ITRF94, época 1995.4. La precisión de esta realización está entre  $\pm 3 \dots \pm 6$  mm.

La primera campaña GPS de SIRGAS fue llevada a cabo entre el 26 de mayo y el 4 de junio de 1995. Ésta incluyó 58 estaciones distribuidas en América del Sur y su medición fue posible gracias al esfuerzo combinado de entidades sudamericanas, europeas y norteamericanas que pusieron a disposición los equipos GPS y operadores necesarios para toda la red. Las mediciones fueron procesadas independientemente por el DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) y NIMA (US National Imagery and Mapping Agency, actualmente NGA: National Geospatial-Intelligence Agency). DGFI utilizó el software Bernese, v. 3.4 con algunas modificaciones implementadas por ese Instituto, mientras que NIMA

trabajó con el software GIPSY/OASIS II. La comparación de las soluciones a través de una transformación de similitud de siete parámetros (transformación de Helmert) arrojó como máxima diferencia 3,5 cm con RMS de  $\pm 1,0$  cm en X,  $\pm 1,4$  cm en Y y  $\pm 0,7$  cm en Z. Las principales causas de estas discrepancias se basan en que se utilizaron diferentes efemérides satelitales en los procesamientos individuales y la dependencia de las variaciones de los centros de fase con respecto al ángulo de elevación no fueron tenidos en cuenta en la solución de NIMA. La solución final combinada de SIRGAS95 está referida al ITRF94.

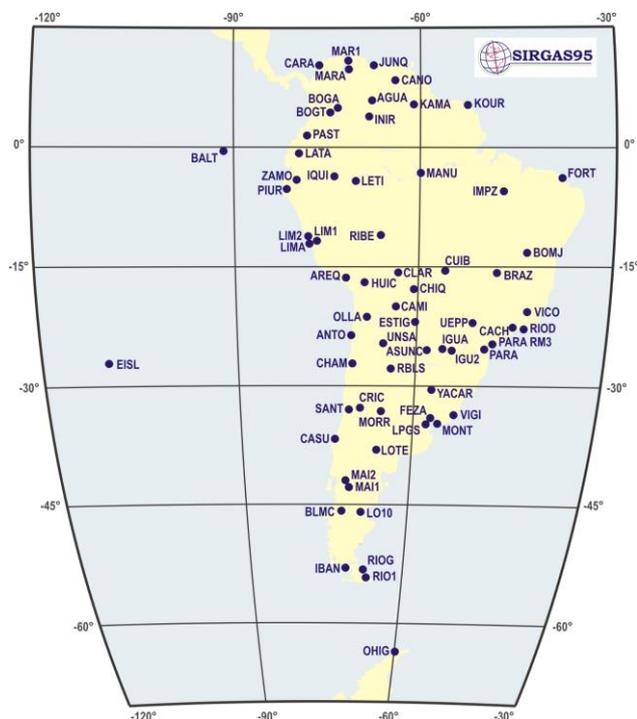


Imagen No 5-2. Estaciones SIRGAS95 ubicadas en América del Sur.  
Fuente [https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez\\_et\\_al\\_SIRGAS\\_Seminario\\_SCI\\_oct\\_2010.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez_et_al_SIRGAS_Seminario_SCI_oct_2010.pdf)

- **SIRGAS2000:** una red GPS de 184 estaciones distribuidas sobre Norte, Centro y Sudamérica, cuyas posiciones se refieren al ITRF2000, época 2000.4. La precisión de esta realización está entre  $\pm 3 \dots \pm 6$  mm.

La segunda campaña de SIRGAS fue adelantada entre el 10 y el 19 de mayo de 2000. Dado que su objetivo primordial era la vinculación de los sistemas de alturas nacionales al ITRF, ésta incluye además de las estaciones SIRGAS95, los mareógrafos de referencia de América del Sur y algunos puntos fronterizos que permiten la conexión directa entre redes de nivelación vecinas. SIRGAS2000 contiene 184 estaciones distribuidas en Norte, Centro y Sur América. Esta red fue calculada por tres centros de procesamiento: DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut), IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) y BEK (Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung), actualmente Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG). DGFI e IBGE utilizaron el software Bernese, v. 4.0, mientras que BEK trabajó con el software GIPSY/OASIS II. La solución final fue obtenida a partir del ajuste combinado de las coordenadas individuales y sus matrices varianza-covarianza (archivos SINEX) y se refiere al ITRF2000.

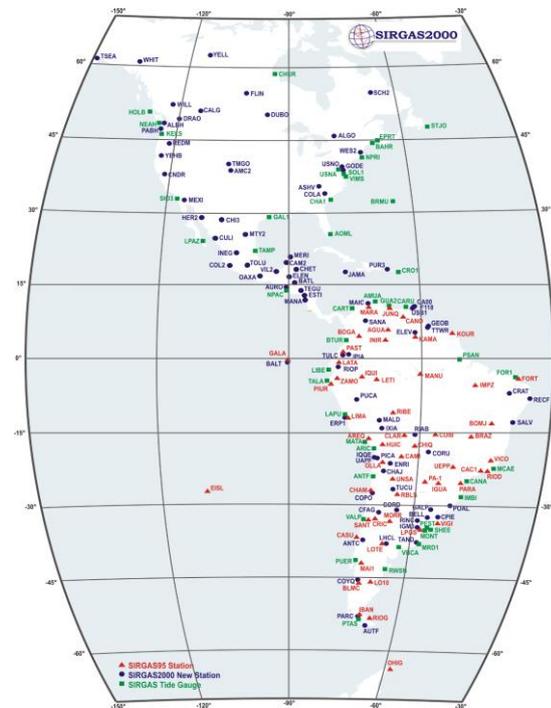


Imagen No 5-3. Estaciones SIRGAS2000 ubicadas en toda América.  
 Fuente: [https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez\\_et\\_al\\_SIRGAS\\_Seminario\\_SCI\\_oct\\_2010.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez_et_al_SIRGAS_Seminario_SCI_oct_2010.pdf)

- **SIRGAS-CON:** una red de estaciones GNSS de operación continua que es procesada semanalmente para la determinación de coordenadas semanales instantáneas y soluciones multianuales del marco de referencia. Las posiciones semanales de las estaciones y las soluciones multianuales se refieren a la versión del ITRF en uso cuando los datos GNSS son procesados. La precisión media de estas soluciones en la época de referencia es de alrededor de  $\pm 1.2$  mm en las componentes Norte y Este y de unos  $\pm 2.5$  mm en la altura. La precisión media de las velocidades de las estaciones se estima en  $\pm 0.7$  mm/a en la componente Norte y Este y en  $\pm 1.1$  mm/a en altura.

La realización actual de SIRGAS es una red de estaciones GNSS de funcionamiento continuo con coordenadas de alta precisión (asociadas a una época específica de referencia) y sus cambios a través del tiempo (velocidades de las estaciones). Esta red comprende:

1. Una red de cobertura continental (SIRGAS-C), densificación primaria del ITRF en Latinoamérica, con estaciones estables, de funcionamiento óptimo, que garantizan consistencia, perdurabilidad y precisión del marco de referencia a través del tiempo.

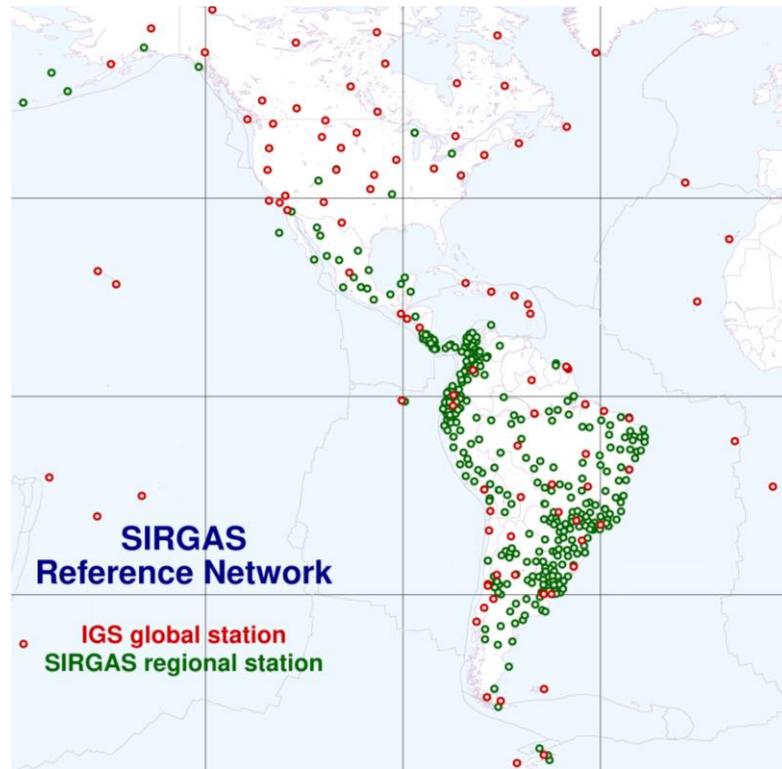
La red SIRGAS-C es procesada semanalmente por el DGFI-TUM (Alemania) en su calidad de centro de análisis IGS RNAAC SIRGAS. DGFI-TUM se desempeña como Centro de Combinación SIRGAS desde agosto de 2008 a genera soluciones semanales semilibres para la integración de SIRGAS-CON en el poliedro global del IGS y el cálculo de soluciones multianuales, coordenadas semanales (referidas a la época de observación) y soluciones multianuales (acumuladas) con posiciones y velocidades.

Las coordenadas semanales son de especial utilidad después de terremotos fuertes que causan deformaciones en el marco de referencia y hacen inservibles las coordenadas determinadas previamente. Las soluciones multianuales proveen posiciones y velocidades precisas y actuales de las estaciones SIRGAS y materializan el marco de referencia SIRGAS mientras que la última solución del ITRF es actualizada y una nueva versión es publicada. Mientras que las versiones del ITRF son

actualizadas más o menos cada cinco años, las soluciones multianuales de SIRGAS se generan cada uno o dos años.

2. Redes nacionales de referencia (SIRGAS-N), que densifican la red continental y proveen acceso al marco de referencia a nivel nacional y local. Tanto la red continental como las nacionales tienen las mismas características y calidad y cada estación es procesada por tres centros de análisis.

Las redes nacionales SIRGAS-N son calculadas por los Centros de Procesamiento SIRGAS latinoamericanos: CEPGE (Ecuador), IBGE (Brasil), IGAC (Colombia), IGM-Cl (Chile), IGN-Ar (Argentina), INEGI (México), IGM-Uy (Uruguay), USC (Chile). Estos Centros generan soluciones semanales semilibres (loosely constrained) de las redes SIRGAS-N, las cuales son combinadas con la red continental SIRGAS-C, asegurando que las posiciones y velocidades de todas las estaciones (continentales y de densificación) sean compatibles entre sí. La estrategia de procesamiento garantiza que cada estación SIRGAS esté incluida en tres soluciones individuales.



*Imagen No 5-4. Estaciones SIRGAS-CON a nivel global.*

*Fuente: [https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez\\_et-al\\_SIRGAS\\_Seminario\\_SCI\\_oct\\_2010.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez_et-al_SIRGAS_Seminario_SCI_oct_2010.pdf)*

#### **5.4 Sistemas y marcos de referencia local SIRGAS-ES2007**

Antiguamente en nuestro país era utilizado el NAD27 el cual es referido al elipsoide Clarke 1866 y aunque también es aplicable el UTM16N, el Sistema de Referencia oficial es SIRGAS, el cual usa un elipsoide GRS80 y el sistema de proyección cónico conforme de Lambert. La Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador está compuesta por 38 estaciones distribuidas homogéneamente sobre el territorio nacional. 34 de ellas están materializadas por pilares (estaciones pasivas) y los cuatro restantes (AIES, SNJE, SSIA, VMIG) son de operación continua, 28 de las estaciones pasivas cuentan con una estación excéntrica, que garantiza la perdurabilidad del punto de referencia en el evento de que el monumento principal sea alterado o desaparezca. Esta red fue determinada por la Gerencia de Geodesia del Instituto Geográfico y del Catastro Nacional (IGCN) del Centro Nacional de Registros (CNR) entre octubre y diciembre de 2007.

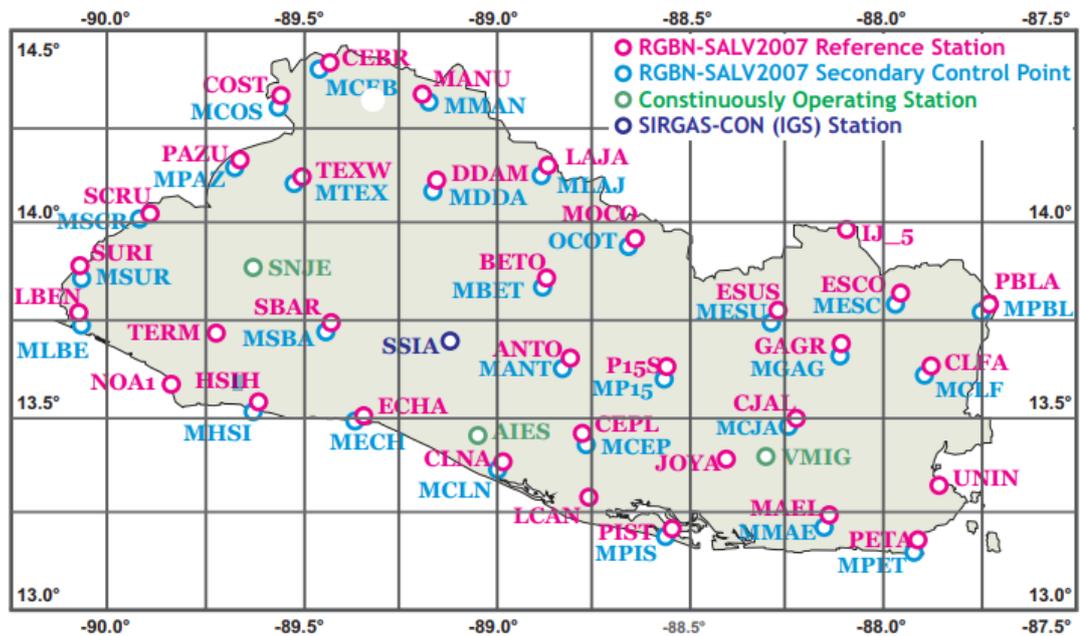


Imagen No 5-5. Vértices de la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador.

Fuente: Material didáctico visto en clases de especialización

Las estaciones de operación continua SNJE, SSIA, VMIG fueron incluidas gracias al apoyo de Prof. Ch. DeMets de la Northwestern University. El objetivo principal es suministrar una plataforma de referencia moderna, precisa y confiable a los productores y usuarios de información georreferenciada en el país. Por esta razón, una de las condiciones fundamentales en el procesamiento de los datos GPS registrados es la integración de la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador al marco de referencia continental SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas), el cual a su vez constituye la densificación regional del marco de referencia global (ITRF: International Terrestrial References Frame).

N°	NOMBRE	ID
1	ANTON	ANTO
2	BETO	BETO
3	CANTON EL BRUJO	CEBR
4	CANTON JALACATAL	CJAL
5	CASERIO LA FABULOSA	CLFA
6	COOPERATIVA LOS NARANJOS	CLNA
7	CANTON OSTUA	COST
8	DESVIO DE AMAYO	DDAM
9	EL CHARCON	ECHA
10	CANTON EL PLAYON	CEPL
11	ESCORPION	ESCO
12	EL SUSPIRO	ESUS
13	GRANJA AGRICOLA	GAGR
14	HACIENDA SIHUAPILAPA	HSIH
15	IJ-5	IJ5
16	JOYA	JOYA
17	LAJAS	LAJA
18	LA BENDICION	LBEN
19	LA CANOA	LCAN
20	MANUEL	MANU
21	MARIA ELENA	MAEL
22	NOA-1	NOA1
23	OCOTILLO II	OCOT
24	PRESA 15 DE SEPTIEMBRE	P15S
25	PIEDRAS AZULES	PAZU
26	PEÑAS BLANCAS	PBLA
27	PISTA EL TAMARINDO	PETA
28	PISTA 97	PIST
29	SAN BARTOLO II	SBAR
30	SANTA CRUZ	SCRU
31	SSIA	SSIA
32	SURIANO II	SURI
33	TERMINAL	TERM
34	TEXIS WEST II	TEXW
35	LA UNION	UNIN

N°	NOMBRE	ID
1	MKZ ANTON	MANT
2	MKZ BETO	MBET
3	MKZ CANTON EL BRUJO	MCEB
4	MKZ CANTON JALACATAL	MCJA
5	MKZ CASERIO LA FABULOSA	MCLF
6	MKZ COOPERATIVA LOS NARANJOS	MCLN
7	MKZ CANTON OSTUA	MCOS
8	MKZ DESVIO DE AMAYO	MDDA
9	MKZ EL CHARCON	MECH
10	MKZ CANTON EL PLAYON	MCEP
11	MKZ ESCORPION	MESC
12	MKZ EL SUSPIRO	MESU
13	MKZ GRANJA AGRICOLA	MGAG
14	MKZ HACIENDA SIHUAPILAPA	MHSI
15	MKZ LAJAS	MLAJ
16	MKZ LA BENDICION	MLBE
17	MKZ MANUEL	MMAN
18	MKZ MARIA ELENA	MMAE
19	MKZ OCOTILLO II	MOCO
20	MKZ PRESA 15 DE SEPTIEMBRE	MP15
21	MKZ PIEDRAS AZULES	MPAZ
22	MKZ PEÑAS BLANCAS	MPBL
23	MKZ PISTA EL TAMARINDO	MPET
24	MKZ PISTA 97	MPIS
25	MKZ SAN BARTOLO II	MSBA
26	MKZ SANTA CRUZ	MSCR
27	MKZ SURIANO II	MSUR
28	MKZ TEXIS WEST II	MTEX

 NO POSEE MKZ

Tabla No 5-1. Principales estaciones y sus excéntricas de la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador (SIRGAS-ES2007).

Fuente:

[https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Bol23/14\\_Escobar\\_2018\\_Integracion\\_RGBN\\_El\\_Salvador\\_a\\_SIRGAS.pdf](https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Bol23/14_Escobar_2018_Integracion_RGBN_El_Salvador_a_SIRGAS.pdf)

Esta integración garantiza que las coordenadas de la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador están definidas sobre el mismo sistema que sirve como base para el cálculo de las órbitas de los satélites GPS

distribuidos por el Servicio Internacional GNSS (IGS: International GNSS Service). De esta manera, los vértices de la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador pueden ser utilizados como estaciones de referencia y sus coordenadas, junto con las efemérides satelitales del IGS, permiten obtener posiciones geodésicas referidas directamente al ITRF vigente (en la actualidad, el ITRF2005). Cabe destacar que desde enero de 2002 (semana GPS 1150) el sistema de referencia World Geodetic System (WGS84) adoptó como realización al ITRF; es decir, desde esa fecha, éstos son idénticos.

La integración de Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador en el marco continental SIRGAS se garantiza a través de su procesamiento simultáneo con estaciones SIRGAS de operación continua (SIRGAS-CON), las cuales a su vez, sirven de estaciones de referencia para el ajuste final de la red. De esta manera, así como SIRGAS es la densificación continental del ITRF, la Red Geodésica Básica Nacional de El Salvador es la densificación nacional de SIRGAS en este país, de allí esta red se denomina SIRGASES2007.

Proyección	Lambert SIRGAS-ES2007
Coordenadas de entrada	Latitud ( $\phi$ ) y longitud ( $\lambda$ ) referidas a WGS-84
Elipsoide	WGS-1984/GRS80
Semieje mayor	a = 6 378 137 m
Semieje menor	b = 6 356 752.31414 m
Achatamiento	1/f = 298.257222101
Excentricidad	e <sup>2</sup> = 0,0066943800229
Parámetros de la proyección	
Falso Este	500 000,000 m
Falso Norte	295 809,184 m
Paralelo de origen	<u>13° 47' 03.477624" N (valor en SIRGAS)</u>
Meridiano de origen	<u>88° 59' 59.938692" W (valor en SIRGAS)</u>
1. paralelo estándar	<u>13° 19' 03.477624" N (valor en SIRGAS)</u>
2. paralelo estándar	<u>14° 15' 03.477624" N (valor en SIRGAS)</u>
Factor de escala en el meridiano origen:	0,999 96704
DATUM SIRGAS-ES2007 Tx = 0 Ty = 0 Tz = 0	

*magen No 5-6. Parámetros de la proyección cónica conformal de Lambert SIRGAS-ES2007  
Fuente: <https://es.slideshare.net/asoges/sistema-de-referencia-geocntrico-para-las-amricas-sirgas-aplicado-a-el-salvador>*

## **CAPÍTULO VI: PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS**

### **6.1 Definición proyecciones cartográficas**

En geografía, una proyección cartográfica (también llamada proyección geográfica) es una manera de representar visualmente una porción de la corteza terrestre, que realiza una equivalencia entre la curvatura natural del planeta y la superficie plana de un mapa. Consiste, fundamentalmente, en “traducir” una representación tridimensional a una bidimensional, distorsionando lo menos posible las proporciones del original.

Se trata de un procedimiento propio de la creación de los mapas por parte de los cartógrafos, quienes deben guiarse por el sistema de coordenadas que componen los meridianos y los paralelos terrestres para construir una representación espacial que sea fiel a las proporciones de la curvatura del planeta.

Esto, sin embargo, no puede hacerse sin un cierto margen de error, de modo que las proyecciones se estudian con el fin de disminuir la distorsión en la medida de lo posible y preservar, sobre todo, los tres aspectos fundamentales de un mapa: la distancia, la superficie y la forma.

Existen distintas proyecciones cartográficas posibles, es decir, distintos métodos y procedimientos para representar bidimensionalmente las dimensiones de la Tierra (o de una porción de su superficie), ya que este ha sido un tema que ha ocupado a los geógrafos desde tiempos antiguos.

## 6.2 Propiedades de una proyección cartográfica

Todas las proyecciones cartográficas presentan rasgos característicos que tienen que ver con el tipo de transformación o el procedimiento geométrico empleado para hacerla. Así, una proyección geográfica puede tener una o dos de las siguientes tres propiedades, pero en ningún caso puede cumplir con las tres al mismo tiempo:

- **Equidistancia.** La proyección es fiel a las distancias del original, es decir, no las agranda ni las achica, sino que mantiene su proporción en la escala correspondiente.
- **Equivalencia.** La proyección es fiel a las áreas de las superficies del original, es decir, no distorsiona los tamaños y las dimensiones de las superficies.
- **Conformidad.** La proyección es fiel a las formas y los ángulos del original, es decir, no distorsiona la silueta o la apariencia de la superficie representada.

En cada proyección se busca cumplir lo más posible con estas tres propiedades fundamentales, aunque generalmente se sacrifique alguna más que otra dependiendo de la utilidad específica del mapa proyectado. Por ejemplo, si se trata de un mapamundi o planisferio escolar, en general se respeta más la forma de los continentes (conformidad) que la distancia entre ellos (equidistancia) y la superficie de cada uno (equidistancia).

### 6.3 Tipos de proyecciones cartográficas

Para clasificar las proyecciones cartográficas, generalmente se utiliza el criterio de la figura geométrica que la inspira, esto es, si la proyección es cilíndrica, cónica, acimutal o si combina aspectos de estas tres categorías.

- **Proyecciones cilíndricas.** Como su nombre lo indica, son las proyecciones que emplean un cilindro imaginario como superficie del mapa. Ubicado de manera secante o tangente a la superficie esférica del planeta, este cilindro cuenta con buena conformidad (respeta las formas), pero a medida que nos alejamos del ecuador, se produce una mayor y más notoria distorsión en cuanto a distancias y superficies. Aun así, al preservar la perpendicularidad entre meridianos y paralelos, es un tipo de proyección sencilla y útil, muy empleada en la navegación.
- **Proyecciones cónicas.** De manera similar a las cilíndricas, estas proyecciones se obtienen al ubicar la esfera terrestre dentro de la curvatura interior de un cono tangente o secante imaginario, sobre el cual se proyectarán los paralelos y los meridianos. Este tipo de proyecciones tienen la virtud de convertir los meridianos en líneas rectas que parten del polo, y los paralelos en circunferencias concéntricas dentro del cono. El mapa obtenido es ideal para representar las latitudes medias, porque presenta mayor distorsión a medida que se avanza hacia los polos.

- **Proyecciones acimutales o azimutales.** También llamadas proyecciones cenitales, se obtienen colocando la esfera terrestre sobre un plano imaginario, tangente a la esfera misma, sobre el cual se proyectan los meridianos y los paralelos. El punto de vista obtenido se corresponde con la visión del mundo desde el centro de la Tierra (proyección gnomónica) o desde un planeta lejano (proyección ortográfica). Estas proyecciones son idóneas para conservar la relación entre los polos y los hemisferios, por lo que son fieles en las regiones de altas latitudes; pero presentan una creciente distorsión cuanto mayor sea la distancia entre el punto tangencial del plano y de la esfera, de modo que no son idóneas para representar fielmente la región ecuatorial.
- **Proyecciones modificadas.** También llamadas proyecciones combinadas o mixtas, son aquellas que incorporan distintos aspectos de las proyecciones anteriormente listadas, y tratan de alcanzar una representación fiel de la superficie terrestre a través de la ruptura de la continuidad del mapa y de la construcción matemática de un cuadrado que abarque la misma superficie de un círculo: un procedimiento contraintuitivo, pero que permite experimentar con deformaciones voluntarias de los meridianos y paralelos terrestres, para obtener así resultados novedosos e imposibles usando el resto de los tipos de proyección.

## **Ejemplos de proyecciones cartográficas**

Las principales y más conocidas proyecciones cartográficas de la Tierra (o sea, un mapamundi) son:

### **6.4 Proyección Universal Transversal de Mercator UTM**

Creada por el geógrafo y matemático alemán Gerardus Mercator (1512-1594) en 1569, es una de las proyecciones terrestres más utilizadas de la historia, sobre todo en la confección de mapas para la navegación durante el siglo XVIII. Es una proyección de tipo cilíndrica, práctica y sencilla, pero que deforma las distancias entre los meridianos y paralelos terrestres al convertirlos en líneas paralelas, lo que aumenta la distancia entre uno y otro conforme se avanza hacia el polo. A ello se suma un empequeñecimiento de las regiones ecuatoriales, lo que permite que, por ejemplo, Alaska luzca más o menos del tamaño de Brasil, cuando este último en realidad tiene casi cinco veces su tamaño. Esto ocasiona que Europa, Rusia y Canadá tengan un rol mucho más destacado en la representación del globo, por lo que el mapa ha sido acusado de ser eurocéntrico.

### **6.5 Proyección Cónica Conformal de Lambert Secante**

También llamada “Proyección conforme de Lambert” para distinguirla de otras proyecciones realizadas por el físico, filósofo y matemático franco-alemán Johann Heinrich Lambert (1728-1777), se trata de una proyección cónica creada en 1772. Se obtiene utilizando dos paralelos de referencia que intersecan al globo terrestre y hacen las veces de lados del cono, lo que permite una nula distorsión a lo largo de los paralelos, aunque esta distorsión aumenta al alejarse de ellos. Los meridianos, en cambio, se convierten en líneas curvas de gran exactitud. El resultado es una proyección de muy alta conformidad, que suele utilizarse para las cartas de vuelo de los aviones, a pesar de que los mapamundis obtenidos con ella suelen servir únicamente para un hemisferio a la vez.

### **6.6 La Proyección de Gall-Peters**

Creada por el clérigo escocés James Gall (1808-1895) en 1855, esta proyección apareció por primera vez 30 años después en la Revista Geográfica Escocesa (*Scottish Geographical Magazine*). Pero su popularización y puesta en práctica le correspondió al cineasta alemán Arno Peters (1916-2002) y por esa razón lleva el nombre de ambos. Se trata de una proyección que busca corregir los defectos de la proyección de Mercator, y para eso, hace más énfasis en la equivalencia: proyecta la esfera terrestre en un cilindro imaginario, que luego se estira al doble de su magnitud propia.

### **6.7 La Proyección de Van Der Grinten**

Creada en 1898 por el cartógrafo germano-estadounidense Alphons J. van der Grinten (1852-1921), no es una proyección conforme ni equivalente, sino que es una construcción geométrica arbitraria en el plano. Utiliza los mismos métodos de Mercator, pero disminuye considerablemente sus distorsiones, que quedan reservadas para los polos, sujetos a un grado máximo de inconformidad. Esta proyección fue adoptada por la National Geographic Society en 1922, hasta su reemplazo en 1988 por la proyección de Robinson.

### **6.7 La Proyección de Aitoff**

Propuesta en 1889 por el cartógrafo ruso David Aitoff (1854-1933), es una proyección cenital o azimutal poco equivalente y poco conforme, construida a partir de la distorsión de la escala horizontal para tornar la esfera terrestre en una elipse dos veces más ancha que alta. Es una escala constante en el ecuador y el meridiano central del planeta, que sirvió de inspiración a Ernst Hammer para proponer un modelo semejante en 1892, conocido como proyección de Hammer, pero de poco uso.

### **6.7 La Proyección de Robinson**

Creada en 1961 por el geógrafo estadounidense Arthur H. Robinson (1915-2004), surgió como respuesta al debate respecto a la más justa representación del planeta que se dio a mediados del siglo XX. Su propósito era mostrar el mapamundi de manera sencilla, aunque poco fidedigna en un plano semicilíndrico, de modo que no es ni equidistante,

ni equivalente, ni conforme, sino que asume sus distorsiones (las más importantes en la región polar y en las latitudes altas) en base a un consenso cultural, que produjera imágenes atractivas del mundo entero, sin hacer énfasis en ningún continente. Esta proyección fue ampliamente utilizada por la National Geographic Society hasta su reemplazo en 1998 por la proyección de Winkel-Tripel.

### **6.8 La Proyección de Winkel-Tripel**

Se trata de una proyección geográfica azimutal modificada, propuesta por Oscar Winkel en 1921, a partir de la combinación de la Proyección de Aitoff y una proyección cilíndrica equidistante. Esta proyección fue adoptada por la National Geographic Society en 1998, y desde entonces se la tiene como el mejor modelo de representación terrestre hasta la fecha.

## **CAPÍTULO VII: FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA**

### **7.1 Fotogrametría**

Es conveniente en primer lugar poder dar una definición de fotogrametría, la cual proviene de la composición del vocablo griego “Photo”: Luz, “Grama”: Dibujo/Trazo/Representación y “Metron”: Medir; esto puede entenderse como: Medir objetos por medio de la luz.

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) y la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS). La primera de ellas define la Fotogrametría como “la ciencia encargada de realizar mediciones confiables por medio de fotografías para obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotografiado”.

Por otra parte, la definición que proporciona la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) es “el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante u otros fenómenos”.

## **7.2 Historia de la fotogrametría**

Al hablar de la fotogrametría debemos tener presente que no es una ciencia nueva, ya que los principios matemáticos en que se basa son conocimientos desde hace más de un siglo, sin embargo, sus aplicaciones topográficas y demás bondades que brinda son mucho más recientes.

La variedad de aplicaciones de la fotogrametría va más allá de las topográficas, ya que su eficacia ayuda en medicina legal y criminalística, así como en investigaciones policíacas, en escultura y arquitectura que se valen de ella para la reproducción y medida de cuerpos y objetos diversos. Gracias a esta se pudieron reconstruir muchos monumentos destruidos durante las guerras mundiales, entre ellos la célebre catedral de Reims en Francia. También se utiliza en meteorología, astronomía, balística, geología, hidráulica, etc.



*Imagen No 7-1. Catedral de Reims en Francia.*

*Fuente: <https://www.fadu.edu.uy/viaje2015/files/2015/06/fig01.jpg>*

A lo largo de la historia de la fotogrametría pueden distinguirse tres etapas:

- La fotogrametría ordinaria.
- La estereofotogrametría analítica.
- La tereofotogrametría automática.

Antes del invento de la fotografía, Lambert, matemático, físico y filósofo de origen francés, estableció en 1759 los fundamentos para resolver el problema de la restitución perspectiva.

No fue sino hasta 1858 cuando el francés Laussedat, consiguió obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones de terreno a partir de la fotografía, siendo este el primer inicio de la fotogrametría, que en su día se conoció con el nombre de *fotogrametría ordinaria*.

Dicho método tuvo en vigor hasta el principio del presente siglo; el inconveniente más grande que tenía este sistema era la identificación de un mismo punto en dos fotografías tomadas desde distintos puntos de vista. Aunque se continuaba trabajando con la fotogrametría, se tropezaba con dificultades de importancia, ya que la restitución de un punto implicaba una gran cantidad de cálculos, hasta que en 1901 Pulfrich aplicó el principio de la visión en relieve para efectuar medidas estereoscópicas por medio de un aparato de su invención que se denominó estereocomparador, y con el cual se deducían las coordenadas punto por punto; dando comienzo así a la segunda etapa.

En 1909 se dio el paso definitivo para la consagración de la *fotogrametría terrestre*, gracias al teniente Austriaco Von Orel al construir el aparato denominado estereoautógrafo, primer aparato utilizado para la construcción y dibujo automático de planos, en el caso de ejes ópticos horizontales.

La tercera etapa comienza con el desarrollo de la aviación y las necesidades bélicas de ambos bandos durante la primera guerra mundial, ya que ambos necesitaban obtener fotografías aéreas del campamento contrario, para así planear y organizar un buen ataque. En la fotogrametría aérea la cámara está en movimiento, y para poder efectuar la restitución, es preciso conocer el punto exacto en que se posiciona el fotograma.

Para solucionar este obstáculo y después de diversos ensayos, se tuvo

que volver al antiguo teorema de Terrero-Hauck, el cual permitió conseguir la orientación relativa de cada dos fotografías consecutivas exclusivamente por el método óptico y mecánico. Cuando los rayos luminosos que parten de un objeto P, penetran a través de un pequeño orificio en una caja cerrada (cámara oscura) forman una imagen real e invertida del objeto P, conservando las proporciones del mismo.

La cámara oscura puede considerarse como un antecedente de la cámara fotográfica, en la que el orificio es sustituido por un objetivo, que es una lente o un conjunto de lentes, y la imagen se forma sobre un plano A' B', en el que hay una emulación sensible a la luz, sobre la que se ubica la imagen formada.

En fotogrametría terrestre se opera con cámaras fotográficas montadas sobre un teodolito o taquímetro. Las cámaras fotogramétricas que se emplean para tomar fotografías desde los aviones son poco parecidas a las ordinarias, estando todos sus elementos adaptados al trabajo especial que realizan. Se dividen en dos grandes grupos: cámaras de mano y cámaras automáticas; las primeras se emplean cuando solo se necesitan vistas aisladas o muy poco seguidas y las segundas cuando hay que hacer un gran número de fotografías seguidas.

Las cámaras automáticas, llamadas cinematográficas o toposeriógrafos, son las verdaderas cámaras fotogramétricas aéreas, estas van situadas sobre el piso del avión por intermedio de una suspensión antivibrante y llevan una serie de dispositivos para que las operaciones propias de obtención de fotografía se realicen de un modo automático.

Las cámaras fotogramétricas aéreas están constituidas por las cámaras propiamente dichas, un almacén de negativos y un dispositivo de mando. Para distinguir mejor determinadas especies de árboles cuando se trata de hacer el censo de las existencias forestales, se puede aplicar la fotografía por rayos infrarrojos.

El objeto de la fotogrametría es pasar de la proyección cónica que constituye el fotograma a la proyección ortogonal que es el plano topográfico.

#### División de la Fotogrametría

- La fotogrametría puede ser tanto terrestre como aérea.
- En la fotogrametría terrestre, el punto de vista es fijo, y se determina sus coordenadas, así como la orientación del eje de la cámara.
- En la fotogrametría aérea, por el contrario, el punto de vista está en movimiento y son desconocidas sus coordenadas, así como la dirección del eje de la cámara; por ello es más fácil realizar las restituciones en la terrestre y más sencillas las cámaras utilizadas.

### **7.3 Evolución de la fotogrametría**

Antes de que los drones entraran a escena, las fotografías aéreas se obtenían utilizando avionetas y/o helicópteros, lo cual significaba riesgos y costos muy altos. Las fotografías satelitales también se utilizaban para realizar estos trabajos, pero tampoco tenían buena definición, además los

productos obtenidos eran poco precisos. La evolución de esta técnica ha hecho que avance conforme la tecnología lo facilita.

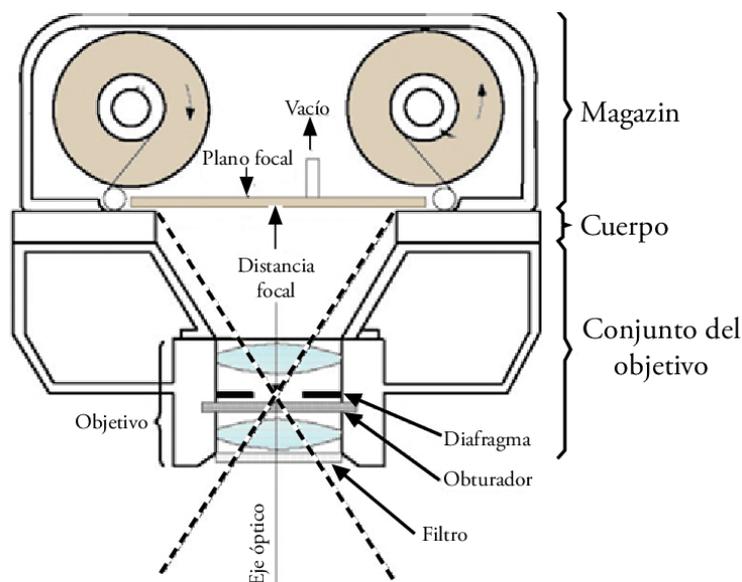
El desarrollo tecnológico ha facilitado y ha hecho más exactos y fiables muchos de los procesos involucrados en esta ciencia. Sin embargo, cuando comparamos la topografía clásica con la terrestre o aérea, aún quedan problemas por resolver. A continuación, se describe en orden cronológico el desarrollo de la fotogrametría.

- **Metrofotografía:** A partir de 1850 hasta 1900 se inicia con la invención de la fotografía por Niepce y Daguerre en 1839 en Francia. El término Metrofotografía fue ideado por el coronel francés Laussedat hacia 1851; a quien se lo considera el fundador de la Fotogrametría.
- **Fotogrametría Analógica:** Desde 1900 a 1960, ciclo que se inicia con dos inventos importantísimos, por un lado, la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría y por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y los aeroplanos.
- **Fotogrametría Analítica:** A partir de 1969 hasta 1980, ciclo iniciado por la aparición de las computadoras.
- **Fotogrametría digital:** Desde 1980 hasta nuestros días, ciclo iniciado a partir del lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik de origen ruso y por el uso del satélite Landsat de origen estadounidense.

## 7.4 Tipos de fotogrametría

En la actualidad se utiliza la fotogrametría digital y la analítica de forma simultánea. Las imágenes fotográficas se pueden tomar desde el aire o a nivel del suelo.

- La fotogrametría analógica fue la primera que se desarrolló y utilizaba este tipo de modelos matemáticos.



*Imagen No 7-2. Componentes de una cámara fotogramétrica analógica.*

Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-83-Componentes-de-una-camara-fotogrametrica-analogica\\_fig26\\_272090105](https://www.researchgate.net/figure/Figura-83-Componentes-de-una-camara-fotogrametrica-analogica_fig26_272090105)

- La fotogrametría analítica se ocupa de aplicar los modelos matemáticos a los objetos fotografiados. Los componentes mecánicos son sustituidos por los electrónicos y la información analógica se organiza de forma analítica.



*Imagen No 7-3. Equipo utilizado en fotogrametría analítica.  
Fuente: Material didáctico visto en clases de especialización.*

- En la fotogrametría digital se inicia el uso de ordenadores y la imagen ahora es digital, no analógica. Para los análisis se empiezan a utilizar programas informáticos que agilizan enormemente el trabajo.



*Imagen No 7-4. Restitución fotogramétrica con el uso de drones y procesada mediante software.*

*Fuente: <https://www.oriondata-i.com/home/index.php/restitucion-fotogrametrica>*

La original fotogrametría terrestre, donde las imágenes se toman desde el suelo, coexisten ahora con la aérea. Esta última apareció junto con la posibilidad de fotografiar desde aviones, satélites o drones. Su utilidad es evidente para la realización de mapas y planos.

### **7.5 Método de la fotogrametría**

Para poder realizar fotogrametría con un dron debemos de tener en cuenta que el dron que estamos empleando debe de ser estable y constante. Esto debe de ser así para poder analizar elementos de la imagen tanto de la parte delantera, trasera y laterales. Esto se hace con el fin de poder tener un mínimo de solapamiento entre las imágenes para después crear el modelado en 3D.

De manera general se puede decir que un buen método fotogramétrico es el siguiente; este contempla las siguientes etapas:

- **Etapas preparatoria:** En primer lugar, los especialistas consideran la documentación del permiso inicial de un edificio o estructura, estudian las características de sus soluciones de planificación, arquitectura y diseño, recopilan información sobre el territorio y los edificios circundantes, además evalúan la accesibilidad para la fotografía aérea.
- **Etapas de trabajo:** En esta etapa se planifican y desarrollan rutas de vuelo automáticas de drones. Luego, el objeto se filma de acuerdo con una misión planificada previamente.

- **Etapa de fotogrametría:** Es cuando ocurre el post procesamiento de imágenes, la corrección de parámetros básicos para conseguir la máxima calidad fotográfica, así como alineación, triangulación y unión de fotografías en una nube de puntos o la creación de un modelo 3D.
- **Etapa de análisis:** Al medir se aplican las dimensiones reales del edificio al ortofoto-mapa. Si se lleva a cabo la detección de fallas, el modelo y la ortofoto se analizan cuidadosamente desde diferentes ángulos. En base a esto, se forma una lista de defectos que contiene información sobre todos los daños en forma de símbolos y marcas. Debido a la máxima precisión de los resultados (hasta 1 mm/píxel), todos los parámetros de los defectos existentes pueden examinarse en detalle.

## 7.6 Fotogrametría con drones

En relación con la fotogrametría en topografía, la fotogrametría con drones puede definirse como la técnica utilizada para realizar mediciones, tanto de dimensiones, como de formas y posición de objetos en el espacio, y a través de la superposición de imágenes captadas, poder realizar mediciones en 3D. Esta técnica permite la generación de planos y mapas con mucha precisión.

La primera ventaja está relacionada con los costes, ya que con desplazamientos sobre el terreno es más difícil cubrir áreas extensas. Como es de esperar, esto es especialmente cierto en zonas de difícil

acceso. Asimismo, el levantamiento del terreno puede realizarse de forma mucho más rápida. Además, el registro de imágenes se hace de forma muy detallada, continua e ininterrumpida, y el trabajo de campo queda reducido al mínimo.

Por otro lado, los aspectos en los que la técnica aérea presenta algún inconveniente. Por ejemplo, en la topografía clásica y la fotogrametría terrestre las coordenadas son conocidas, así como la orientación dada al foco. En cambio, en la aérea, el punto de vista cambia de lugar, aunque por otra parte brinda una gran amplitud. Es necesario digitalizar algunos procesos para resolver este problema. Otra desventaja es la vegetación, que en muchos casos puede ocultar las características del suelo. Esto hace necesario realizar mediciones de campo complementarias. Además, los vuelos pueden demorar o suspenderse debido al clima, duración de batería, detección de zonas con restricción de vuelo, etc.



*Imagen No 7-5. Dron DJI PHANTOM 4 RTK.*

*Fuente: <https://www.ferntech.co.nz/phantom-4-rtk>*

## **CAPÍTULO VIII: GENERALIDADES DE LOS DRONES**

El término dron se ha generalizado mucho. Tanto, que algunos aviones no tripulados reciben esta denominación, aunque no se trata de un dron como tal. Por ello, hemos querido explicar de forma sencilla qué es un dron y qué diferencias hay entre este y otro tipo de aviones no tripulados.

### **Primero: Lo Que No Es Un Dron**

Si se está pensando en aviones de combate que surcan el cielo sin que un piloto tenga que subirse a ellos, en realidad no se trata de un dron. Son aviones no tripulados, que requieren la misma pericia que los aviones tripulados normales. La única diferencia con estos es que en la cabina hay un módulo de control y una cámara, que se controlan a kilómetros de distancia. A veces se les llaman drones de combate, pero no son drones como tales.

Tampoco es un dron los ya famosos vehículos terrestres o anfibios por control remoto. Estos tienen algunas características comunes a las de los drones. Pero a la hora de definir qué es un dron, estos tampoco entran en el significado.

Hay otras denominaciones para definir un dron, que pueden ayudarnos a identificar rápidamente en qué consisten. Algunos reciben el nombre de cuadricópteros, sexacópteros u octacópteros, dependiendo de si tiene 4, 6 u 8 hélices. Por tanto, podemos definir un dron como un vehículo que se controla por control remoto, que para elevarse utiliza la fuerza de giro de sus motores unidos a las hélices.

## **8.1 Funcionamiento de drones**

El funcionamiento de un dron es básicamente el mismo que el de un avión o un helicóptero. Se ponen en marcha los motores y las aletas se mueven para posibilitar el vuelo. Después, con los mandos de control se va dirigiendo el vuelo, que dependerá en gran medida de los conocimientos y la pericia del piloto. En algunos casos, es posible fijar un rumbo de forma automática. Los modelos que lo permiten incorporan un GPS que permite ir corrigiendo el vuelo y ajustarlo hasta llegar al punto indicado. Estos se sumen usar para realizar rondas de observación cíclicas, sin que haga falta un piloto que lo controle. Simplemente se observa lo que recoge la cámara, que se envía en tiempo real o se graba dependiendo del caso.

Aunque podemos pensar que los cuadricópteros o drones son una novedad y surgieron hace poco tiempo, no es verdad. Los primeros modelos se remontan al 1922, aunque el diseño y las posibilidades de control eran bastante diferentes. La tecnología de materiales, que ha logrado que cada vez sean más ligeros, así como la miniaturización de componentes, hace posible que hoy contemos con drones de tamaños y prestaciones muy diversas. Desde los mini drones de recreo hasta los destinados a control y vigilancia, hay un amplio listado de modelos.

## **8.2 Tipos de Drones Según su Estructura**

En primer lugar, hay que destacar la clasificación de drones según su estructura o forma, pudiéndose hacer dos distinciones básicas:

- De ala fija
- De ala rotatoria

### **Drones de ala fija**

Los drones de ala fija son aquellos que aprovechan la aerodinámica para su elevación. Tienen una composición similar a los aviones, con un cuerpo alargado y unas alas, que salen del cuerpo principal central, que generan la fuerza de sustentación en el aire.

Las ventajas de los drones de ala fija es que normalmente tiene una mayor eficiencia energética respecto a los de ala rotatoria, por lo que son perfectos para vuelos de largo alcance y duración.

Entre sus principales usos, esta categoría de drones se utiliza para fotogrametría, agricultura de precisión y vigilancia, entre otros. Son capaces de cubrir grandes áreas en un solo vuelo y pueden ser equipados con cámaras y sensores especiales para recopilar datos y generar mapas y modelos 3D de alta resolución.

## **Drones de ala rotatoria**

Entre los tipos de UAV se destacan los drones de ala rotatoria o multirrotores. Son los más comunes en el mercado actual por su versatilidad, los cuales logran su sustentación por medio de las hélices impulsadas por motores que se ubican en cada uno de sus brazos.

Este tipo de drones son bastante estables, por lo que son muy usados para realizar todo tipo de actividades. Desde show de luces con drones, sistemas de vigilancia, seguridad e intervenciones de emergencia, o incluso grabaciones aéreas para cine y televisión.

Gracias a las características de los drones de ala rotatoria, es posible que estos UAVs puedan mantenerse en el aire sobrevolando un mismo punto, y tienen la habilidad de elevarse y aterrizar de manera vertical, por lo que se pueden usar en espacios reducidos si se tiene un correcto control de manejo.

Éstos a su vez se subdividen en distintas clases de drones, según el número de hélices o brazos que posean.

### **8.3 Tipos de drones según el número de hélices o brazos**

Una de las maneras de identificar los diferentes tipos de drones que existen es de acuerdo a la cantidad de motores o brazos que lo conforman. Ésta es la clasificación de los drones más usada, ya que utiliza el aspecto del dron para poder diferenciarlos entre ellos, por lo tanto, es sencillo identificarlos.

Éstos pueden ser distintos tamaños y con funciones diversas, pero su característica principal es la cantidad de brazos que poseen y por consiguiente la cantidad de hélices. En esta clasificación podemos encontrar 5 tipos de drones:

- Tricópteros
- Cuadricópteros
- Hexacópteros
- Octocópteros
- Coaxiales

#### **Tricópteros**

Como su nombre indica, este tipo de dron tricóptero tiene 3 brazos. En este caso, cada uno de los brazos delanteros cuenta con un motor que gira en sentido opuesto para generar la potencia. Por su parte, el motor trasero cumple la función de servomotor para ofrecer estabilidad en el vuelo.

## **Cuadricópteros**

Probablemente éste es el tipo de dron más común en el mercado. Se trata de un vehículo aéreo que cuenta con 4 brazos y en cada uno de ellos se posiciona un motor. Gracias a su configuración equidistante ofrecen gran estabilidad.

## **Hexacópteros**

Los hexacópteros son drones que cuentan con 6 brazos y 6 motores. Éstos son los más usados en el campo profesional para lograr tomas aéreas de gran calidad, gracias a que cuentan con una excelente estabilidad, lo cual permite que se puedan instalar cámaras y realizar grabaciones de nivel profesional.

Otra de las ventajas de este tipo de drones es que ofrecen una mayor seguridad, ya que, en caso de avería de alguno de los motores, es posible aterrizar el dron sin mayores problemas solo con la propulsión de los demás motores.

## **Octocópteros**

Tal como su nombre lo indica, son drones que cuentan con 8 brazos y 8 motores. Su capacidad de estabilización es aún mayor que la que ofrecen los hexacópteros, sin embargo, tienen la desventaja que al tener más componentes son más grandes y pesados. Es por ello que pueden llegar a ser difíciles de controlar en espacios pequeños.

## Coaxiales

Otro de los tipos de drones que se pueden encontrar en el mercado son los drones coaxiales, los cuales son los tipos de drones que en cada brazo tiene 2 motores. Gracias a esta característica son mucho más potentes, por lo que pueden transportar objetos o elevarse a gran altura con mayor facilidad.

También son ampliamente utilizados en el ámbito profesional, para hacer tomas aéreas de gran calidad o para hacer tareas específicas que requieran de la movilización de objetos. Sin duda, el dron coaxial es uno de los más versátiles.

Algunos tipos de drones más utilizados:



Imagen No 8-1 Drones más utilizados.

Fuente: <https://idc.apddrones.com/fotogrametria/fotogrametria-con-drones-todo-lo-que-debes-saber/>

#### **8.4 Tipos de sensores en los drones**

El sensor es la parte principal del dron y el que distingue el uso profesional del uso amateur de los drones. Un buen sensor definirá la calidad del producto y la utilidad del dato capturado.

El tipo más básico de sistema de detección de obstáculos es el sensor ultrasónico. Este sistema utiliza ondas de sonido para detectar objetos en el camino del dron. Las ondas de sonido se emiten desde el dron y rebotan en cualquier objeto en el camino, lo que permite que el dron las detecte y las evite. Los sensores ultrasónicos son relativamente económicos y fáciles de instalar, lo que los convierte en una opción popular para muchos operadores de drones.

Otro tipo de sistema de detección de obstáculos es el sensor de infrarrojos. Este sistema utiliza luz infrarroja para detectar objetos en el camino del dron. La luz infrarroja se emite desde el dron y se refleja en cualquier objeto en el camino, lo que permite que el dron los detecte y los evite. Los sensores infrarrojos son más caros que los sensores ultrasónicos, pero son más precisos y pueden detectar objetos a distancias mayores.

El tercer tipo de sistema de detección de obstáculos es el sistema lidar. Este sistema utiliza láseres para detectar objetos en el camino del dron. Los láseres se emiten desde el dron y rebotan en cualquier objeto en el camino, lo que permite que el dron los detecte y los evite. Los sistemas Lidar son el tipo de sistema de detección de obstáculos más caro, pero

también son los más precisos y pueden detectar objetos a distancias mayores.

Por último, está el sistema de visión artificial. Este sistema utiliza cámaras y algoritmos de procesamiento de imágenes para detectar objetos en el camino del dron. Las cámaras están montadas en el dron y toman fotografías del entorno, que luego son procesadas por los algoritmos para detectar cualquier objeto en el camino. Los sistemas de visión artificial son el tipo de sistema de detección de obstáculos más avanzado, pero también son los más caros.

Cada tipo de sistema de detección de obstáculos tiene sus propias ventajas y desventajas y es importante tener en cuenta todos estos factores al elegir el sistema adecuado para su dron. En última instancia, el mejor sistema para usted dependerá de su presupuesto, el entorno en el que vuele y el tipo de obstáculos que probablemente encuentre.

Las cámaras se clasifican según tres categorías de sensores:

## 1. Cámaras térmicas



Imágen No 8-2. Termografía o Cámara térmica RGB E10T para dron, fuente: <https://droneval.com/yuneeec/-2945camara-termica-rgb-e10t-para-dron>

Una cámara termográfica (o cámara térmica) es un dispositivo que mide la temperatura y ofrece una imagen térmica de los objetos, sin necesidad de contacto, a partir de las emisiones de radiación infrarroja de estos. Sus aplicaciones son diversas en función de si son radiométricas (son capaces de medir valores de temperatura) o simplemente detectan variaciones de temperatura.

Las cámaras termográficas radiométricas se emplean para detectar fallos en redes de distribución eléctrica, parques fotovoltaicos, parques eólicos y otras instalaciones industriales.

Las cámaras no radiométricas no realizan mediciones cuantitativas de temperatura y simplemente detectan variaciones de éstas por lo que son útiles para detectar puntos calientes: por ejemplo, para la búsqueda de personas, animales o detección de fugas.

## 2. Sensores multiespectrales



Imágen No 8-3. *DJI P4 Multispectral RTK* fuente:  
<https://dronespro.com.mx/products/dji-p4-multispectral-rtk>

Una cámara multiespectral, como su propio nombre indica, es una cámara que es capaz de captar varios espectros de luz. Estas cámaras permiten la monitorización de los pequeños cambios de radiación visible e infrarroja que refleja la planta por lo que son usadas principalmente en agricultura de precisión.

A partir de las imágenes multiespectrales que captan este tipo de sensores se pueden calcular diferentes índices de vegetación que nos indican la salud y el bienestar de la vegetación. Para calcular un índice de vegetación es necesario combinar varias bandas del espectro visible o invisible de la cámara.

El índice más conocido es el NDVI (*normalized difference vegetation index*) mediante el cual podremos calcular el vigor de la planta, es decir,

su estado metabólico. Pero hay muchos otros índices que son de interés y que se pueden obtener con estas cámaras: GNVDI, RVI, GVI, NGRDI, RG, SAVI...

### 3. Sensores para mapping con cámaras de alta definición

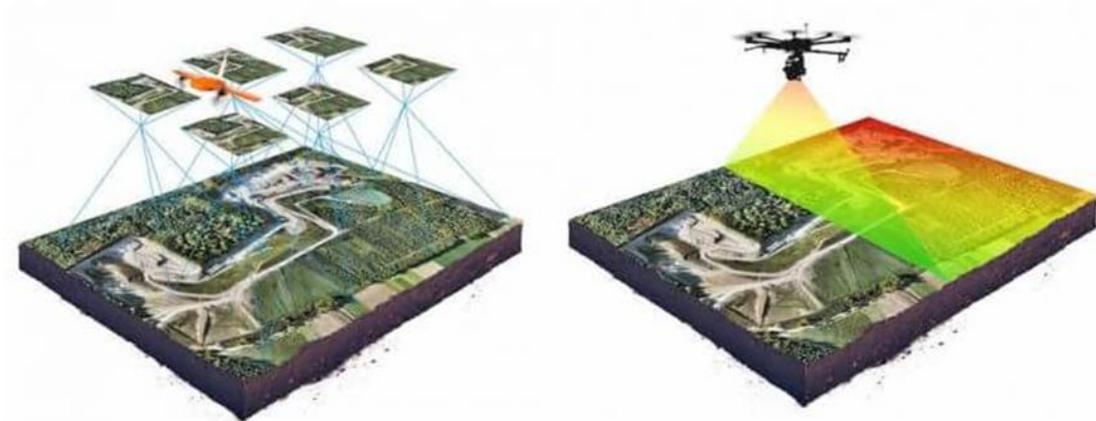


Imagen No 8-4. *Sensores para Mapeo o Cartografía en drones.*  
fuente: <https://wingtra.com/category/drone-know-how/>

La tecnología de fotogrametría aérea está desarrollada en la industria internacional de cartografía y teledetección. La fotogrametría oblicua y nadir captura imágenes desde múltiples direcciones combinando la imagen tradicional ortogonal (nadir) con imágenes oblicuas a través de múltiples sensores colocados en una plataforma voladora.

El desarrollo de cámaras de alta definición y cámaras combinadas en un mismo equipo buscan optimizar la captura de datos, minimizando el número de vuelos y mejorando la captura de elementos verticales para su mejor reconstrucción.

## CAPÍTULO IX: RECONOCIMIENTO EN CAMPO

### 9.1 Descripción del lugar de levantamiento

El área de estudio se sitúa en el sector sur-poniente del Aeropuerto Internacional de Ilopango, aledaño a la Residencial Santa Lucía, municipio de Ilopango, departamento de San Salvador, la cárcava corresponde a la Quebrada Santa Lucía, afluente del Río Chagüite, que descarga en el Lago de Ilopango. Lugar en el que se encuentran 97 familias en zona considerada de alto riesgo según un informe de la Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Gestión Estratégica del Riesgo (DACGER), dependencia del Ministerio de Obras Públicas (MOP), dato del año 2019.

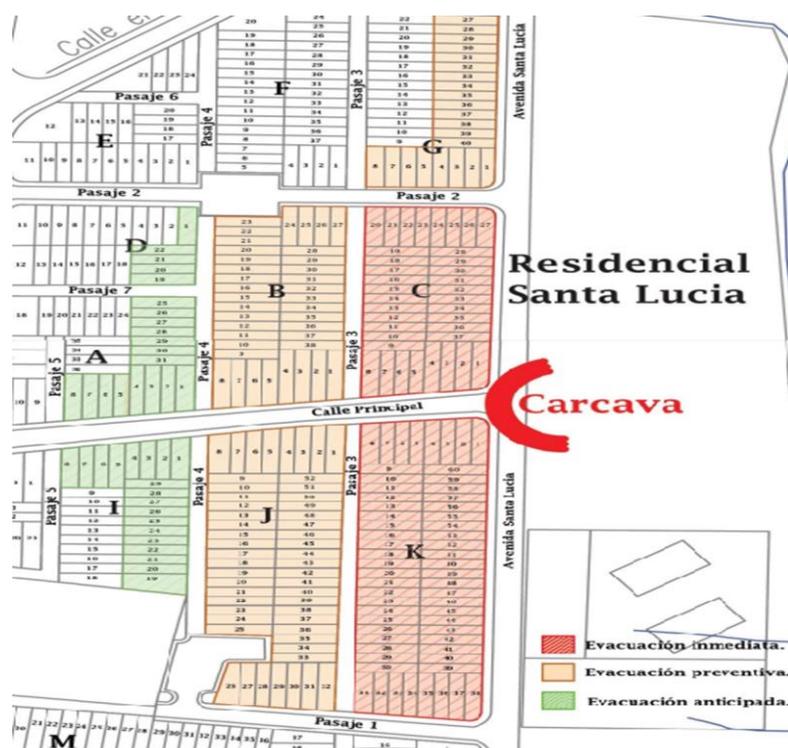


Imagen No 9-1. Residencial Santa Lucía.

Fuente: Informe De Seguimiento A Cárcava En Colonia Santa Lucía. Ilopango, San Salvador. Mop-Dacger-30-2019.

En la siguiente imagen se muestra el cerro de interés, los costados han sido erosionados formando un talud. Este material clasificado como “tierra blanca joven” es altamente erosionable; la escorrentía superficial formada por la lluvia ha ido esculpiendo el terreno como se muestra en la siguiente imagen.



*Imagen No 9-2. Quebrada El Chagüite, al frente el cerro de interés con vegetación en la parte superior, forma un talud debido a la erosión del costado de la quebrada*

*Fuente: Elaboración Propia*

## **9.2 Medición GPS de estación de referencia**

Para obtener coordenadas de la estación de referencia se realizó la medición GPS con la técnica de medición estática con un tiempo de observación satelital dos horas.

Posteriormente para obtener la posición geográfica absoluta, se utilizó el Servicio de Posicionamiento en Línea denominado: Online Positioning User Service (OPUS) por sus siglas en inglés.

Este servicio en línea es una plataforma tecnológica, que forma parte del National Geodetic Survey (NGS) y del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos.

FILE: STALUCIA.23o OP1692837963446

NGS OPUS SOLUTION REPORT

=====

All computed coordinate accuracies are listed as peak-to-peak values.  
For additional information: <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/about.jsp#accuracy>

USER: MM15033@ues.edu.sv  
RINEX FILE: stal231r.23o

DATE: August 24, 2023  
TIME: 00:46:47 UTC

SOFTWARE: page5 2008.25 master293.pl 160321	START: 2023/08/19 17:09:00
EPHEMERIS: igr22756.eph [rapid]	STOP: 2023/08/19 20:00:00
NAV FILE: brdc2310.23n	OBS USED: 4476 / 5749 : 78%
ANT NAME: HEMS320 NONE	# FIXED AMB: 46 / 55 : 84%
ARP HEIGHT: 0.93	OVERALL RMS: 0.023(m)

REF FRAME: NAD\_83(2011)(EPOCH:2010.0000)

ITRF2014 (EPOCH:2023.6322)

X: 94679.811(m) 0.068(m)	94679.301(m) 0.068(m)
Y: -6197946.661(m) 0.039(m)	-6197944.934(m) 0.039(m)
Z: 1499823.894(m) 0.030(m)	1499823.624(m) 0.030(m)
LAT: 13 41 24.13561 0.020(m)	13 41 24.14044 0.020(m)
E LON: 270 52 30.65538 0.068(m)	270 52 30.63929 0.068(m)
W LON: 89 7 29.34462 0.068(m)	89 7 29.36071 0.068(m)
EL HGT: 588.397(m) 0.044(m)	586.648(m) 0.044(m)
ORTHO HGT: [No NGS Geoid Model Available.]	

*Imagen No 9-3. Reporte obtenido de OPUS.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

La coordenada obtenida en OPUS se usará luego para hacer el levantamiento de los puntos de control usados para el levantamiento fotogramétrico.



*Imagen No 9-4. Vértice geodésico.  
Fuente: Elaboración Propia.*



*Imagen No 9-5. Mojón usado para el vértice geodésico.  
Fuente: Elaboración Propia.*

### **9.3 Medición RTK de los Puntos de Control Fotogramétricos (PCF)**

Se utilizará la técnica RTK para la medición con equipo GPS Carlson de los puntos de control fotogramétricos.



*Imagen No 9-6. Equipo GPS usado para el levantamiento de los puntos de control.  
Fuente: Elaboración Propia*

### 9.3.1 Ubicación de los Puntos de Control Fotogramétricos (PCF) en campo

Se usará lona y dianas para ubicar los puntos de control fotogramétricos como se muestra en las siguientes imágenes. Las dianas fueron pintadas usando spray rojo, se ubicarán estratégicamente a lo largo de la cárcava y sin ningún obstáculo para que pudiera ser capturados en las imágenes por el dron.



*Imagen No 9-7. Lonas con equipo Carlson GPS.*

*Fuente: Elaboración Propia*



*Imagen No 9-8. Llevando lonas a su lugar para levantamiento de puntos de control.*

*Fuente: Elaboración Propia*

En la siguiente imagen se muestra la ubicación de los puntos de los puntos de control fotogramétricos usados.



*Imagen No 9-9. Puntos de Control Fotogramétricos (PCFs).*

*Fuente: Elaboración Propia*

### 9.3.2 Medición con RTK

Se procedió primero a Ubicar el equipo base Carlson GPS en la coordenada de referencia como se muestra en las siguientes imágenes.



*Imagen No 9-10. Colocación de trípode.*

*Fuente: Elaboración Propia*



*Imagen No 9-11. Equipo Utilizado.*

*Fuente: Elaboración Propia*

Posteriormente con el equipo GPS ROVER, se realizó la medición de los PCF estratégicamente ubicados en la cárcava.



*Imagen No 9-12. Levantando punto de control con el uso del rover.  
Fuente: Elaboración Propia*



*Imagen No 9-13. Puntos de control en quebrada. Fuente: Elaboración Propia*

## CAPÍTULO X: PLAN DE VUELO

### 10.1 DJI GO 4

Para llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico se usó el programa DJI GO 4. Este programa o aplicación está disponible tanto para Android como para IOS y admite drones como los modelos Inspire 2, Phantom 4, Phantom 4 Pro, etc.



Imagen No 10-1. Logo de DJI GO 4.

Fuente: <https://dji-go-4.es.aptoide.com/app>

Este proporciona una interfaz amigable con la cual se pueden hacer todas las configuraciones de los parámetros necesarios del dron.



Imagen No 10-2. Interfaz de Pix4Dcapture.

Fuente: Trabajo de Graduación: Restitución Fotogramétrica de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por Flor Alejandra Carbajal Ponce y otros.

## 10.2 Configuración de Return to Home (RTH) por batería baja

La batería es un elemento importante ya que para evitar accidentes del equipo se debe encender la opción RTH la cual hará que el dron regrese al sitio de despegue del vuelo cuando la batería ha alcanzado cierto porcentaje, en nuestro caso se dejó configurado que el dron regrese automáticamente cuando la batería alcanzara el quince por ciento de su carga.

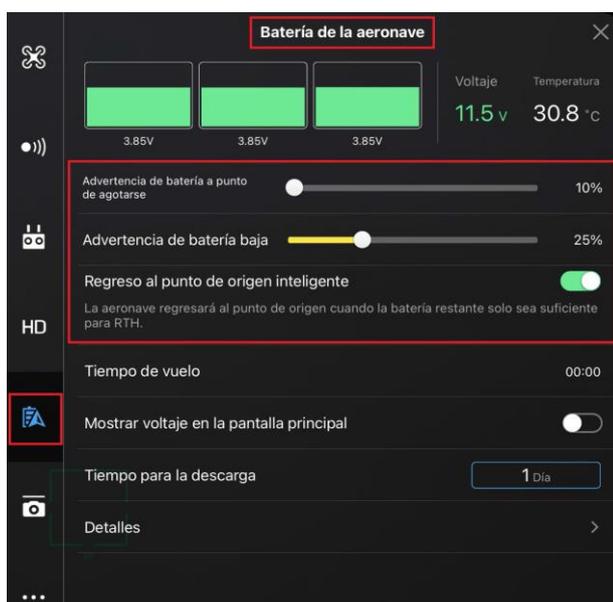


Imagen No 10-3. Interfaz de batería en DJI GO 4.

Fuente: Trabajo de Graduación: Restitución Fotogramétrica De La Facultad De Ingeniería Y Arquitectura De La Universidad De El Salvador, por Flor Alejandra Carbajal Ponce y otros.

En la siguiente imagen se muestra otras configuraciones que se hicieron en el programa DJI GO 4 como lo son el sistema de anticolidión, la anticolidión horizontal, etc.

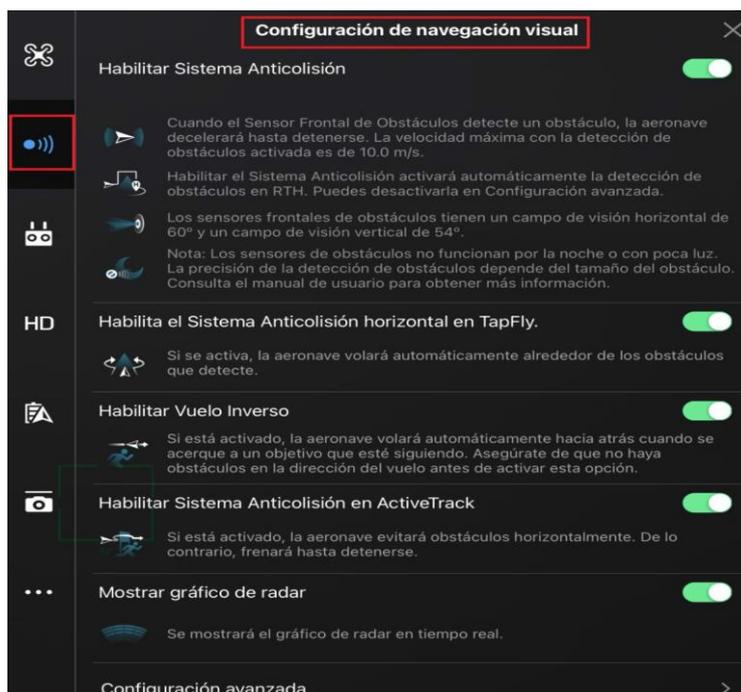


Imagen No 10-4. Interfaz de batería en DJI GO 4.

Fuente: Trabajo de Graduación: Restitución Fotogramétrica De La Facultad De Ingeniería Y Arquitectura De La Universidad De El Salvador, por Flor Alejandra Carbajal Ponce y otros.

### 10.3 Plan de vuelo con Pix4Dcapture

Para procesar el levantamiento se usó el software llamado Pix4Dcapture, este es un software especializado para levantamientos fotogramétricos en 2 y 3 dimensiones, este programa ayuda planificar un levantamiento fotogramétrico con dron.

Muchos factores afectan la calidad del levantamiento, la calidad depende del número de imágenes o fotos que se tomen, así como también la altura del vuelo, área, etc. Para llevar a cabo el levantamiento se configuró para realizar un levantamiento o misión de doble cuadrícula.

A continuación, se presentan los pasos que se siguieron para planificar la misión de vuelo.

- Primero del software Pix4D se selecciona el tipo de dron que se está usando. En nuestro caso se usó el dron Phantom 4.



*Imagen No 10-5. Dron Phantom 4.*

*Fuente: <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4>*

- Luego se selecciona el tipo de misión que en nuestro caso se debe seleccionar una misión de doble cuadrícula "Double Grid Mission", esta es la opción para modelos en 3D.



*Imagen No 10-6. Opción de Double Grid para modelos 3D.*

*Fuente: Trabajo de Graduación: Restitución Fotogramétrica De La Facultad De Ingeniería Y Arquitectura De La Universidad De El Salvador, por Flor Alejandra Carbajal Ponce y otros.*

- Se debe ajustar el área, la altura de vuelo, tiempo de vuelo, etc. En nuestro plan de vuelo la altura que se seleccionada fue de 60 m ya que a esta altura se optimizó el tiempo de vuelo del dron y se ajustaba justo al tiempo de duración de la batería. El tiempo de vuelo fue de catorce minutos. Además, se configuró el retorno inteligente del dron el cual hace que el dron regrese al punto de despegue cuando la batería llega a un punto crítico de quince por ciento en nuestro caso.



Imagen No 10-7. Ejemplo de área de vuelo.

Fuente: Elaboración propia

- Para dar inicio al vuelo se debe presionar el botón de Start, el dron automáticamente despega y toma las fotos de acuerdo al plan de vuelo y área asignada.



Imagen No 10-8. Ejemplo de botón de inicio del programa Pix4D.

Fuente: Elaboración propia

- Luego de finalizar la misión se pueden descargar las fotos tomadas por el dron para su análisis y procesamiento.

#### **10.4 Descripción del plan de vuelo**

Los parámetros esenciales para llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico tomados en cuenta en este presente trabajo son el tiempo de vuelo, la altura de vuelo, el GSD, entre otros, a continuación, se da una descripción de cada uno de los parámetros usados en el levantamiento con dron llevado a cabo en la cárcava de quebrada el Chagüite.

**Área:** La cárcava del Chagüite es de gran extensión por lo que nos concentramos en un talud únicamente el cual es parte de un cerro el cual ha sido erosionado, el área es de aproximadamente de 80,000  $m^2$ .

**Tiempo de vuelo:** Para el tiempo de vuelo se tomó en consideración la extensión o área de vuelo definida, ya que fue un área muy extensa se adecuó de manera tal que la batería durará lo suficiente para completar el vuelo asignado, el tiempo de vuelo fue de 13 min, lo cual fue suficiente para que el dron completara la misión.

**Altura de vuelo:** Esta se definió de tal manera que no afectara el tiempo de vuelo ya que a menor altura menor duración de la batería, tomando en cuenta esto se definió la altura a 60 m medidos desde el punto o cota del que se elevó el dron. Además, se configuró el Retorno Inteligente al punto de partida RTH.

**GSD:** El “Average Ground Sampling Distance” o GSD es un parámetro que depende del área de vuelo, la altura, etc. A menor GSD mayor

resolución de las fotos tomadas por el dron, en el caso del levantamiento ejecutado el GSD resultó ser de 2.90 cm por pixel.

### **10.5 Armado De Dron Phantom 4 para despegue**

**Dron y accesorios a usar:** Primero se debe verificar que el dron esté en óptimas condiciones y que todos sus accesorios estén en la caja tales como las hélices, las baterías, control, etc. Estas últimas deben estar completamente cargadas y se recomienda que siempre deben ser dos, una principal que se usará para el vuelo y la segunda batería para emergencia o en caso el tiempo de vuelo sea mucho para terminarlo con la carga de una sola batería.

**Instalación de hélices:** Este dron usa cuatro hélices, un par de hélices son de color negro al centro, y el segundo par son de color gris al centro, la diferencia es únicamente en la manera en como estas se acoplan al dron.



*Imagen No 10-9. Ensamble de hélices.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Colocación de la batería:** Esta se introduce en el compartimento para batería del dron haciendo presión suficiente hasta escuchar un sonido que indica que la batería se acopló correctamente. La batería sólo debe sacarse del estuche únicamente cuando se vaya a comenzar con el vuelo, no se debe exponer la batería al sol o a fuentes de calor.

**Preparación del control remoto:** Se toma el control de su estuche y con cuidado se despliega sus antenas, estas antenas deben señalar al dron al momento del vuelo para que la telemetría no tenga ningún problema. También, se debe ajustar la base del control para colocar el dispositivo móvil ya sea un Android o un IOS. Se conecta el dispositivo al control por medio de un cable.



*Imagen No 10-10. Control remoto con dispositivo IOS.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Encendido de dron y control remoto:** Para encender el dron se presiona el botón de encendido una vez y en seguida una segunda vez manteniéndolo sostenido por 3 a 5 segundos, se observará en el dron una luz de batería que va cargando continuamente hasta que el dron enciende para apagar el dron se hace el mismo proceso; en el caso del control

remoto se enciende y apaga exactamente de la misma manera que el dron.



*Imagen No 10-11. Encendido de dron.  
Fuente: Elaboración Propia.*

**Lugar de despegue:** El lugar de despegue del dron fue en un área abierta libre de obstáculos, sin árboles y sin cables de cualquier tipo que evitará la elevación del dron. Al mismo tiempo se tuvo el cuidado de usar una máscara de elevación adecuada, el lugar estaba libre de interferencias electromagnéticas y sobre todo se hizo el despegue en un lugar con buena visualización para evitar cualquier accidente con el dron.



*Imagen No 10-12. Plan de vuelo en el lugar*

*Fuente: Elaboración Propia*

Al finalizar el vuelo con el dron y luego de levantar los puntos de control se procedió a descargar el archivo con las fotografías tomadas y obtener el archivo txt de los puntos de control para luego comenzar con el procesamiento de los datos obtenidos.

## **CAPÍTULO XI: PROCESAMIENTO DE DATOS**

### **11.1 Procesamiento de datos con el software Pix4D**

Pix4D es un software de procesamiento de imágenes que se utiliza para generar modelos y mapas en 3D a partir de imágenes obtenidas por drones y dispositivos móviles. El software utiliza algoritmos avanzados y técnicas de procesamiento fotogramétrico para generar nubes de puntos, modelos digitales de superficie y ortomosaicos de alta resolución. Además, Pix4D también ofrece dispositivos de captura de datos, como cámaras y sensores, que complementan el software. Este software es muy versátil y se puede utilizar en diversas industrias que requieren información detallada y precisa.

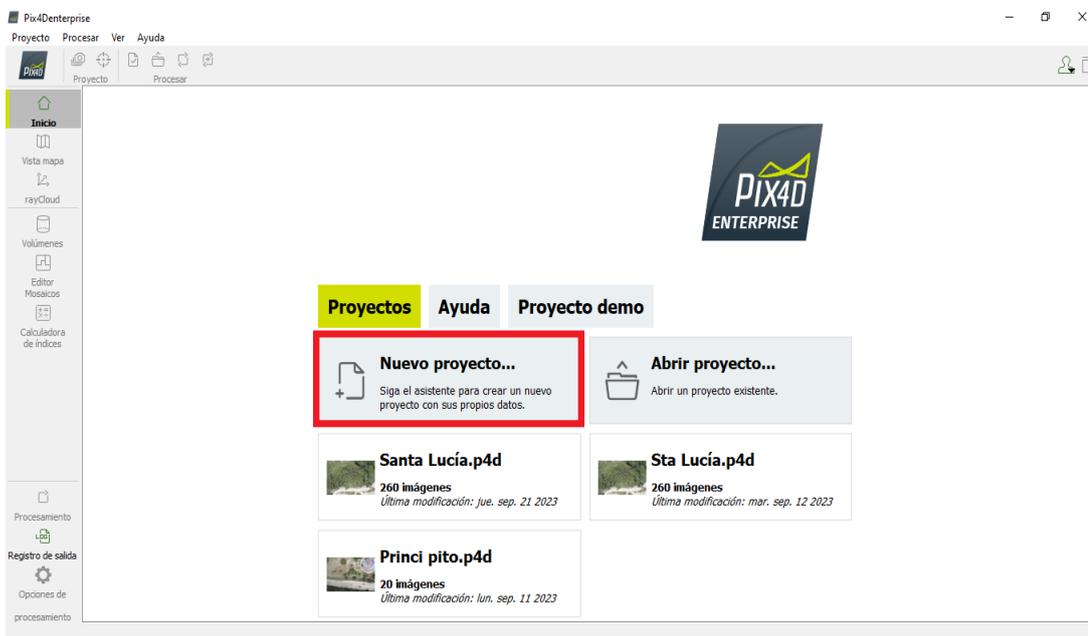
Pix4D tiene aplicaciones específicas en la inspección aérea y la fotogrametría con drones. Estas aplicaciones permiten generar modelos y mapas en 3D que ayudan a comprender mejor un área de interés y simplificar las tareas, lo que aumenta la productividad y reduce los costos operativos.

En el campo de la construcción, las imágenes aéreas obtenidas por drones se pueden utilizar para mapear, medir, analizar e informar sobre el progreso de los proyectos. Pix4D se utiliza para realizar levantamientos topográficos, registros visuales de excavación, medición de volúmenes y trabajos de ingeniería de detalle, entre otros.

Una de las principales ventajas de Pix4D es que permite crear una réplica digital de cualquier producto o infraestructura física usando las imágenes registradas por un dron u otro equipo. Esto permite realizar análisis avanzados, monitorizar y predecir el estado de un producto o proceso físico.

## 11.1.2 Paso 1: Procesamiento Inicial

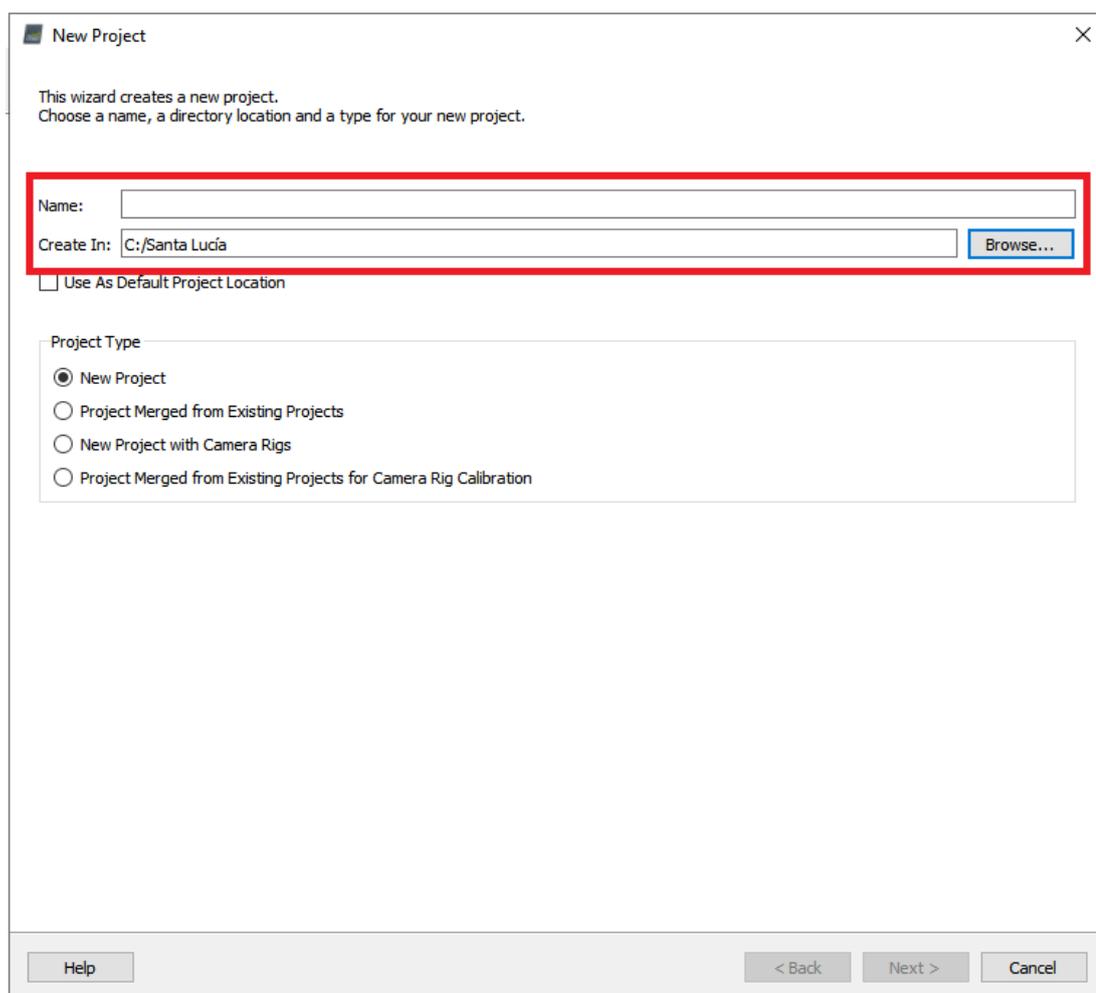
Como en cualquier software de procesamiento se debe iniciar creando un proyecto nuevo



*Imagen No 11-1. Interfaz inicial de PIX4DMapper.*

*Fuente: Elaboración propia.*

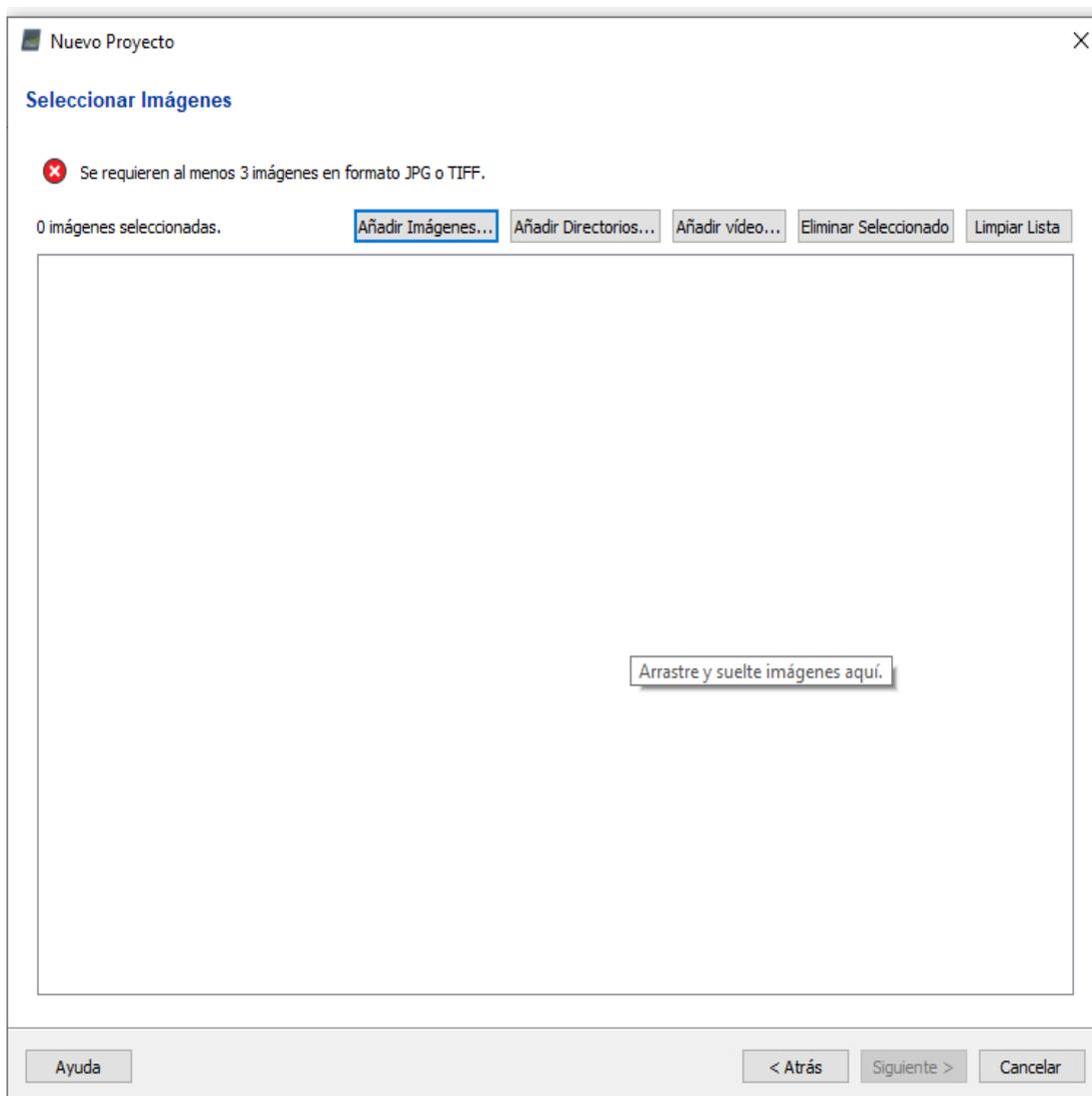
A continuación se introduce el nombre y ruta que tendrá el trabajo, deberá guardar en el disco C:/.



*Imagen No 11-2. Interfaz inicial de PIX4DMapper.*

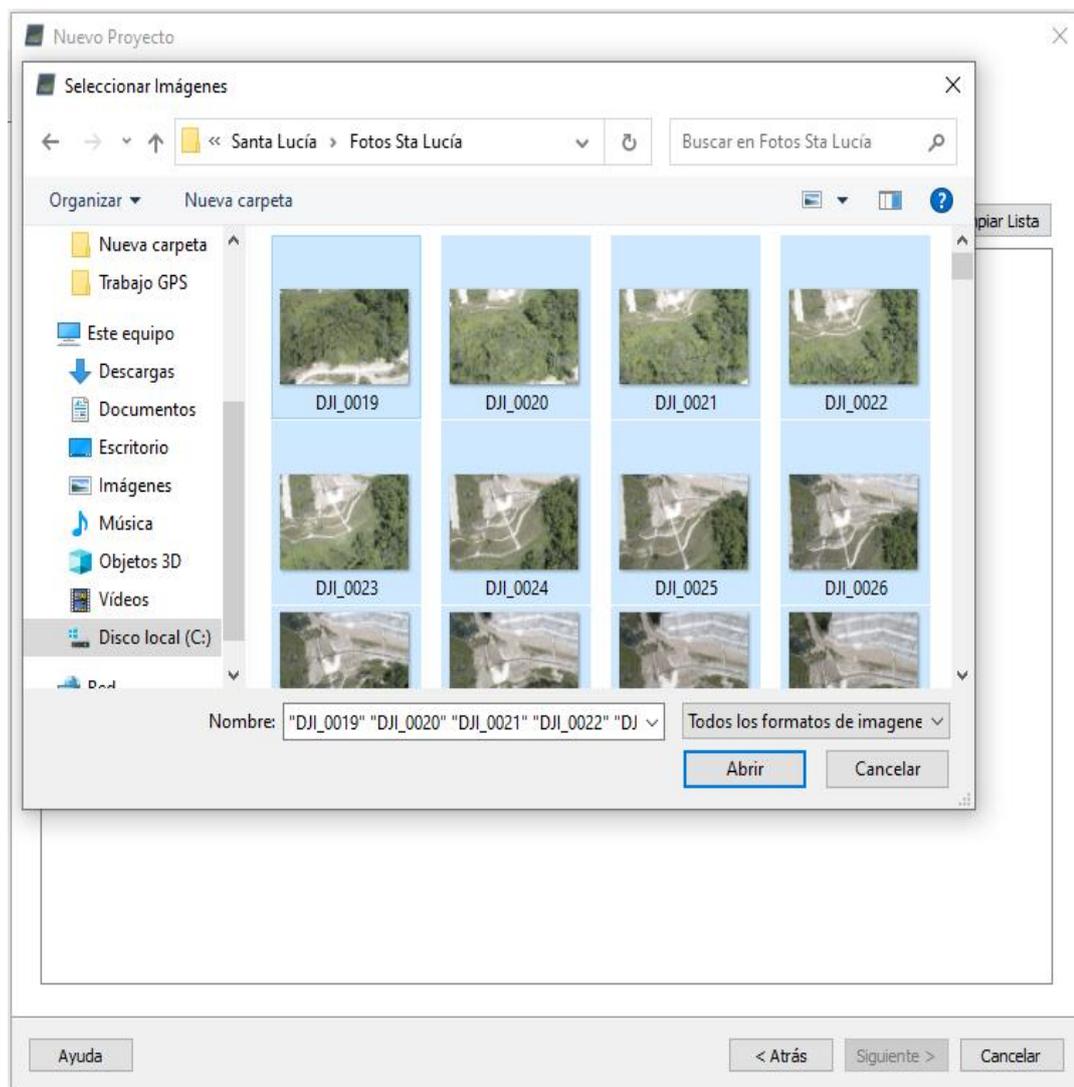
*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez creado el proyecto se procederá a seleccionar la pestaña “Añadir Imágenes” para añadir las fotos que se desean procesar.



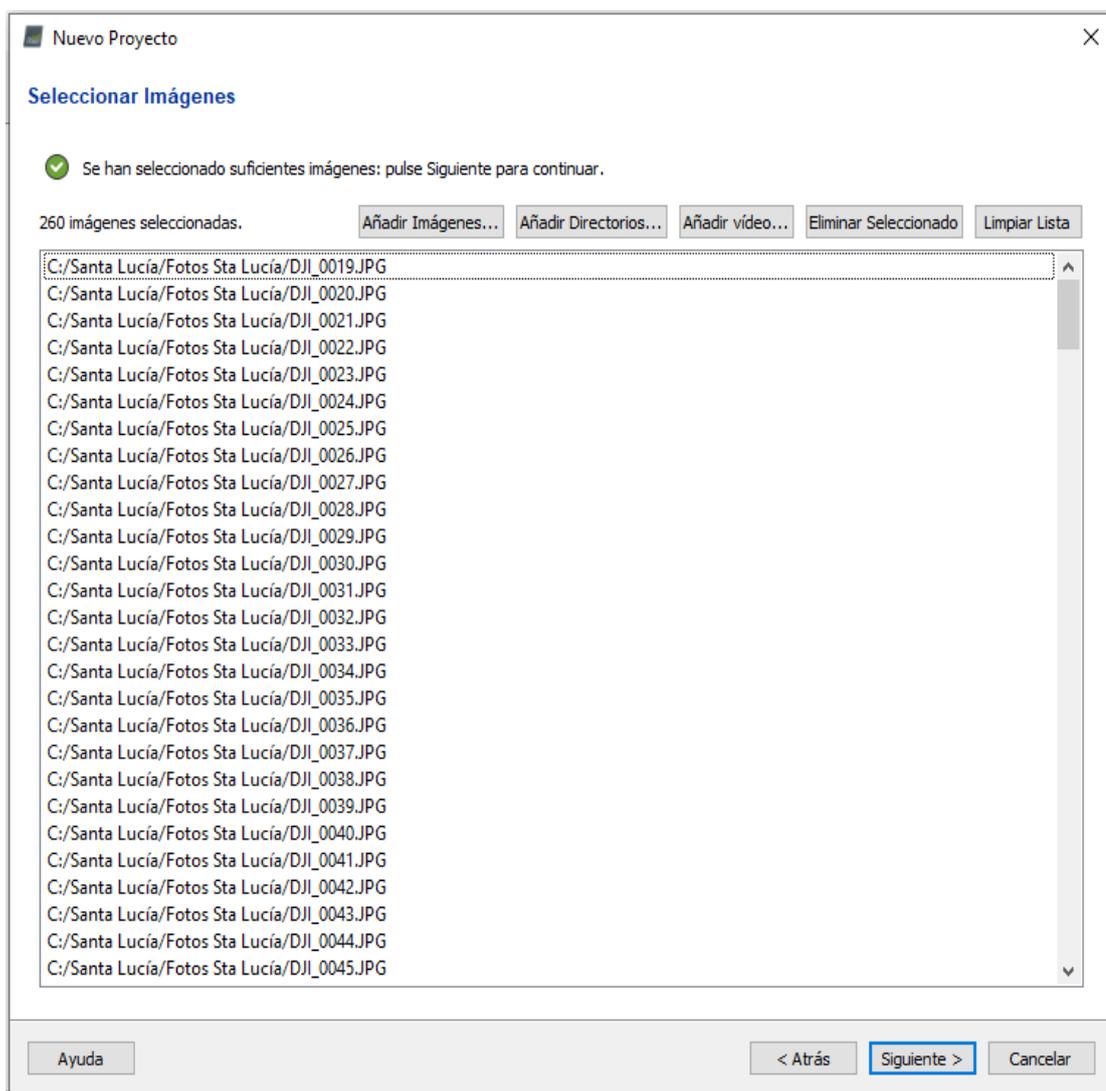
*Imagen No 11-3. Ventana de selección de imágenes.  
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez abierta la ventana de ubicación de archivos, de procederá a buscar la ruta en la que se encuentran las fotografías a procesar, se seleccionarán y hará clic en “Abrir”.



*Imagen No 11-4. Importación de Imágenes.  
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez verificado el número de fotografías y su orden, se seleccionará “Siguiente”.



*Imagen No 11-5. Subida de Imágenes.  
Fuente: Elaboración propia.*

El software leerá la información EXIF de cada una para registrar su geolocalización, EXIF (Exchangeable image file format) es una especificación para formatos de archivos de imagen usado por las cámaras digitales.

Nuevo Proyecto

### Propiedades de Imagen

Geolocalización de Imágenes

Sistema de Coordenadas

 Datum: World Geodetic System 1984; Sistema de Coordenadas: WGS 84 (EGM 96 Geoid) [Editar...]

Geolocalización y Orientación

Imágenes Geolocalizadas: 260 de 260 [Limpiar] [De EXIF] [De Fichero...] [A fichero...]

Precisión de geolocalización:  Estándar  Baja  Personalizado

Modelo de Cámara Seleccionado

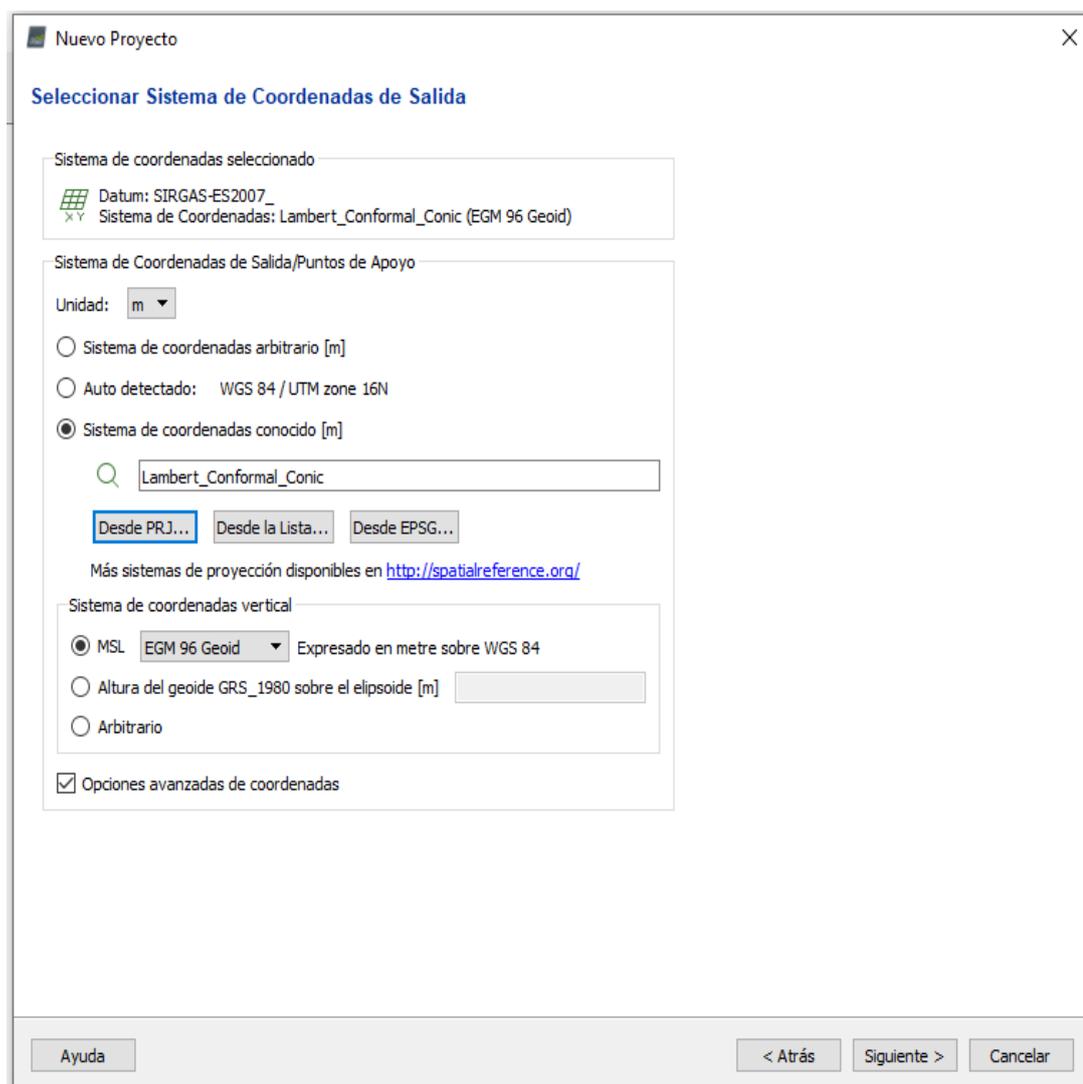
 FC6310\_8.8\_5472x3648 (RGB) [Editar...]

Activada	Imagen	Grupo	Latitud [grado]	Longitud [grado]	Altitud [m]	Precisión Horz [m]	F
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0019.JPG	group1	13.68846072	-89.12456000	628.056	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0020.JPG	group1	13.68853967	-89.12452753	628.056	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0021.JPG	group1	13.68862872	-89.12449336	628.056	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0022.JPG	group1	13.68871181	-89.12446261	628.056	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0023.JPG	group1	13.68879292	-89.12443308	627.956	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0024.JPG	group1	13.68887467	-89.12440275	627.956	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0025.JPG	group1	13.68895592	-89.12437136	628.056	5.000	10.00
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0026.JPG	group1	13.68903675	-89.12434219	627.956	5.000	10.00

Ayuda [< Atrás] [Siguiente >] [Cancelar]

*Imagen No 11-6. Subida de Imágenes.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se procede a seleccionar el sistema de coordenadas de los archivos de salida y la unidad de medida del proyecto. Se seleccionará la opción de Sistema de coordenada conocido y posterior a ello se presionará el botón desde PRJ, buscaremos la ruta de nuestro archivo .prj y se seleccionará.



*Imagen No 11-7. Selección de Sistema de Coordenadas.*

*Fuente: Elaboración propia.*

El archivo .prj seleccionado se generó anteriormente utilizando el software Global Mapper, en este archivo se guarda la información referida al sistema de coordenadas, en El Salvador se debe utilizar la Proyección Cónica Conformal de Lambert SIRGAS El Salvador 2007.

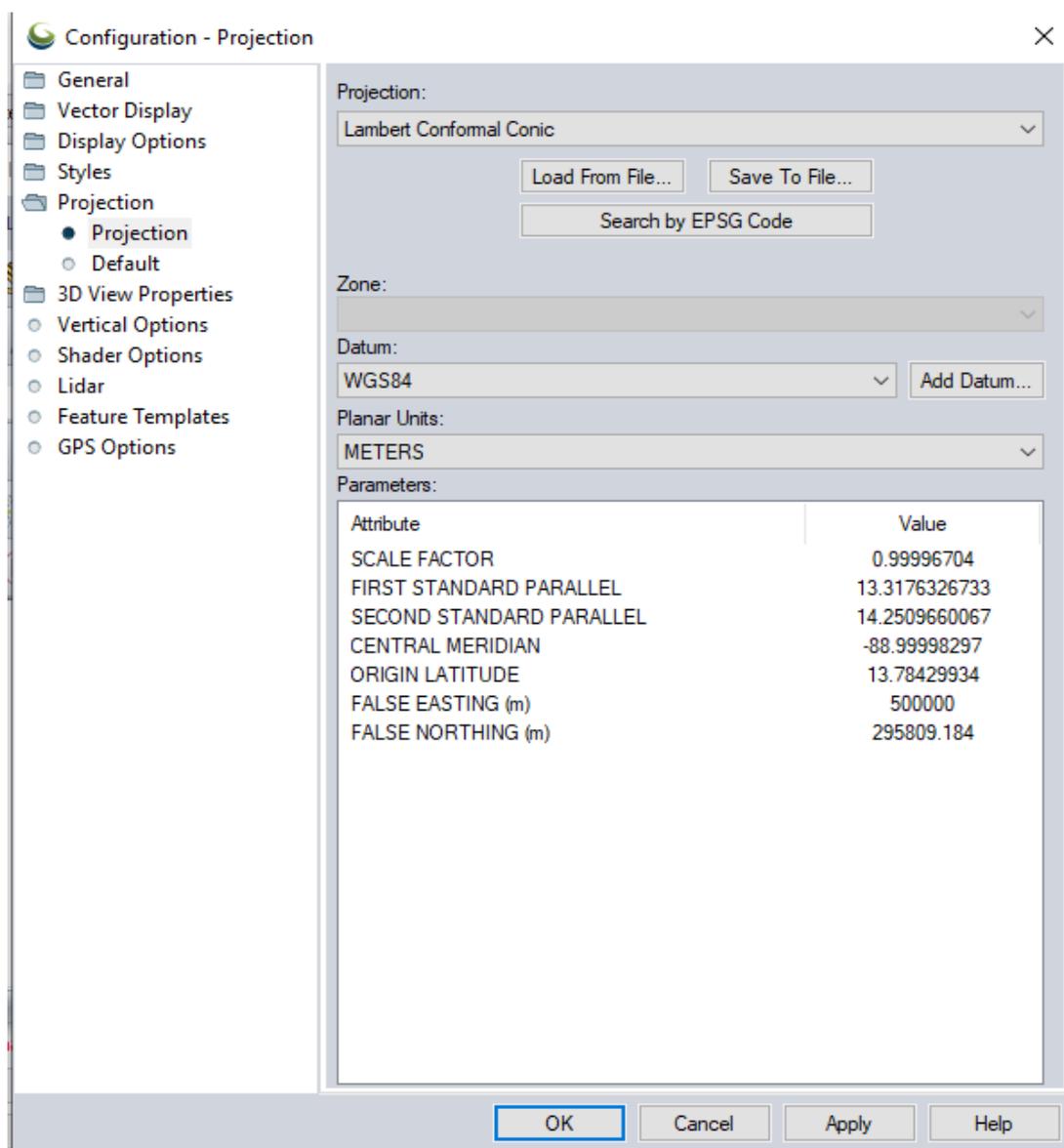


Imagen No 11-8. Parámetros del Sistema de Coordenadas Lambert-Sirgas 2007.

Fuente: Elaboración propia.

En el sistema de coordenadas vertical seleccionaremos el geoide EGM 2008. En este sistema estarán los Puntos de Control Fotogramétricos (PCF) que se van a introducir, es decir, los puntos obtenidos mediante la técnica de medición RTK. A continuación daremos clic en “Siguiente”.

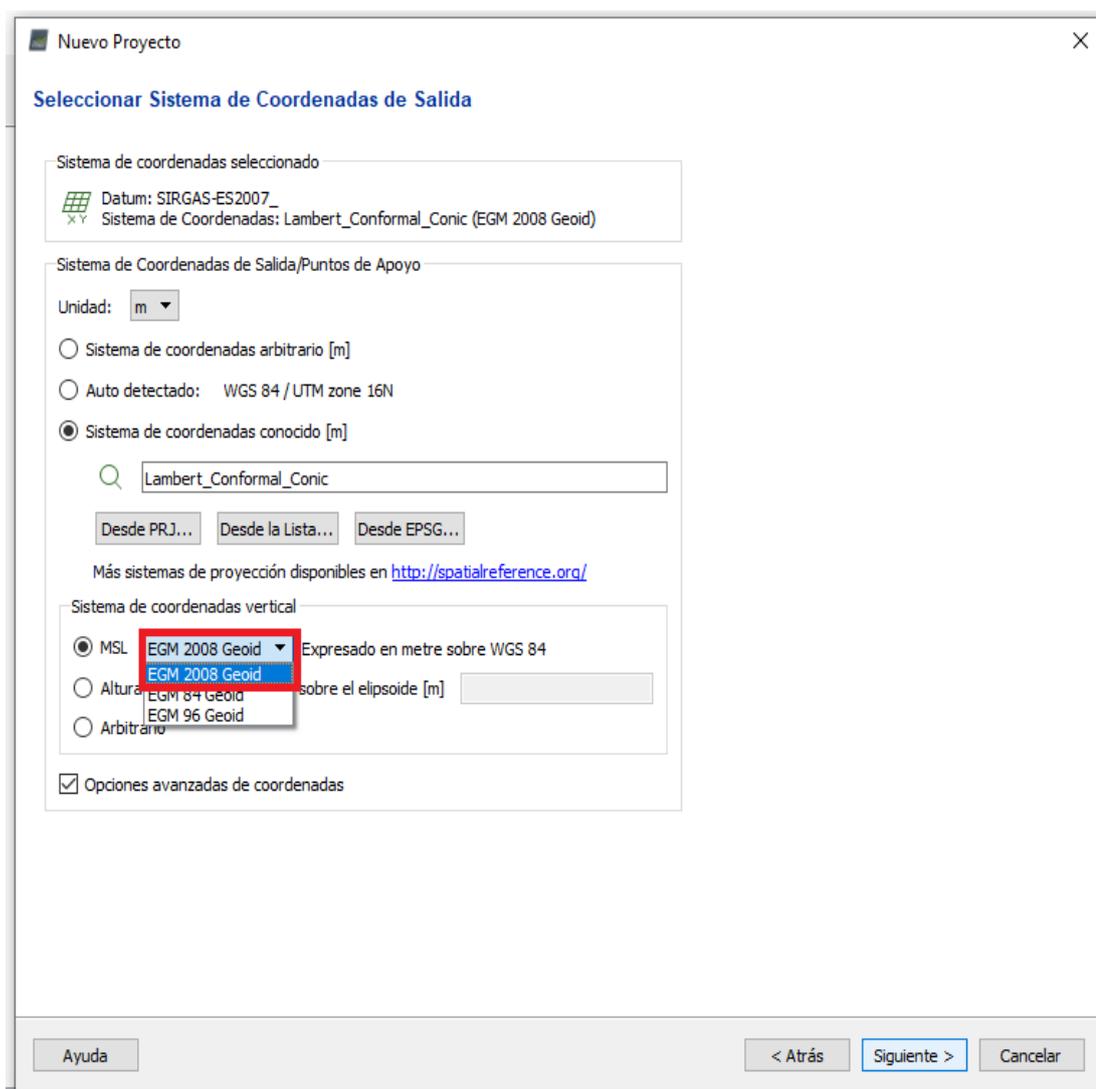


Imagen No 11-9. Selección de Sistema de Coordenadas Vertical, Geoide EGM 2008.  
Fuente: Elaboración propia.

Pix4D nos ofrecerá diferentes Plantillas de Opciones de Procesamiento, elegiremos la que más se adapte a nuestras necesidades, en este caso seleccionaremos la plantillas Estándar 3D Maps y daremos clic en “Finalizar”.

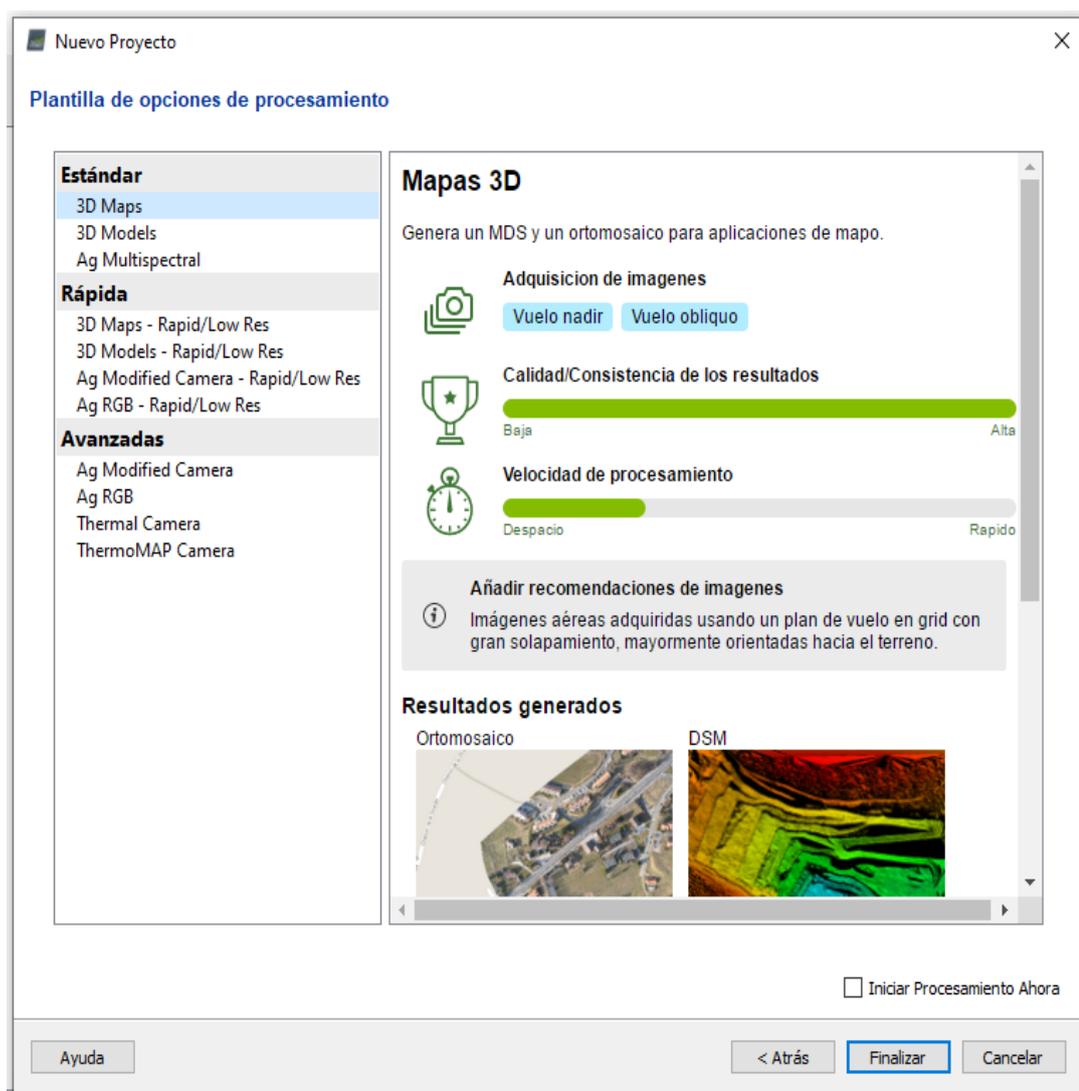
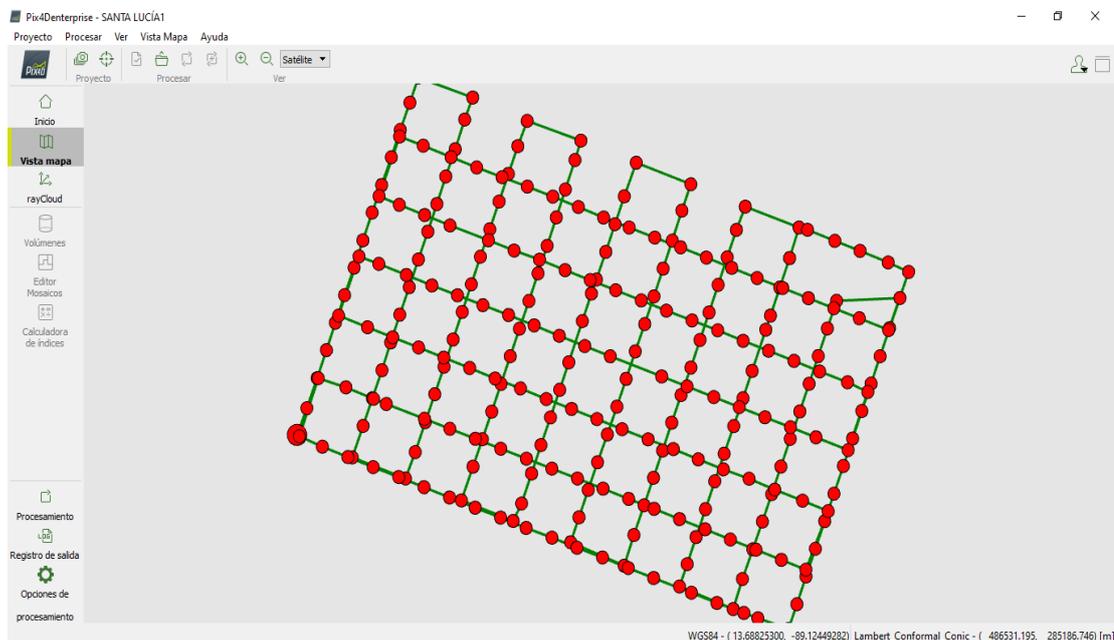


Imagen No 11-10. Selección de Plantilla de Opciones de Procesamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

Al cargar las imágenes aparecerá el plan de vuelo que se realizó.

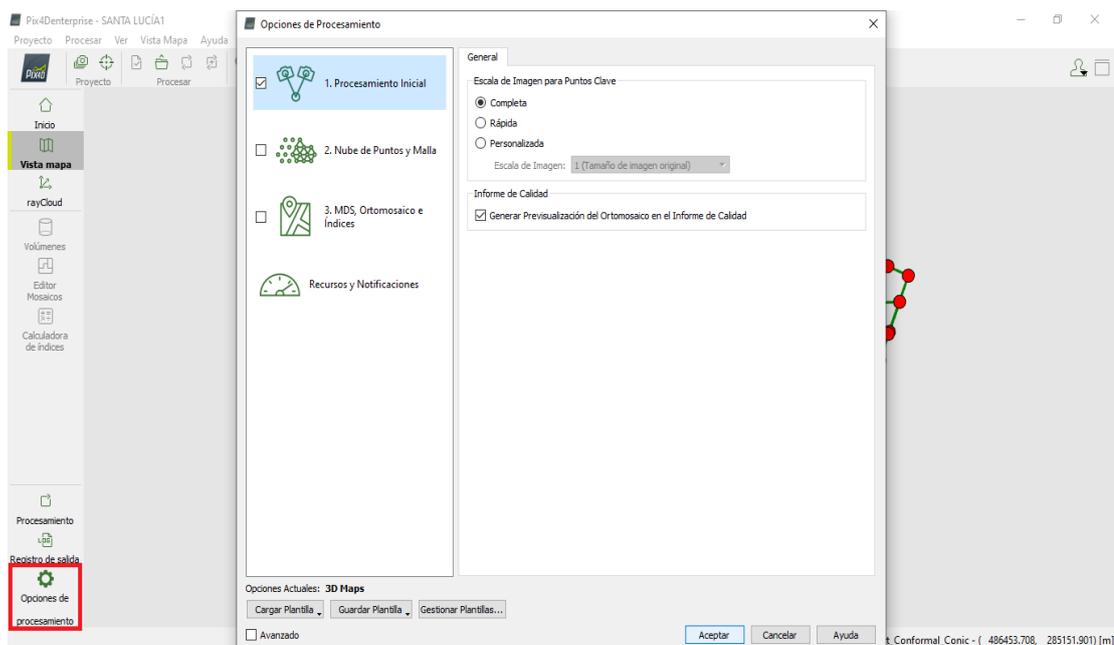


*Imagen No 11-11. Plan de vuelo realizado.*

*Fuente: Elaboración propia.*

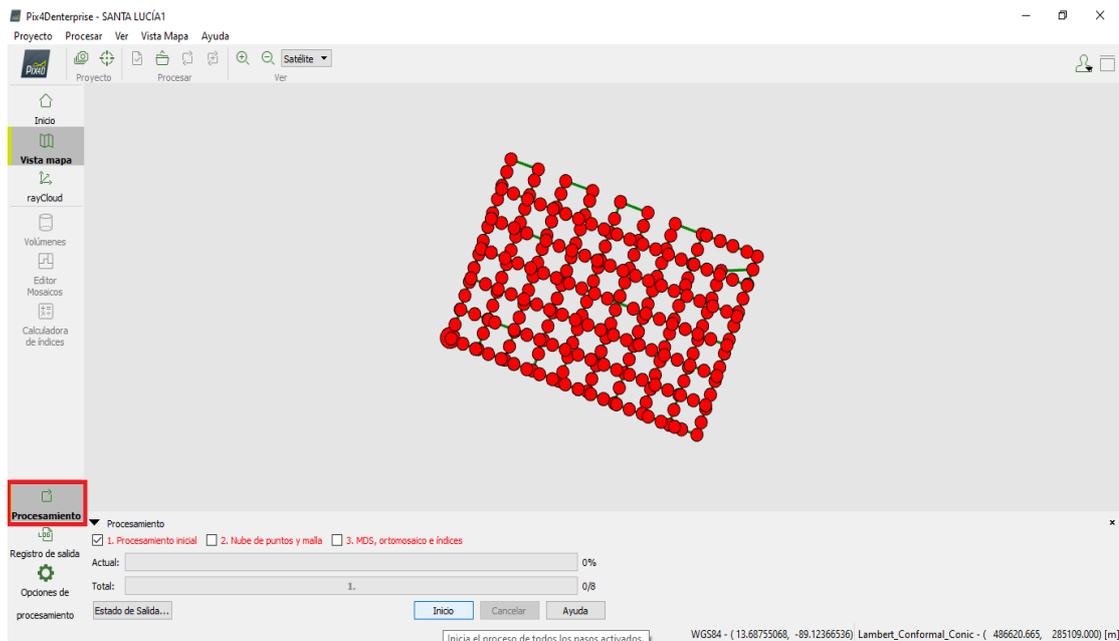
Daremos clic en el botón “Opciones de Procesamiento” y aparecerá la siguiente ventana en la que configuraremos los siguientes parámetros:

- Se marcará solamente el primer paso “Procesamiento Inicial”.
- En Escala de Imagen para Puntos Clave seleccionaremos “Completa”, para tener un alto grado de traslape y por lo tanto más precisión.
- Luego, se marcará la casilla “Generar Previsualización del Ortomosaico en el Informe de Calidad” y seleccionaremos “Aceptar”.



*Imagen No 11-12. Configuración de parámetros del paso 1, Procesamiento Inicial.  
Fuente: Elaboración propia.*

Luego de verificar los parámetros se puede dar inicio al procesamiento inicial dando clic en el botón “Procesamiento” y posteriormente seleccionando “Inicio”. Para esto, solamente debe estar marcado “Procesamiento Inicial”.



*Imagen No 11-13. Inicio del paso 1, Procesamiento Inicial.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En este paso se utilizarán las imágenes para realizar las siguientes tareas:

- Extracción de puntos clave: Identifica características específicas como puntos destacados de las imágenes.
- Puntos clave que coinciden: Encuentra qué imágenes tienen los mismos puntos clave y hace que coincidan con ellas.
- Optimización del modelo de la cámara: Calibra la distancia interna (distancia focal) y parámetros externos (Orientación) de la cámara.
- Localización GPS / GCP: Localiza el modelo si se proporciona información de geolocalización.

Se crean puntos de enlace automáticos durante este paso. Estas son la base para los próximos pasos de procesamiento.

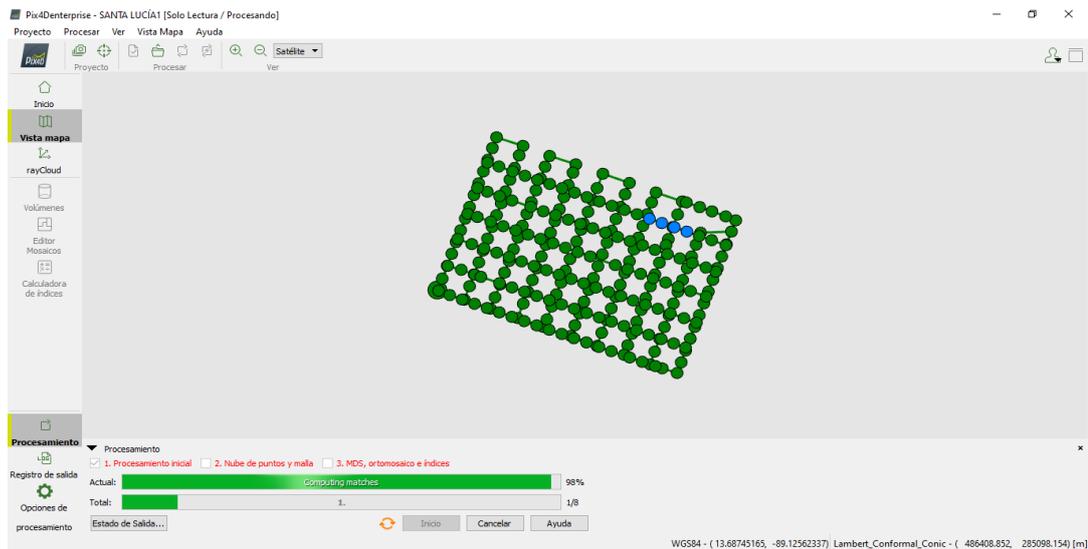


Imagen No 11-14. Procesamiento Inicial.

Fuente: Elaboración propia.

Finalizado el procesamiento inicial, el programa proporciona un reporte de calidad en donde se muestra una vista previa del Ortomosaico y del Modelo de Superficie Digital (DSM) del área procesada.

### Quality Report

Generated with Pix4Denterrise version 4.5.6

**Important:** Click on the different icons for:

- ? Help to analyze the results in the Quality Report
- i Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

#### Summary

Project	Santa Lucía
Processed	2023-09-18 23:38:00
Camera Model Name(s)	FC6310_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.90 cm / 1.14 in
Area Covered	0.080 km <sup>2</sup> / 8.0265 ha / 0.03 sq. mi. / 19.8441 acres

#### Quality Check

<span style="color: orange;">?</span> <b>Images</b>	median of 66694 keypoints per image	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Dataset</b>	260 out of 260 images calibrated (100%), all images enabled	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Camera Optimization</b>	0.34% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Matching</b>	median of 22088.1 matches per calibrated image	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Georeferencing</b>	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.015 m	✔

Imagen No 11-15. Reporte de calidad.

Fuente: Elaboración propia.

Preview

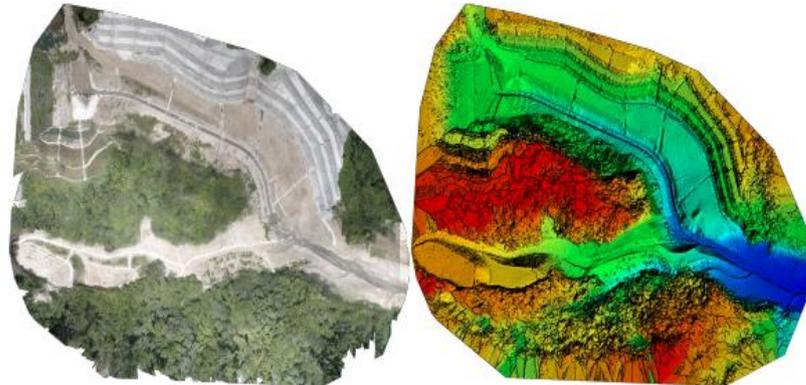


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

## Calibration Details

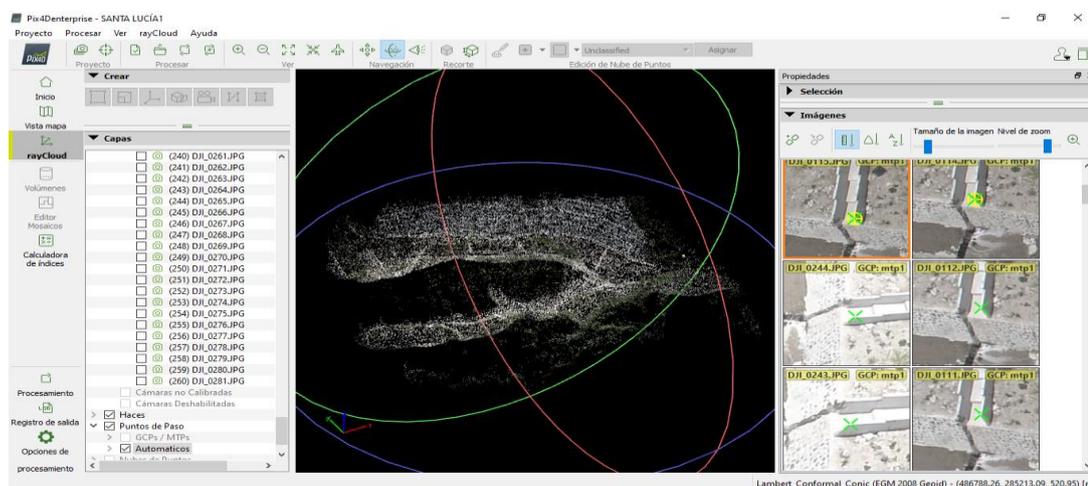
Number of Calibrated Images	260 out of 260
Number of Geolocated Images	260 out of 260

*Imagen No 11-16. Reporte de calidad.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 11.1.3 Paso 2: Nube de puntos y malla

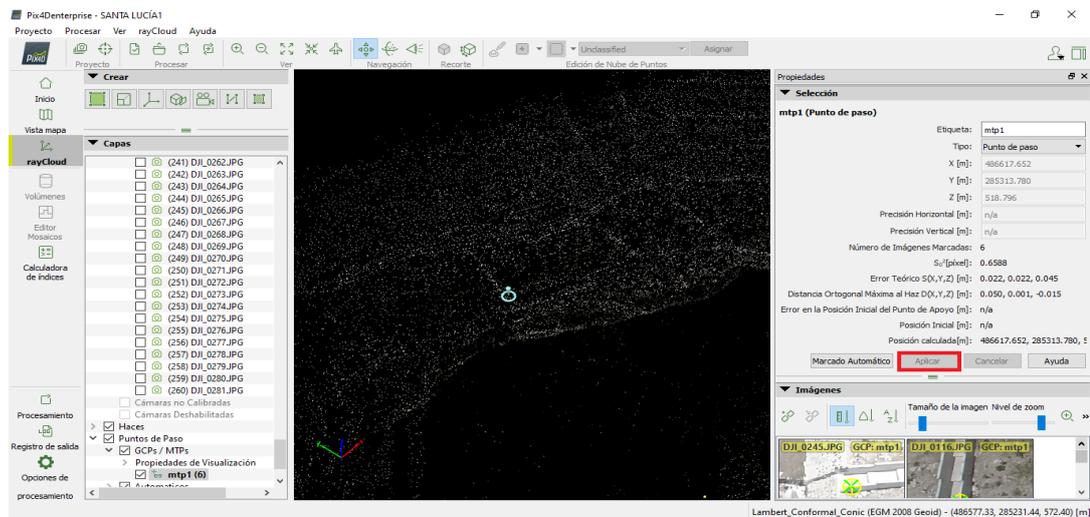
Se procede a definir los Puntos de Paso, es decir, puntos foto identificables en el terreno que van a servir para unir, emparejar, orientar y alinear las imágenes conectando puntos comunes. Para colocar los Puntos de Paso se realizan de forma manual en la superficie del terreno, Los puntos de paso deben seleccionarse de forma estratégica y colocarse dispersos por todo el terreno. Un punto de paso debe ser foto identificable en las imágenes que componen nuestro proyecto, y deber colocarse en objetos físicos, naturales, idealmente que se encuentren a ras del suelo y cuya imagen no se distorsione por la altura y el ángulo de la cámara. Se procede a marcar en dos o más de las fotografías que se muestran en la parte derecha para luego presionar Marcado automático para que el programa identifique automáticamente. Se verifica en las fotografías si los puntos se mantienen en la posición real y de ser necesario ajustarlos.



*Imagen No 11-17. Creación de puntos de paso.*

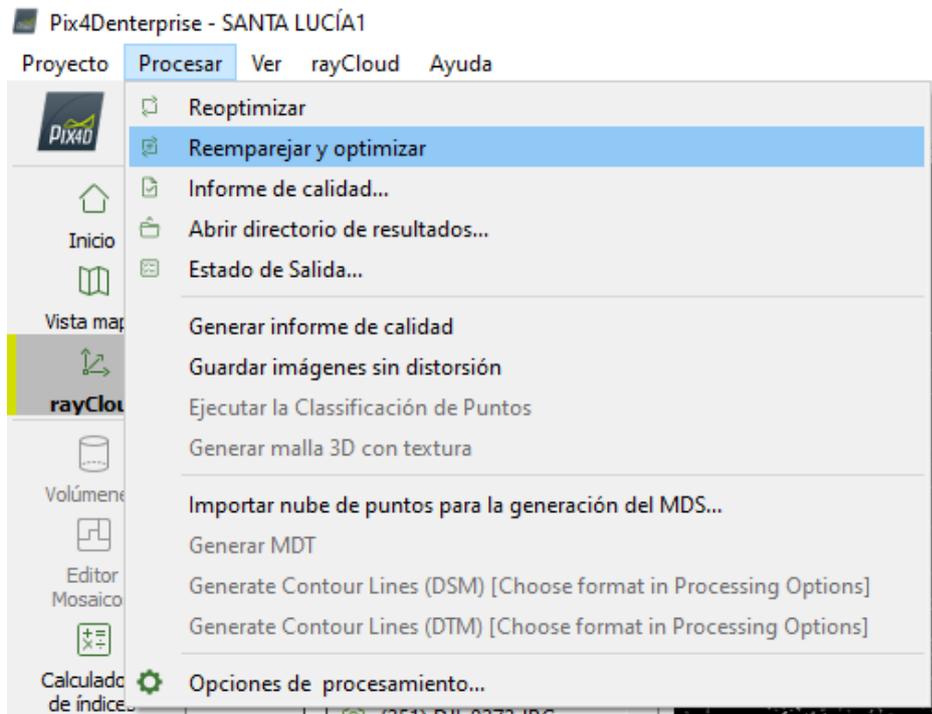
*Fuente: Elaboración propia.*

Posteriormente daremos clic en Aplicar para crear el punto de paso.



*Imagen No 11-18. Creación de puntos de paso.  
Fuente: Elaboración propia.*

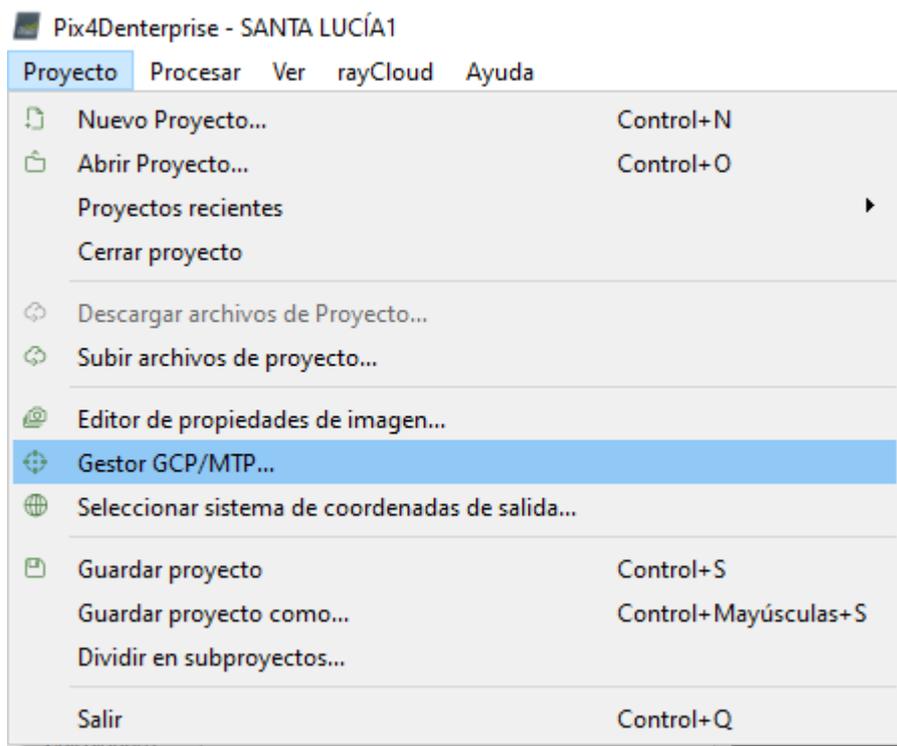
Quando todos los puntos de paso estén definidos (cinco por cada punto cardinal y cinco al centro según recomendación) debemos irnos a la pestaña procesar y seleccionar “Reemparejar y optimizar”. Para concluir con el proceso de asignar los puntos de paso del terreno.



*Imagen No 11-19. Creación de puntos de paso.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Finalizado el proceso de reemparejamiento y optimización se procede a la importación de los puntos de control fotogramétricos obtenidos mediante la técnica de medición RTK, seleccionando de la barra de herramientas el botón llamado “Gestor GCP/MTP”, nos desplegará una ventana auxiliar para poder meter los puntos con las coordenadas planas de nuestra Proyección Cartográfica cargando un archivo con todos los puntos en formatos (.txt, .csv).

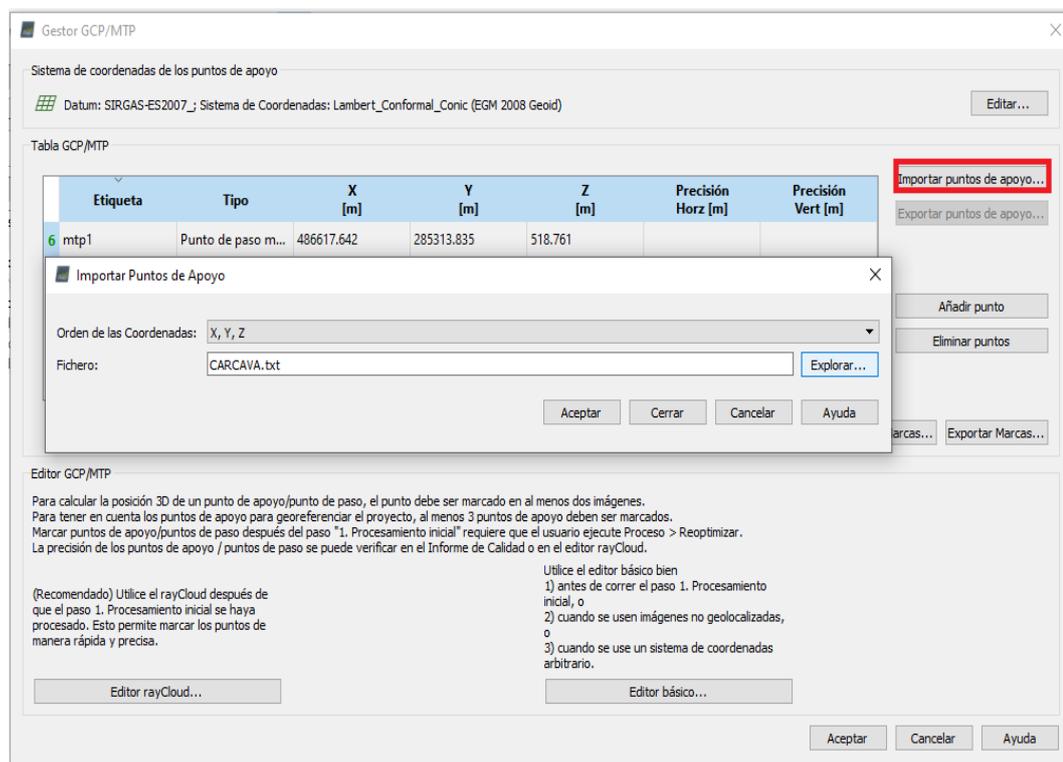


*Imagen No 11-20. Gestor GCP/MTP.*

*Fuente: Elaboración propia.*

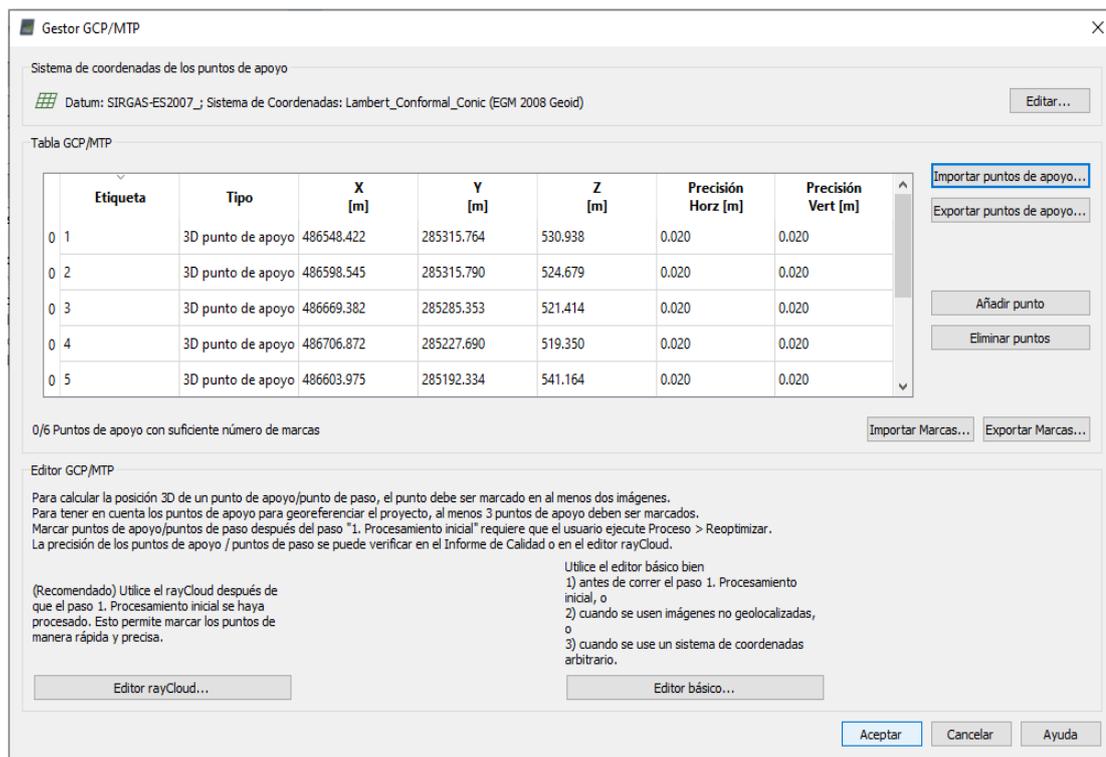
Dentro de la interfaz, debe dar clic en el botón de “Importar puntos de apoyo”, para cargar los datos dentro del software, en el cuadro que despliega seleccionar el orden de las coordenadas (X, Y, Z), daremos clic en “Explorar”, donde vincula al asistente de archivos de Windows y se busca el archivo con los puntos de control.

Una vez seleccionado el archivo con extensión .txt, dar clic en “Aceptar”.



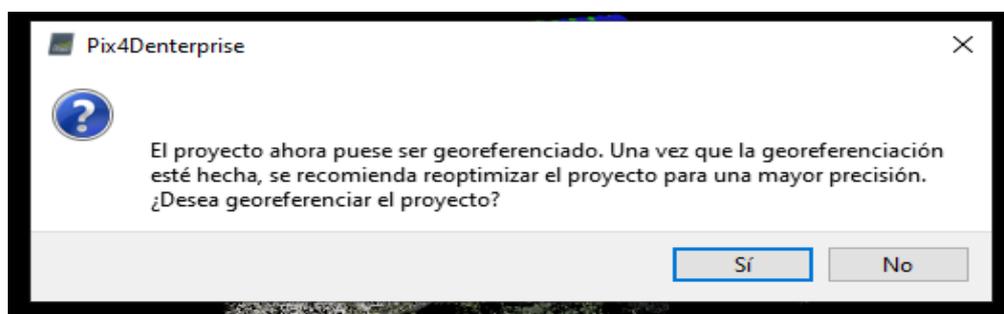
*Imagen No 11-21. Importación de Puntos de Control Fotogramétricos.  
Fuente: Elaboración propia.*

Posteriormente se verifica que los puntos de control estén cargados correctamente y se selecciona "Aceptar".



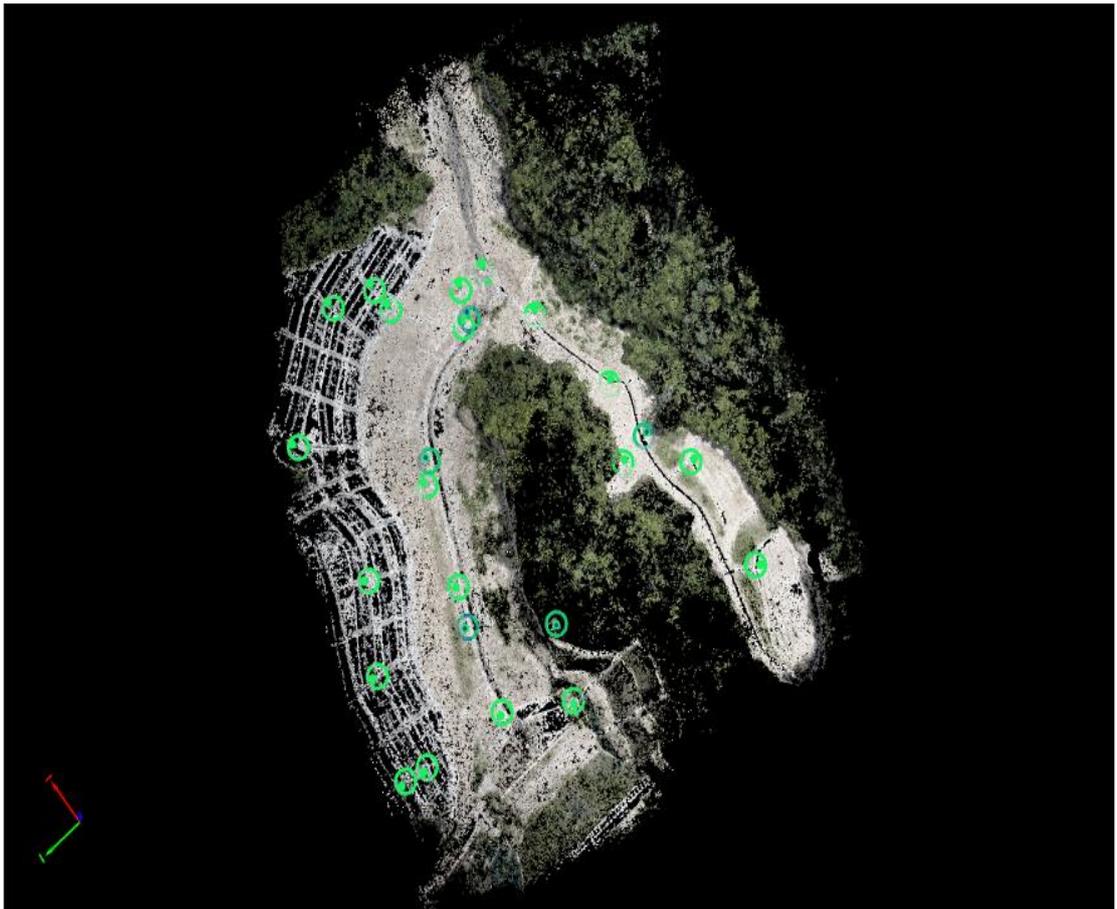
*Imagen No 11-22. Importación de Puntos de Control Fotogramétricos.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se mostrará una ventana emergente donde se pregunta si se desea georreferenciar el proyecto, seleccionar “Sí”.



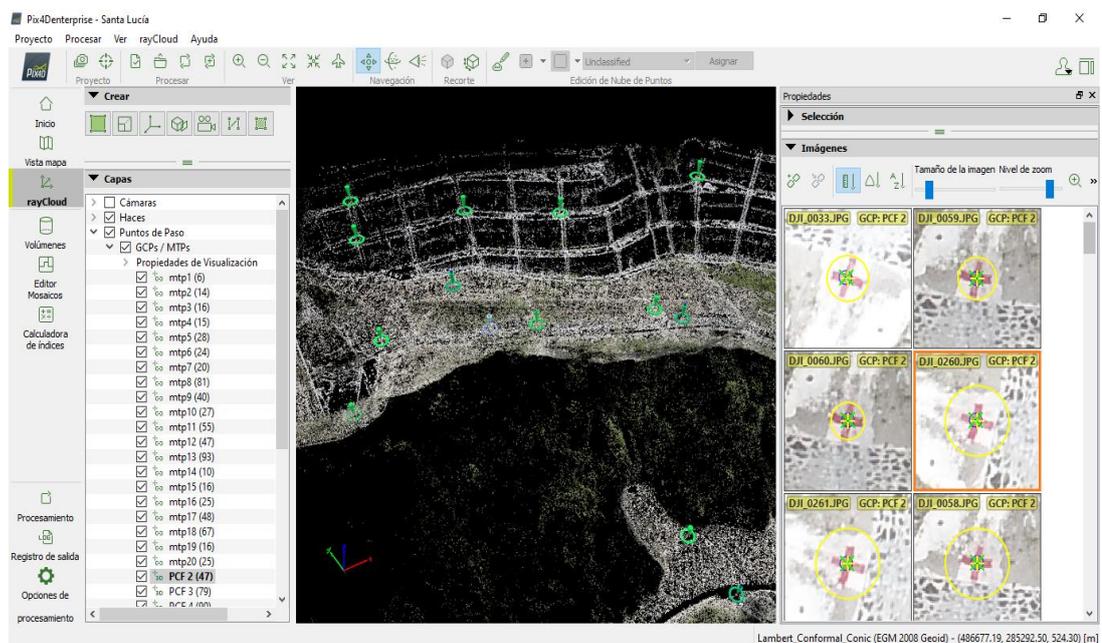
*Imagen No 11-23. Georreferenciación del proyecto.  
Fuente: Elaboración propia.*

Al finalizar este proceso, se puede observar en la siguiente interfaz los marcadores en color azul que representan los puntos de control en el terreno.



*Imagen No 11-24. Visualización de Puntos de Control.  
Fuente: Elaboración propia.*

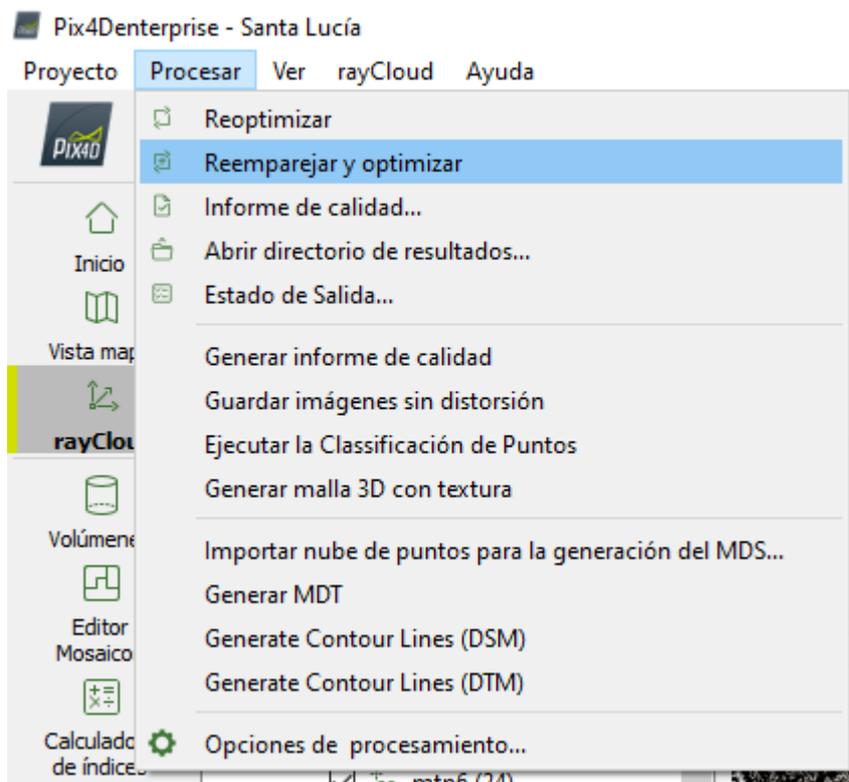
Por lo general el punto seleccionado no coincide con el tomado realmente en campo, por lo tanto, se realizará un ajuste para poder georreferenciar correctamente para amarrar los puntos de control con las fotografías del proyecto. Se realiza de la misma forma que se hizo para los puntos de paso.



*Imagen No 11-25. Ajuste de Puntos de Control.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Y el proceso se repite para cada punto de control, al finalizar el ajuste de todos los puntos de control, debe buscarse en la barra de herramienta Procesar y seleccionar “Reemparejar y optimizar”.



*Imagen No 11-26. Reemparejar y optimizar.  
Fuente: Elaboración propia.*

Ahora estamos listos para iniciar el procesamiento del paso 2

Las siguientes imágenes muestran la configuración recomendada para iniciar con el procesamiento de la nube de puntos y malla. Para el segundo proceso asegurarse de que no estarán marcadas las opciones de procesamiento 1 y 3.

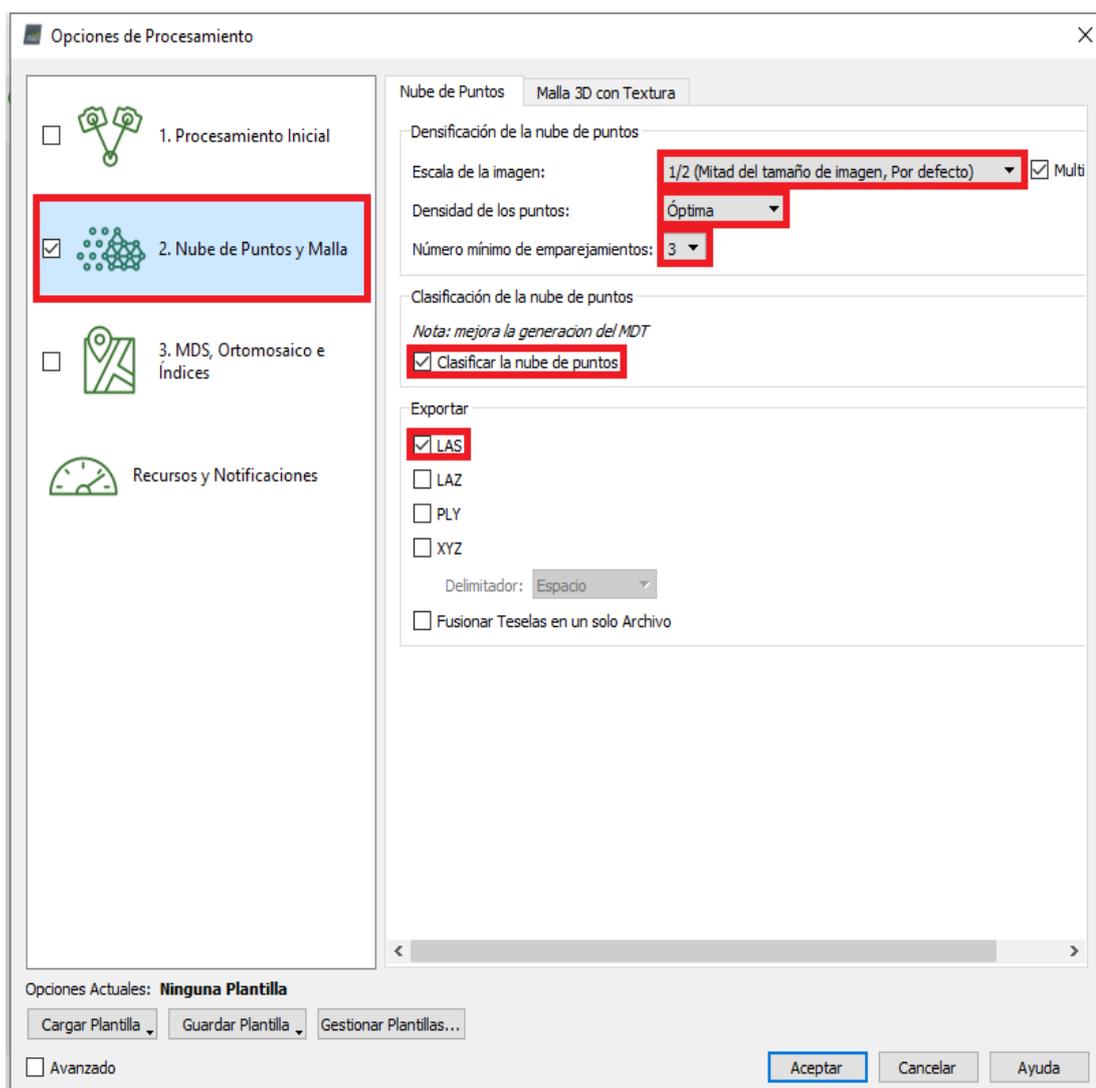


Imagen No 11-27. Parámetros para iniciar la nube puntos y malla.

Fuente: Elaboración propia.

Daremos clic en la segunda pestaña “Malla 3D con Textura”, configuraremos los siguientes parámetros y presionaremos “Aceptar”.

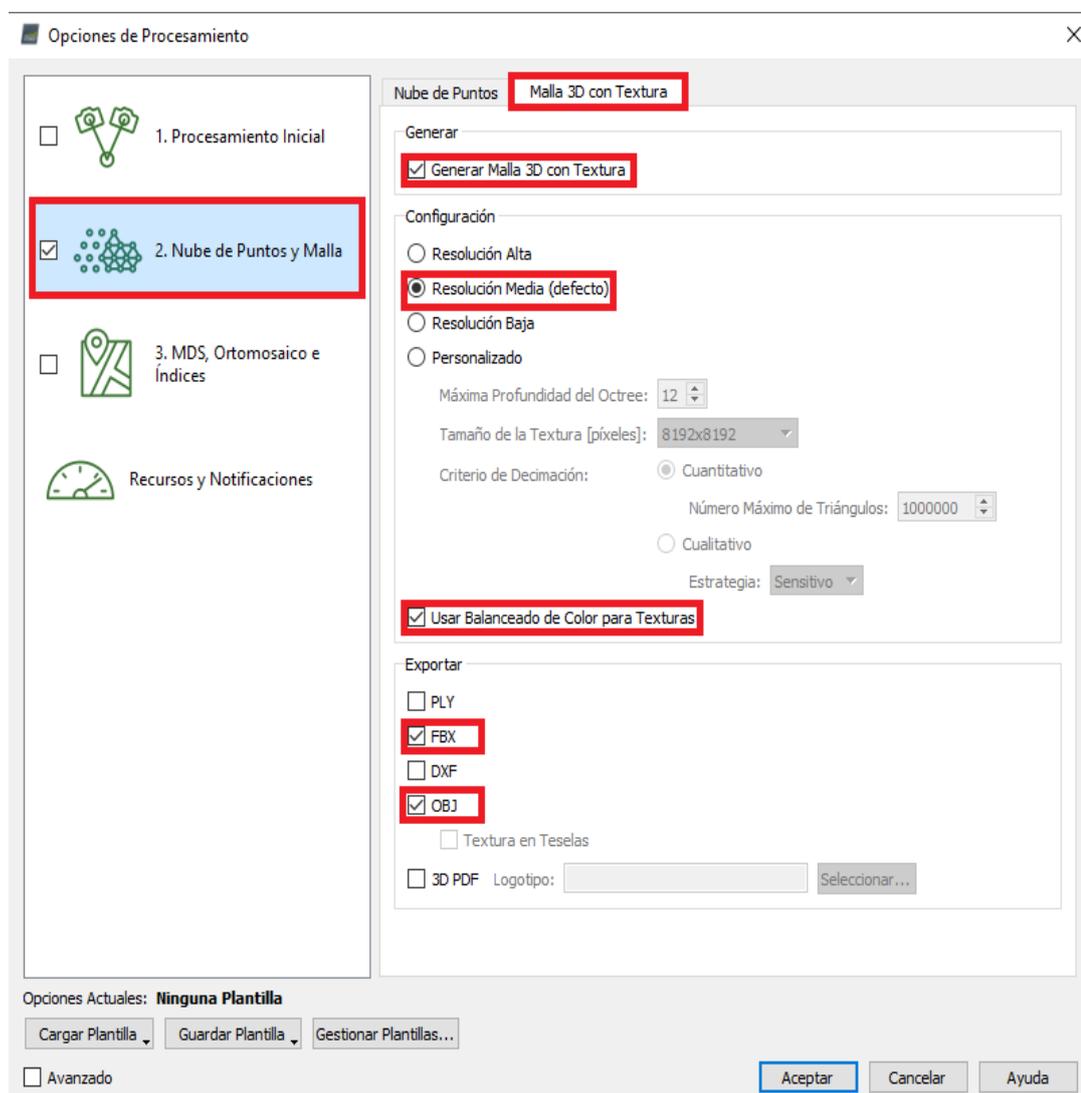
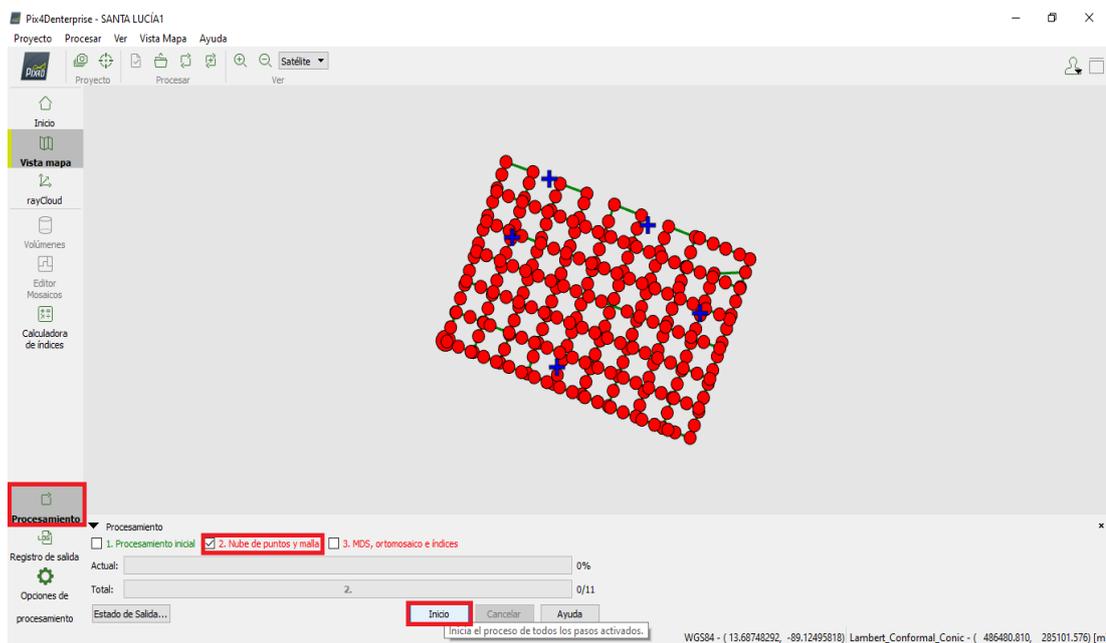


Imagen No 11-28. Parámetros para iniciar la nube puntos y malla.  
Fuente: Elaboración propia.

Procederemos a entrar a la ventana “Procesamiento” y marcaremos la opción “Nube de puntos y malla” y finalmente daremos inicio al paso 2 dando clic en Inicio.



*Imagen No 11-29. Inicio de paso 2: Nube de puntos y Malla.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez concluido el segundo paso del procesamiento, se genera un nuevo reporte de calidad que debe ser revisado más a detalle por el usuario para comprobar que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros aceptados.

## Quality Report



Generated with Pix4Dentprise version 4.5.6

**!** **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

**💡** Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

**Summary** **i**

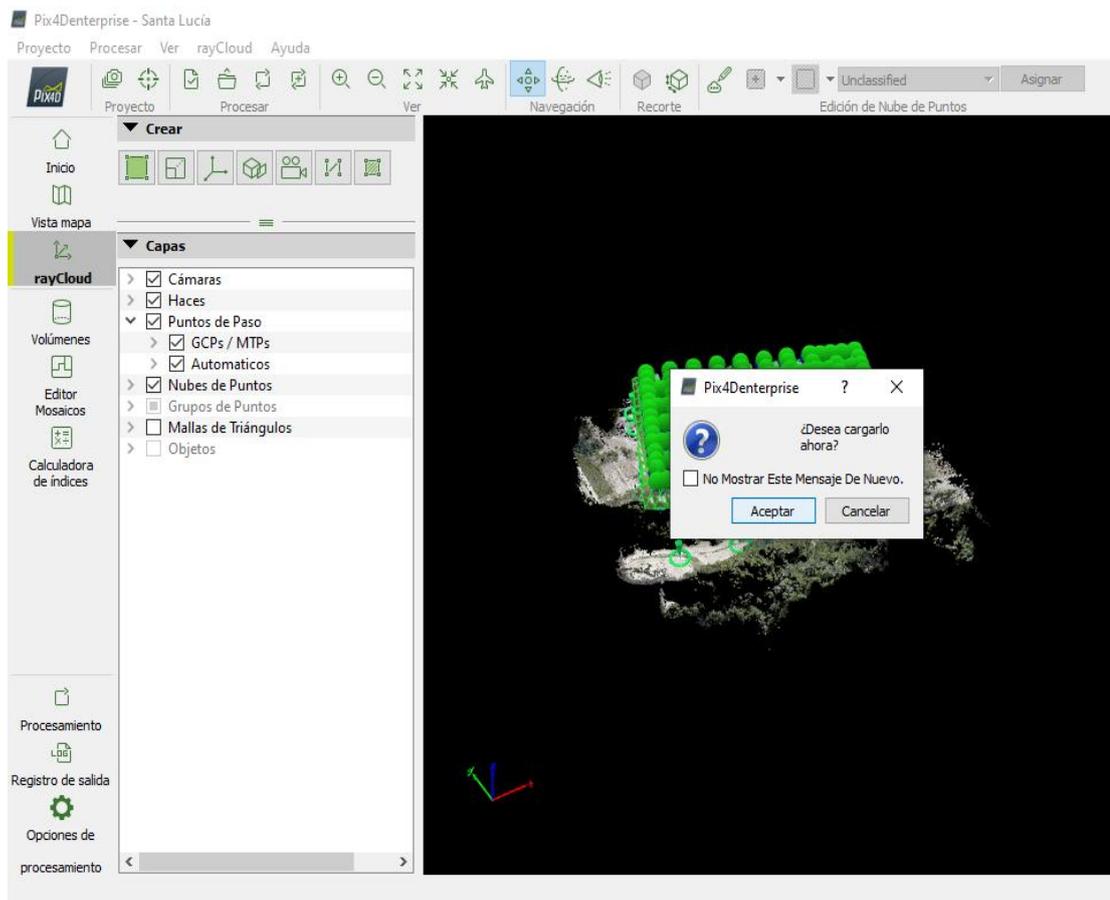
Project	Santa Lucía
Processed	2023-09-18 23:38:00
Camera Model Name(s)	FC6310_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.90 cm / 1.14 in
Area Covered	0.080 km <sup>2</sup> / 8.0265 ha / 0.03 sq. mi. / 19.8441 acres

**Quality Check** **i**

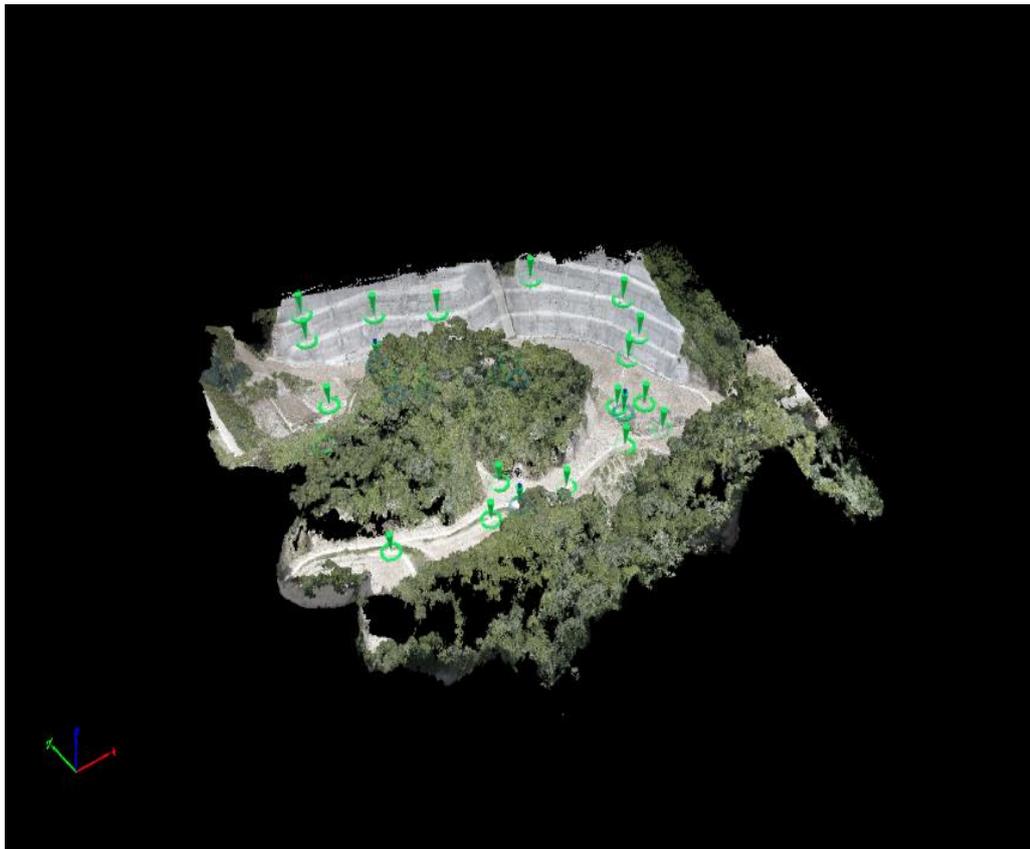
<b>?</b> Images	median of 66694 keypoints per image	✔
<b>?</b> Dataset	260 out of 260 images calibrated (100%), all images enabled	✔
<b>?</b> Camera Optimization	0.34% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
<b>?</b> Matching	median of 22088.1 matches per calibrated image	✔
<b>?</b> Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.015 m	✔

*Imagen No 11-30. Reporte de calidad, paso 2.  
Fuente: Elaboración propia.*

El resultado del Paso 2, es una nube densa de Puntos que al seleccionarlo mostrará una ventana emergente que preguntará “¿Desea cargarlo ahora?” y deberá seleccionarse Aceptar.



*Imagen No 11-31. Carga de nube de puntos.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Imagen No 11-32. Nube de puntos.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se procede a cargar las mallas de triángulos, que al seleccionarlo mostrará una ventana emergente que preguntará “¿Desea cargarlo ahora?” se seleccionará “Aceptar”.

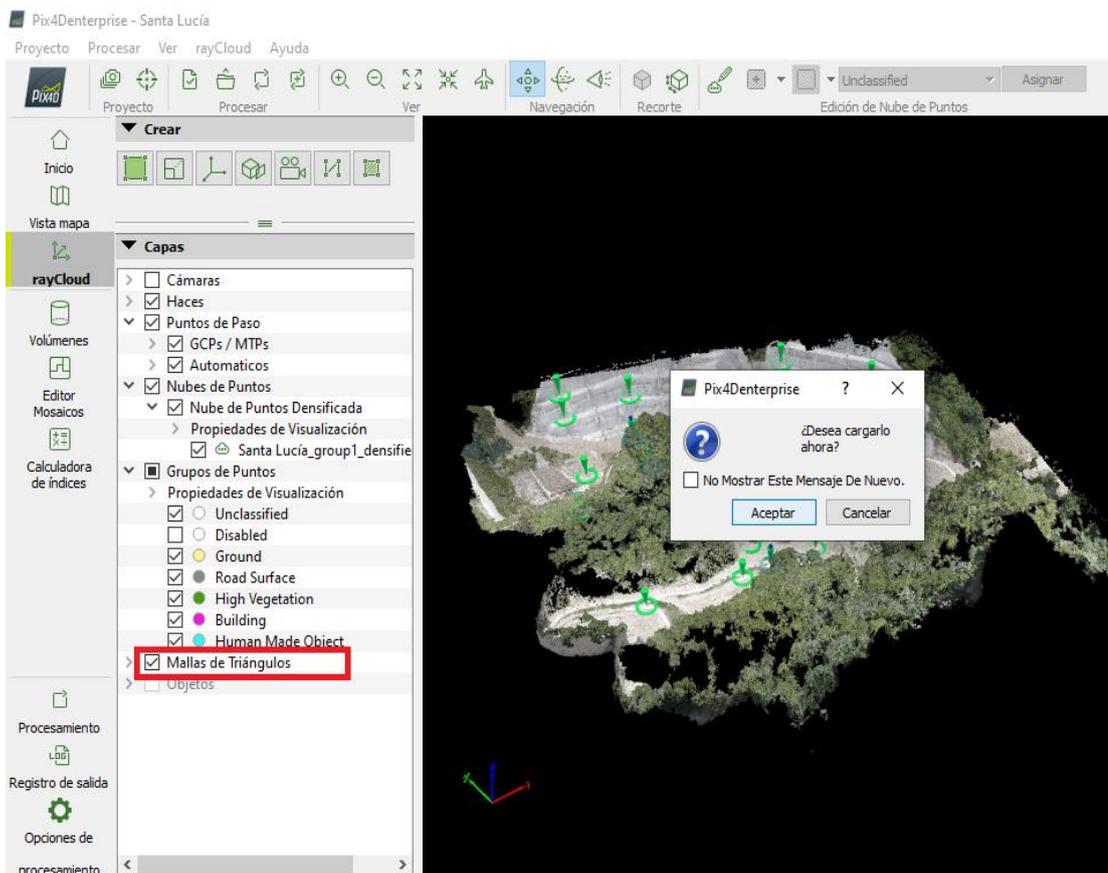


Imagen No 11-33. Carga de malla de triángulos.

Fuente: Elaboración propia.

#### **11.1.4 Paso 3: Procesamiento para generar DMS y Ortomosaico**

En el tercer paso del procesamiento son creados el modelo digital de superficie (DSM) y el Ortomosaico en diferentes formatos de salida, en Opciones de procesamiento se selecciona “3. MDS, Ortomosaico e Índice”, en la pestaña “MDS y Ortomosaico” dejaremos todo por defecto con la diferencia de que marcaremos la casilla “Teselas de Google Maps y KML”.

Hay que recordar que para el tercer proceso se debe deshabilitar el cheque a las opciones de procesamiento 1 y 2.

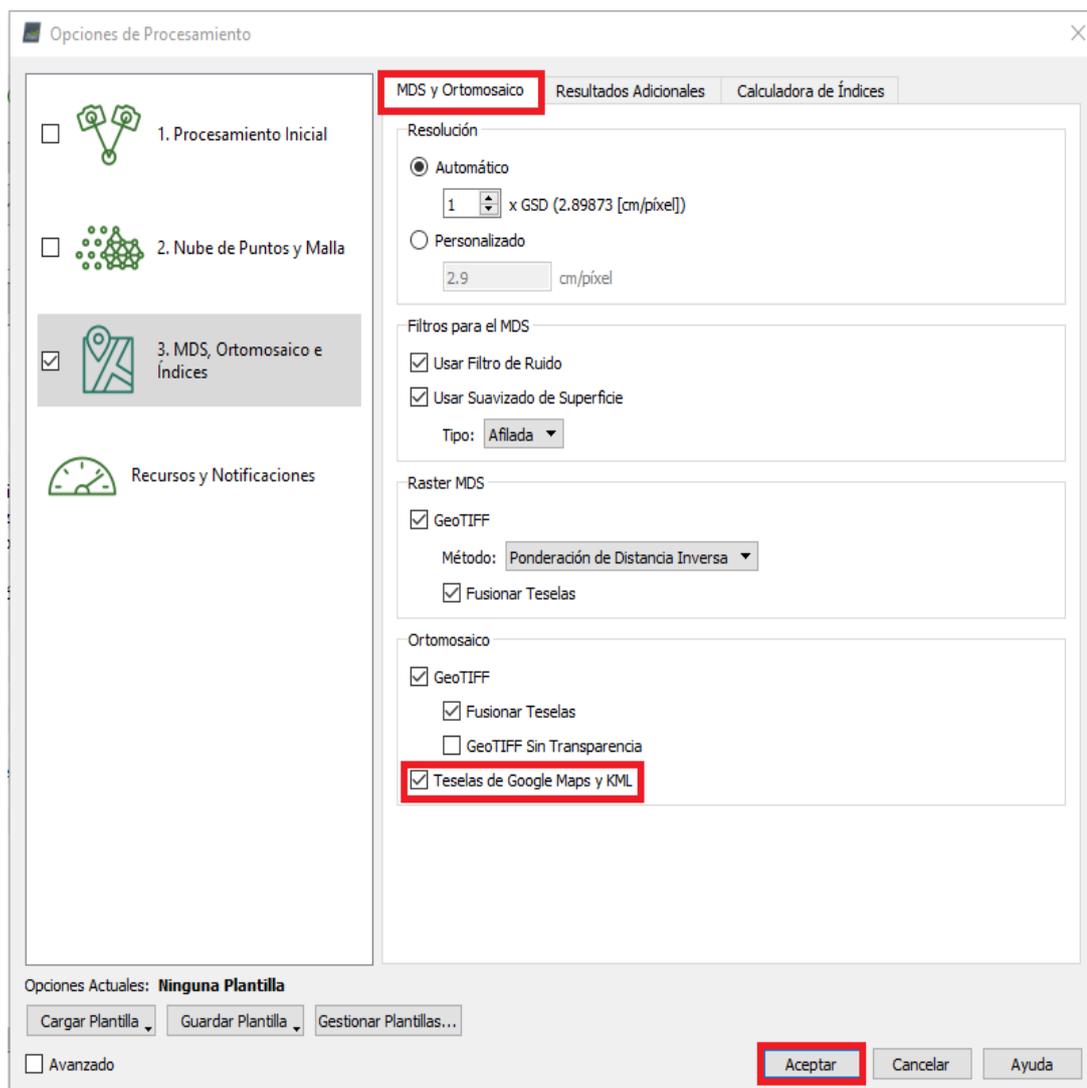


Imagen No 11-34. Parámetros de MDS, Ortomosaicos e Índices.

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña “Resultados Adicionales” seleccionar las opciones indicadas, para generar un archivo ráster que contiene el Modelo Digital de Terreno (MDT) en formato Geo TIFF y las Curvas de Nivel en formato Shape y DXF.

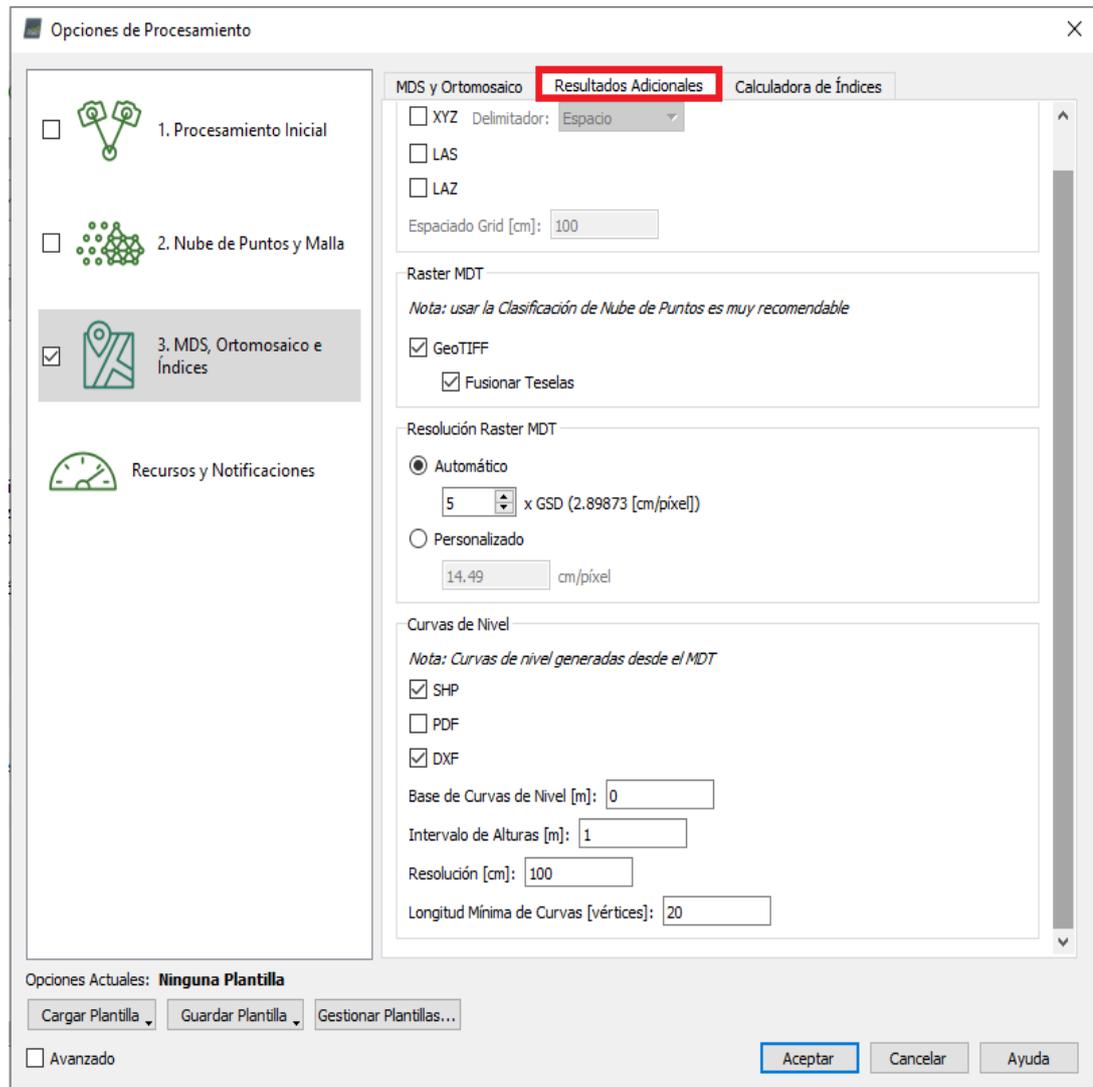


Imagen No 11-35. Parámetros de MDS, Ortomosaicos e Índices.

Fuente: Elaboración propia.

La pestaña “Calculadora de Índices” se dejará por defecto.

Posteriormente daremos clic en “Procesamiento” y desmarcamos la Propiedad de Visualización “High Vegetation”, para remover la vegetación y hacer más precisas nuestras curvas de nivel.

Por último, daremos clic en Inicio para iniciar el procesamiento del paso 3.

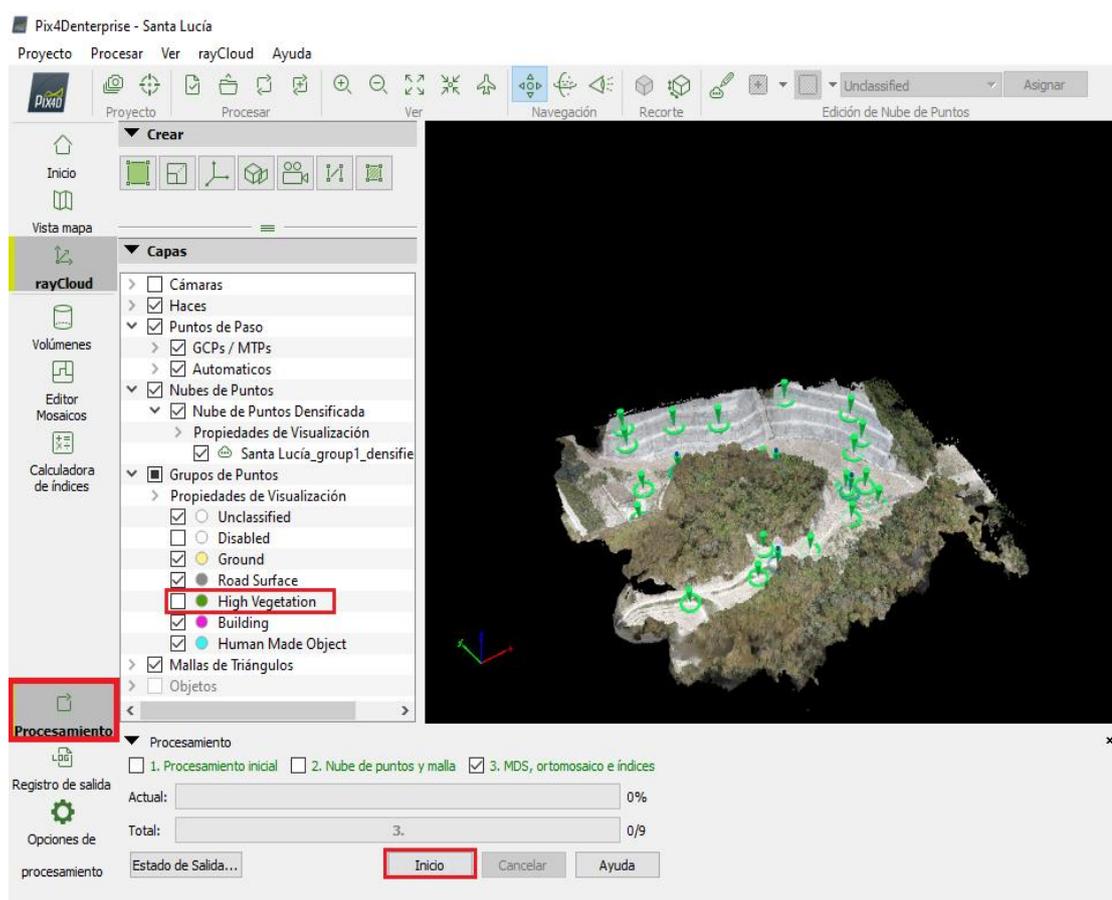
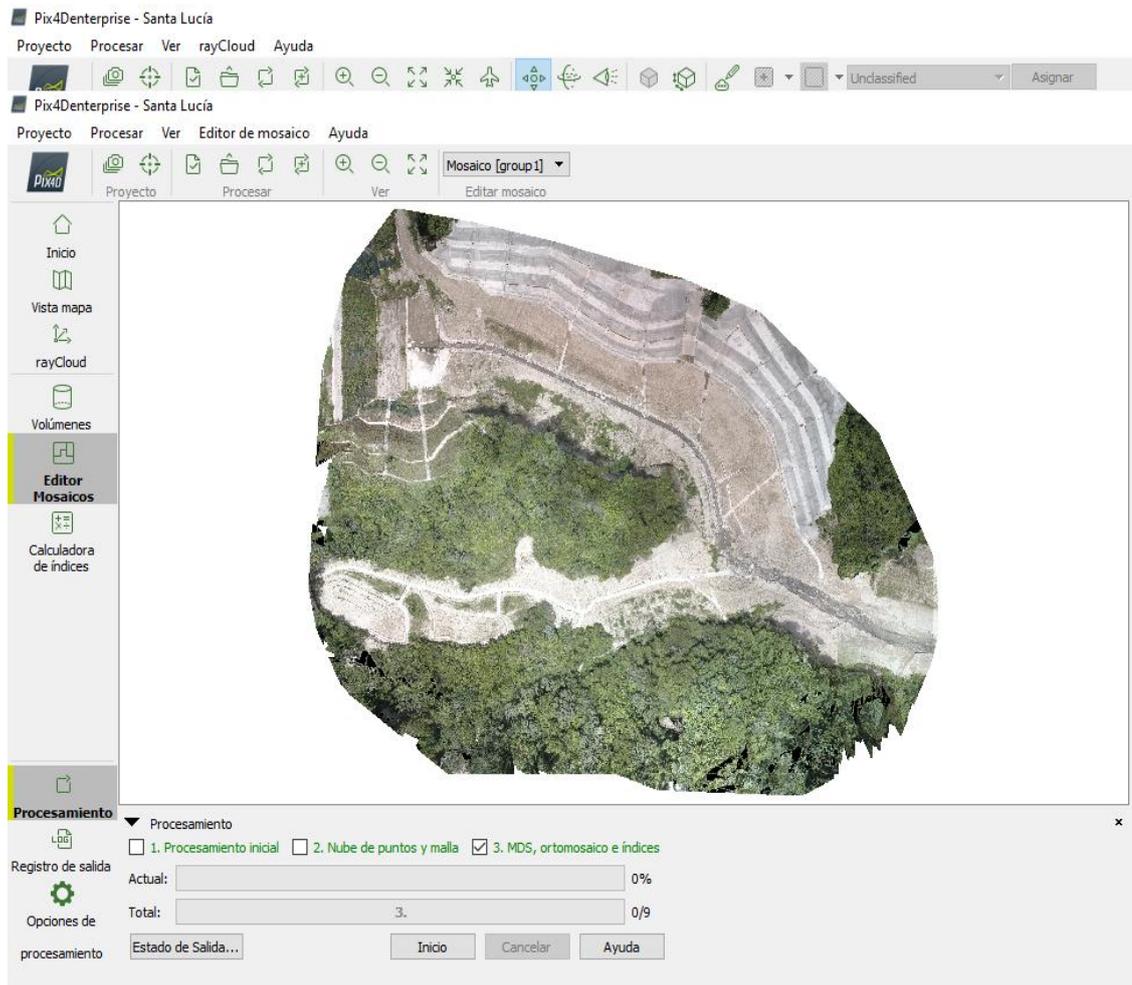


Imagen No 11-36. Inicio de paso 3, MDS, ortomosaico e índices.

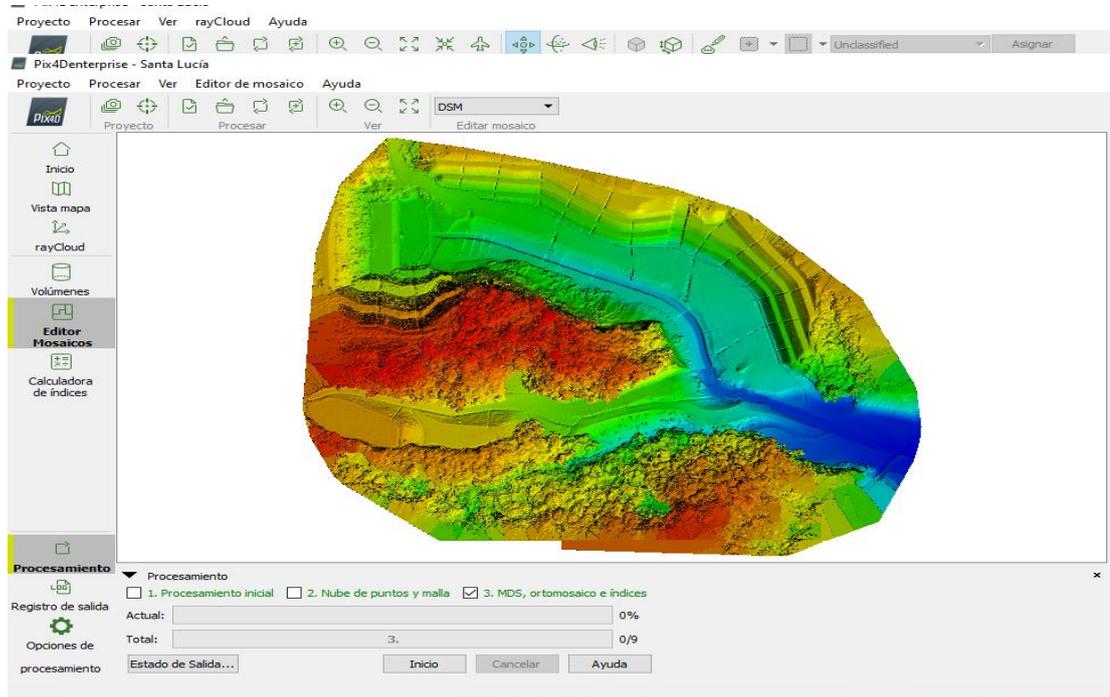
Fuente: Elaboración propia.

El programa genera un nuevo reporte de calidad con los detalles y parámetros establecidos, en el ícono Editor de Mosaicos, nos muestra el Ortomosaico u Ortofoto generada.



*Imagen No 11-37. Ortofoto generada.  
Fuente: Elaboración propia.*

De igual manera, genera el Modelo Digital de Superficie (DSM)



*Imagen No 11-38. Modelo Digital de Superficie (DSM) generado.  
Fuente: Elaboración propia.*

## 11.2 Análisis de resultados

### 11.2.1 Reporte de calidad Pix4D

Después de completar el paso 3 en Pix4DMapper, se genera un informe de calidad que muestra los resultados finales del procesamiento. Este informe incluye información como el número de imágenes procesadas correctamente, el área de terreno cubierta, la resolución promedio del terreno en un píxel (GSD), la optimización de la cámara y el error de georreferenciación.

Tolerancia del programa Pix4D	Resultados del Proceso
<p><b>Conjunto de datos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Más del 95% de las imágenes habilitadas se calibran en un bloque.</li> <li> Entre el 60% y el 95% de las imágenes habilitadas se calibran, o más del 95% de las imágenes habilitadas se calibran en bloque múltiple.</li> <li> Menos del 60% de las imágenes habilitadas están calibradas.</li> </ul>	<p>263 de 263 imágenes calibradas, 100% de imágenes calibradas</p>
<p><b>Optimización de la cámara</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> El porcentaje de diferencia entre la distancia focal inicial y la optimizada es inferior al 5%.</li> <li> El porcentaje de diferencia entre la distancia focal inicial y la optimizada está entre el 5% y el 20%.</li> <li> El porcentaje de diferencia entre la distancia focal inicial y la optimizada es superior al 20%.</li> </ul>	<p>0.42% de diferencia entre la distancia focal inicial y la optimizada</p>

<p><b>Emparejamiento</b></p> <p> <i>Puntos clave Escala de la imagen &gt; 1/4: Se han calculado más de 1'000 coincidencias por imagen calibrada.</i></p> <p> <i>Escala de imagen de puntos clave &gt; 1/4: Se han calculado entre 100 y 1'000 coincidencias por imagen calibrada.</i></p> <p> <i>Escala de imagen de puntos clave &gt; 1/4: Se han calculado menos de 100 coincidencias por imagen calibrada.</i></p>	<p>26,924.1 coincidencias por imagen calibrada</p>
<p><b>Georreferencia</b></p> <p> El error de posición RMS medio de GCP es inferior a 2 veces la GSD media.</p> <p> El error de posición RMS medio de GCP es más de 2 veces la GSD media.</p> <p> El error de posición RMS medio de GCP es más de 4 veces la GSD media</p>	<p>Error RMS = 0.049 m</p>

*Tabla 11-1 Comparación de valores establecidos por los lineamientos del software Pix4DMapper y los valores resultantes del proyecto.*

*Fuente: Pix4DMapper Quality Report.*

El procesamiento se llevó a cabo correctamente y todos los valores se encuentran dentro de los límites establecidos por los desarrolladores del software.

### Archivo KML entregado por Pix4D

El ortomosaico generado en Pix4DMapper y compararlo con la visualización en Google Earth Pro, se puede notar que existe una coincidencia considerable entre ambos, con la observación que el mapa de de Google no se encuentra actualizado. En su mayoría, el ortomosaico se alinea correctamente con el mapa y se muestra en la ubicación correcta. Esto indica que el resultado es preciso y acertado.

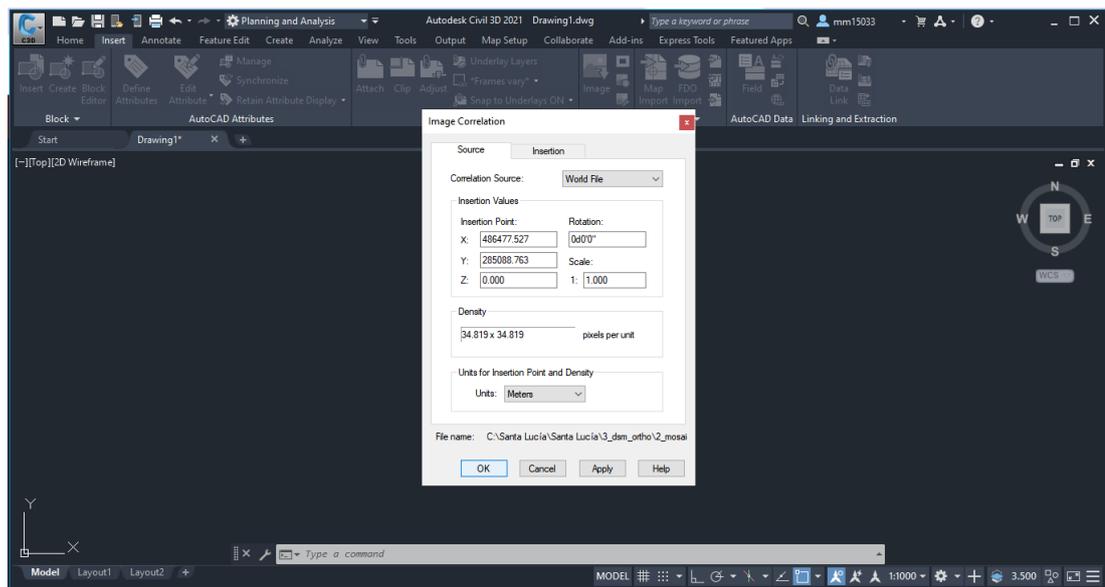


*Imagen No. 11-39 Visualización de Ortomosaico generado por Pix4DMapper en Google Earth Pro.*

*Fuente: Elaboración propia*

### 11.3 Obtención de superficies, volúmenes y modelado de taludes en Civil 3D.

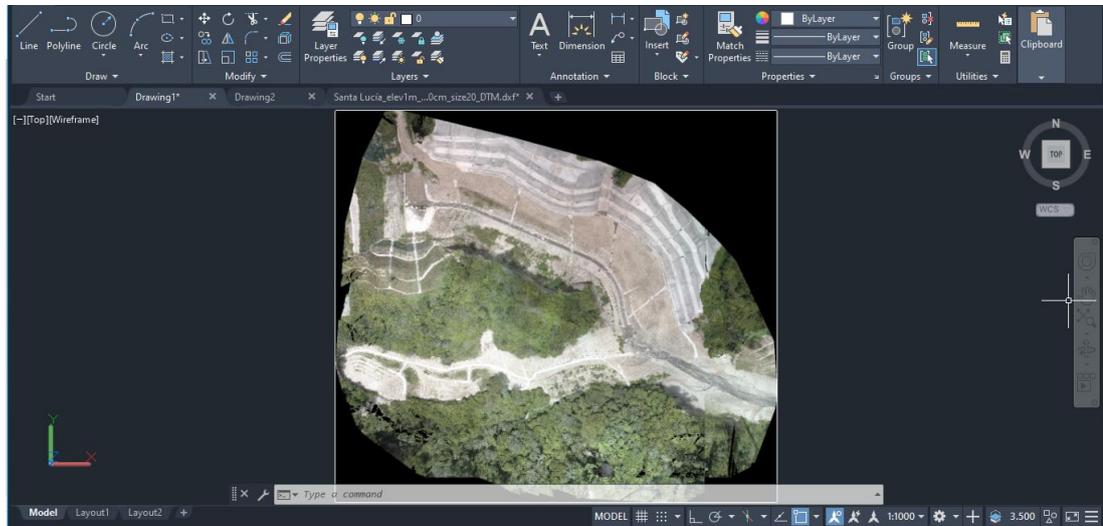
El primer paso para comenzar a trabajar en Civil 3D, es insertar como imagen la ortofoto generada por Pix4D con sus coordenadas correspondientes.



*Imagen No 11-40. Inserción de ortofoto a Civil 3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

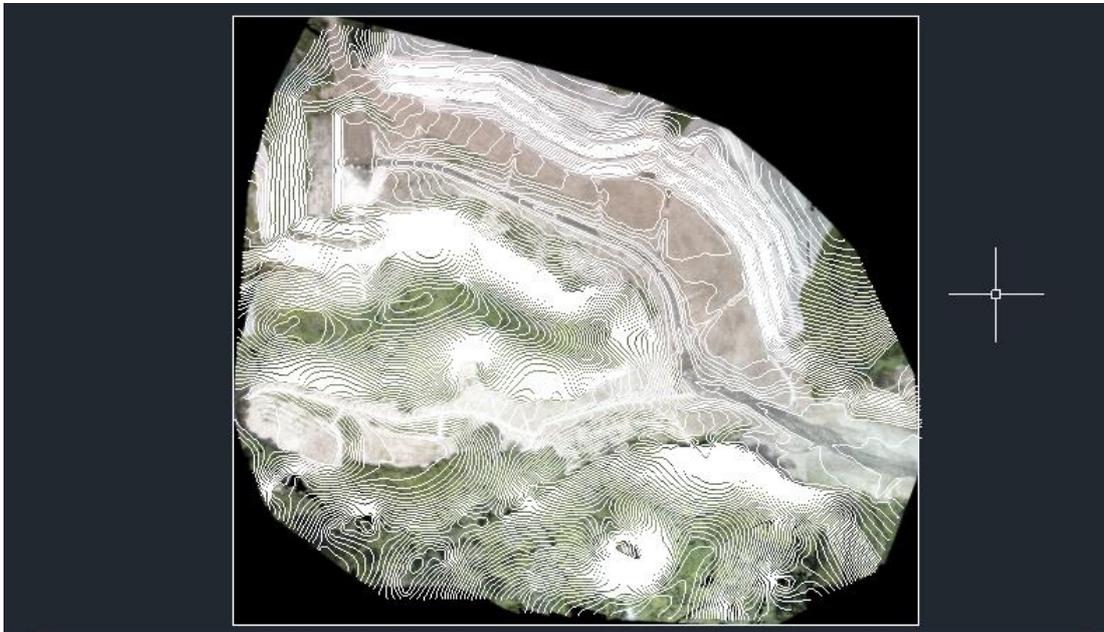
Una vez insertada la ortofoto copiaremos encima las curvas de nivel generadas en el paso 3 de procesamiento de datos en Pix4D.



*Imagen No 11-41. Inserción de ortofoto a Civil 3D.*

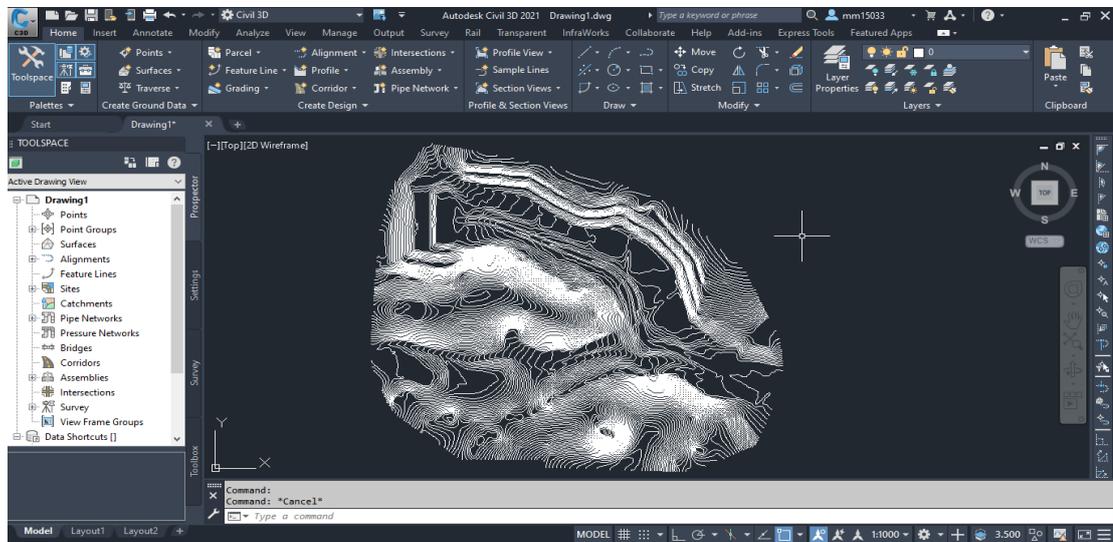
*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez verificadas las curvas de nivel, podemos ocultar el Layer de la ortofoto para trabajar más cómodamente.



*Imagen No 11-42. Verificación de curvas de nivel.  
Fuente: Elaboración propia.*

Abriremos el archivo con extensión .DXF que nos entrega Pix4D.



*Imagen No 11-43. Contorno de Pix4D agregado a Civil 3D.  
Fuente: Elaboración propia.*

Seleccionaremos el comando “Explode” para dejar nuestras curvas de nivel de manera individual.

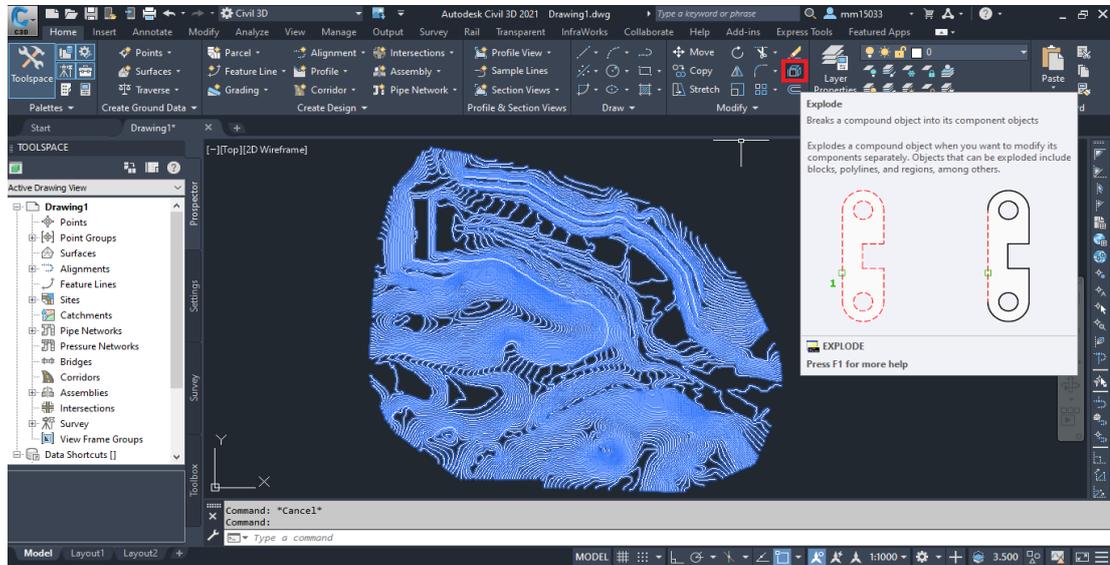


Imagen No 11-44. División de curvas de nivel.

Fuente: Elaboración propia.

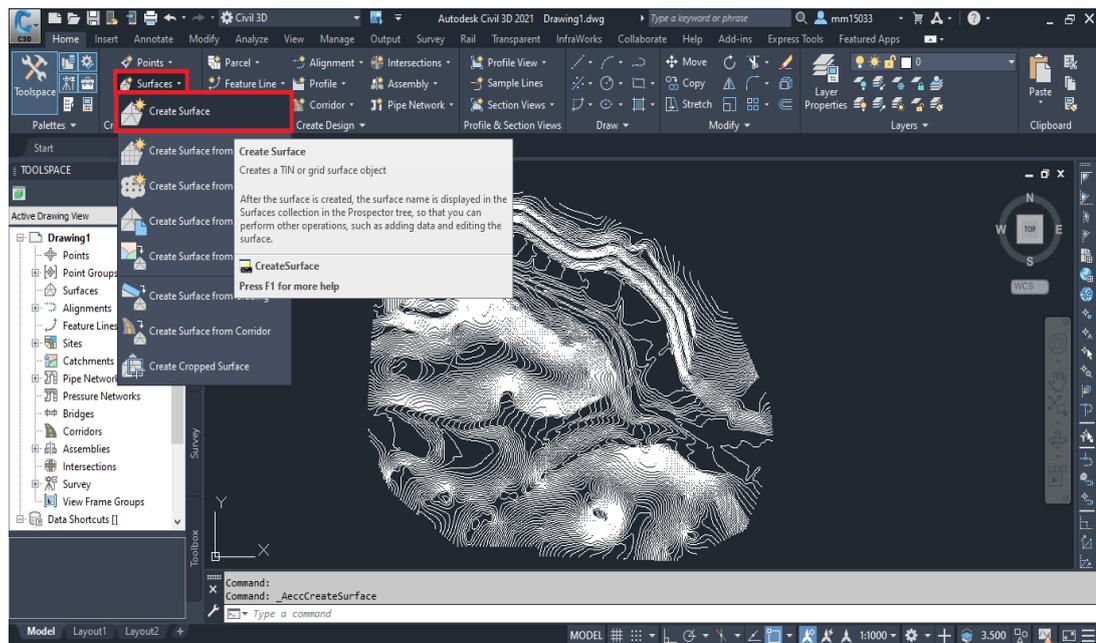
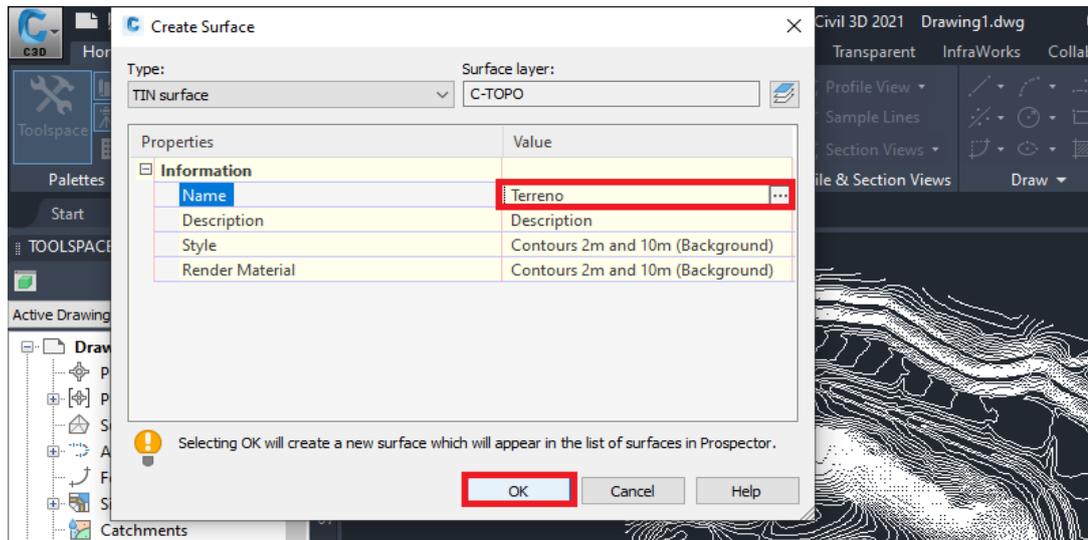


Imagen No 11-45. Creación de superficie de terreno.

Fuente: Elaboración propia.

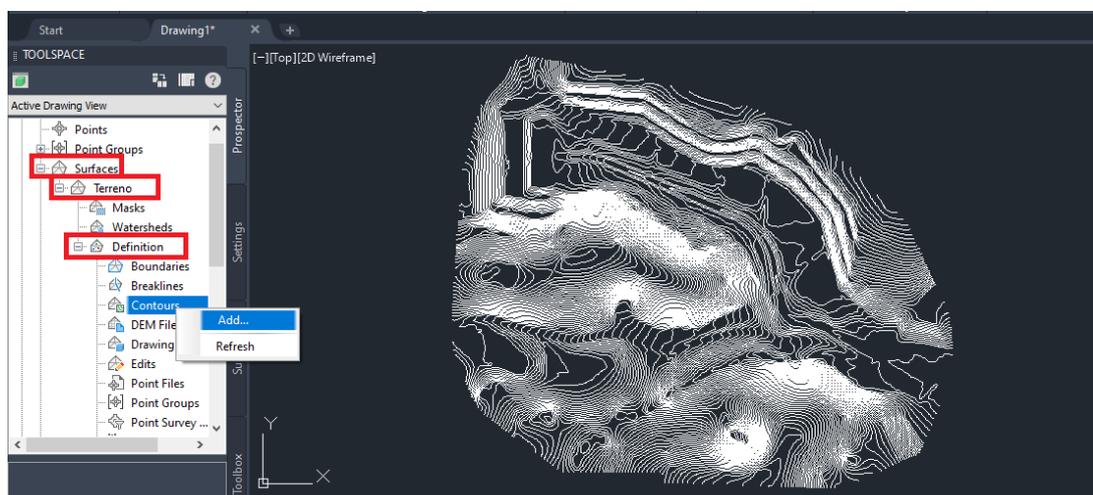
Nombraremos nuestra superficie y seleccionaremos “OK”.



*Imagen No 11-46. Creación de superficie de terreno.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Para añadir información a nuestra superficie creada, seguiremos la siguiente ruta en el TOOLSPACE: Surfaces > Terreno (Superficie creada por nosotros) > Definition > Contours > Add.



*Imagen No 11-47. Añadir información a la superficie creada.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Seleccionaremos nuestras curvas de nivel y presionaremos “Enter”.

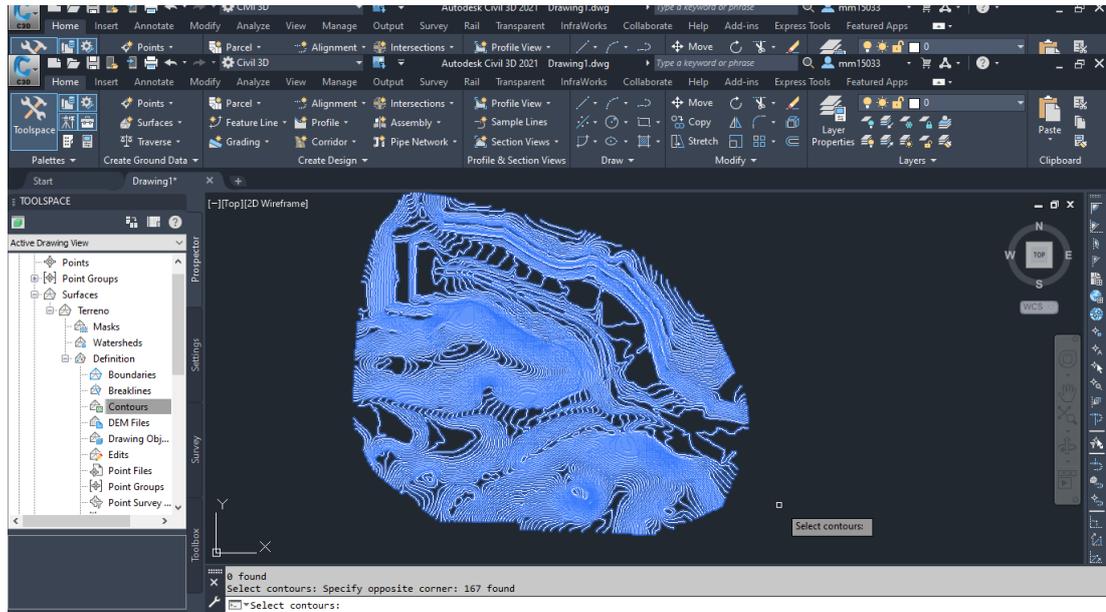


Imagen No 11-48. Añadir información a la superficie creada.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha creado nuestra superficie de terreno natural, procederemos a desactivar el Layer para trabajar cómodamente.

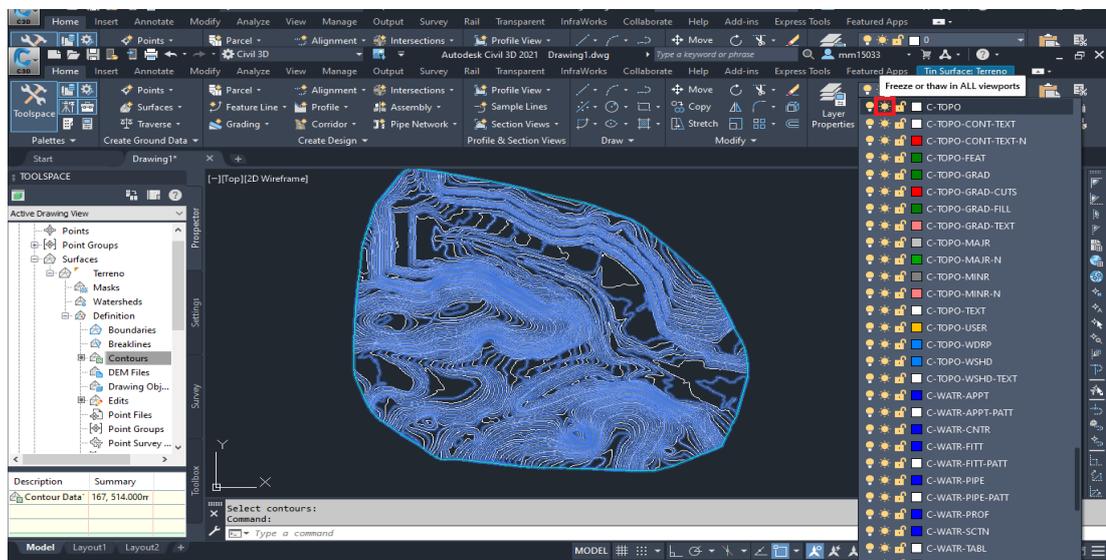
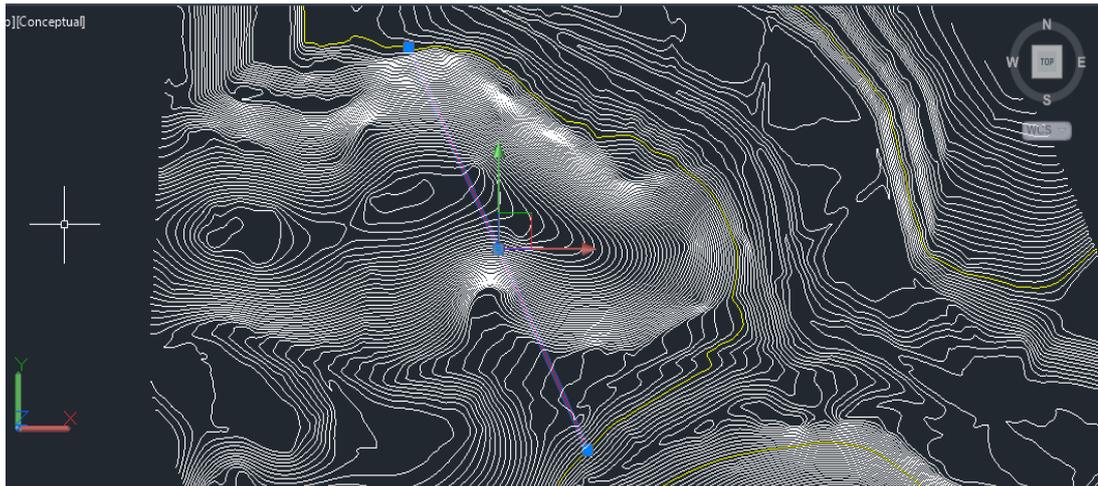


Imagen No 11-49. Superficie de terreno.

Fuente: Elaboración propia.

Trazaremos una polilínea (marcada en la imagen) donde queremos que pase nuestra superficie procurando que pase por la misma curva de nivel (marcada en amarillo en la imagen)

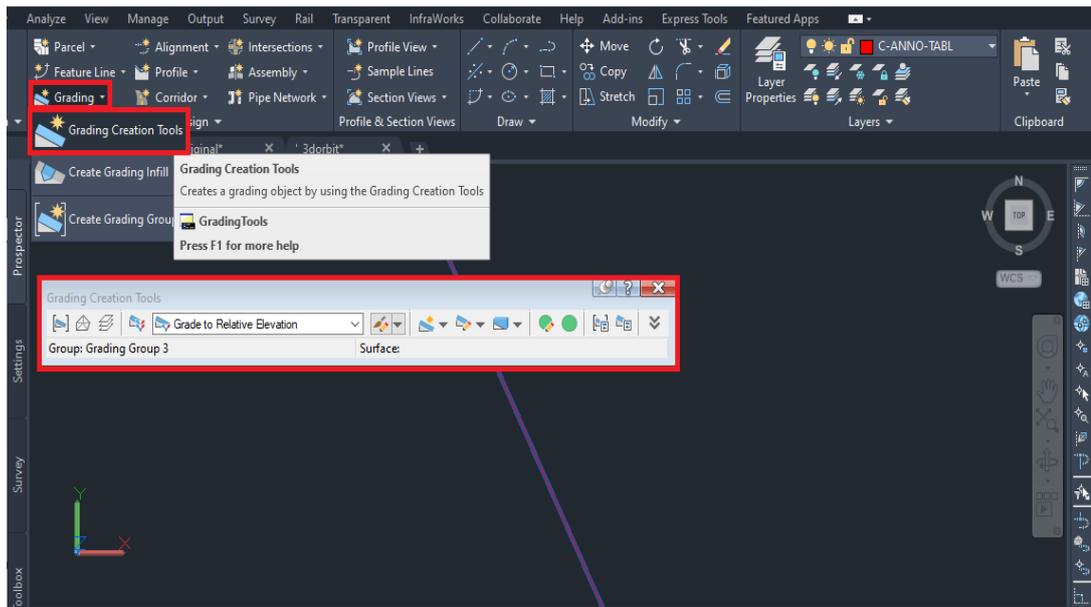
Se ha elegido que la superficie pase por aquí para que contraste con taludes ya existentes.



*Imagen No 11-50. Trazo de polilínea.  
Fuente: Elaboración propia.*

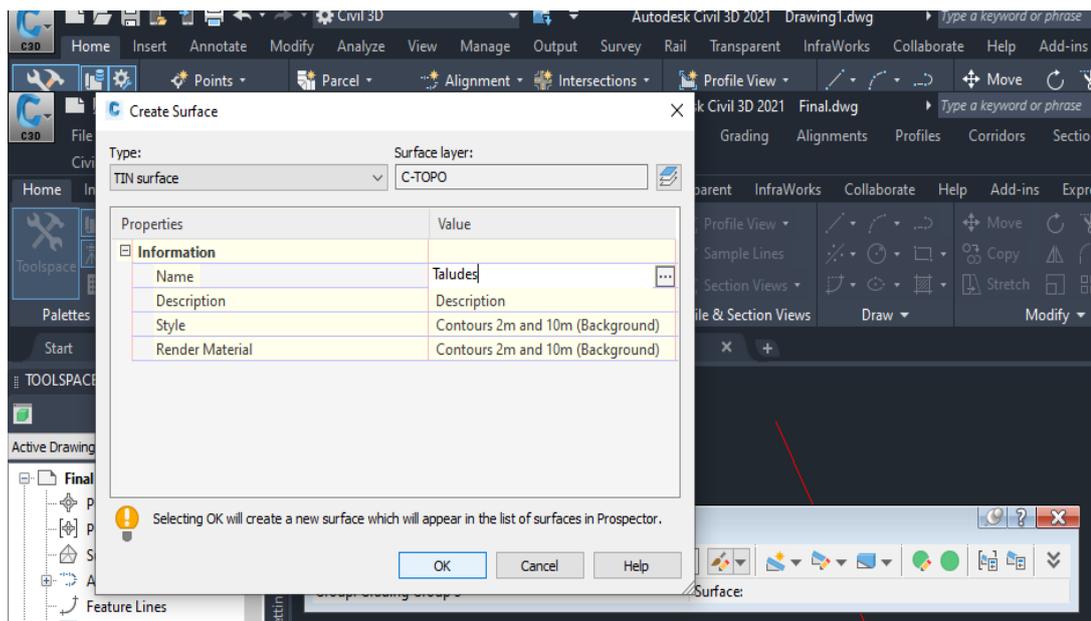
Podemos ocultar el Layer de las Curvas de Nivel para trabajar mejor.

El siguiente paso es ir a la herramienta “Grading” y seleccionar “Grading Creation Tools” y nos aparecerá la barra de herramientas para la creación de explanación.



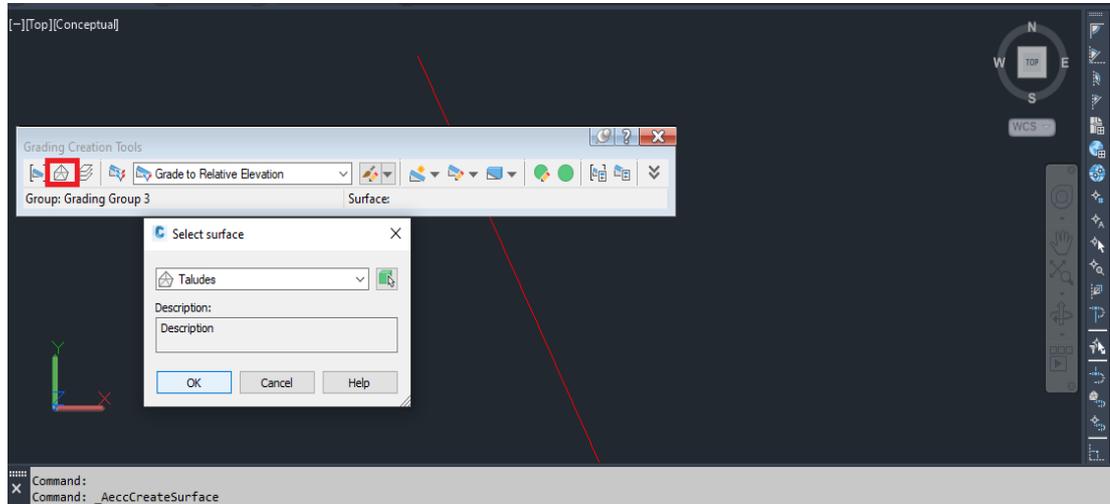
*Imagen No 11-51. Barra de herramientas de Grading Creation.  
Fuente: Elaboración propia.*

Crearemos una nueva superficie llamada “Taludes”.



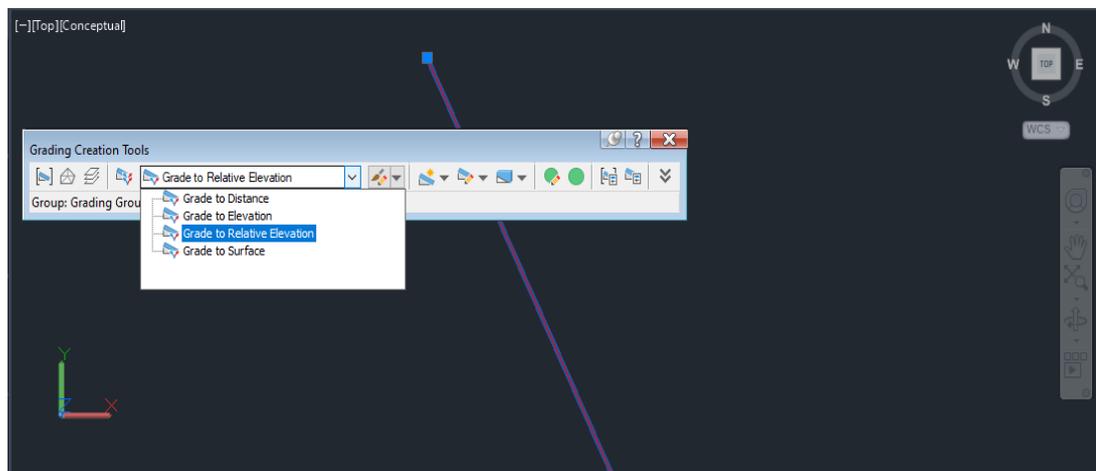
*Imagen No 11-52. Creación de superficie de Taludes.  
Fuente: Elaboración propia.*

Daremos clic en el ícono marcado en la imagen y seleccionaremos la superficie Taludes.



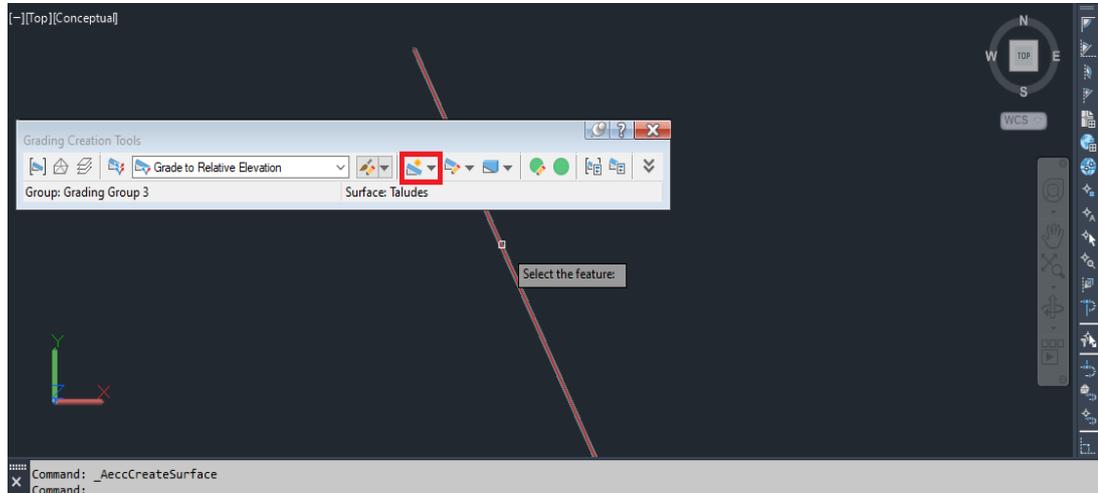
*Imagen No 11-53. Selección de superficie.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para la creación del primer talud según nuestro diseño, elegiremos la opción “Grade to Relative Elevation”.



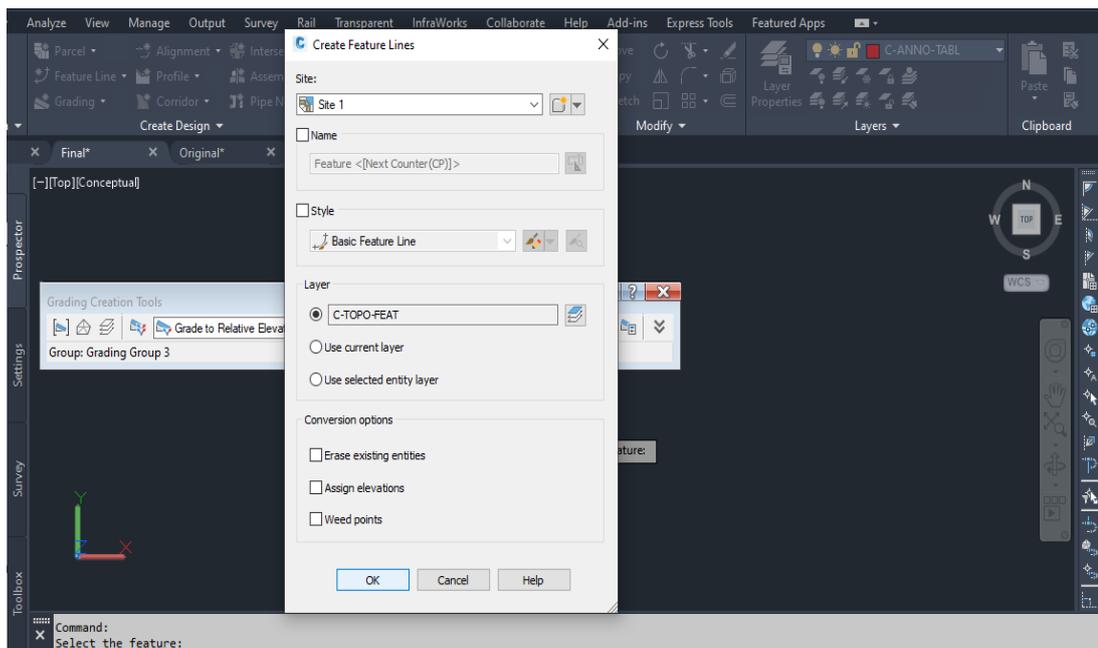
*Imagen No 11-54. Creación de talud.  
Fuente: Elaboración propia.*

A continuación, crearemos una explanación nueva dando clic en el ícono marcado y seleccionando nuestra polilínea.



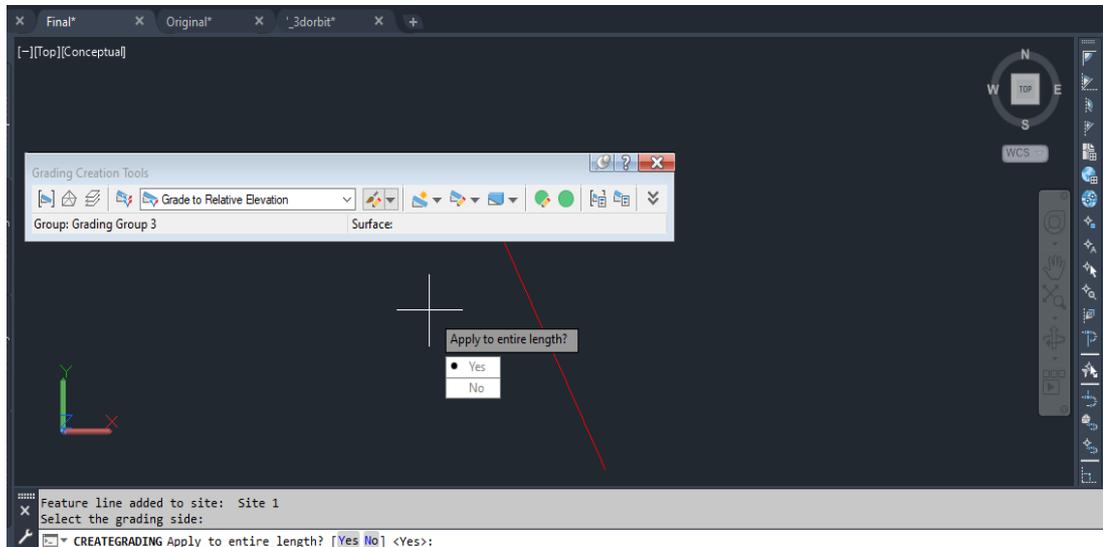
*Imagen No 11-55. Creación de talud.  
Fuente: Elaboración propia.*

Nos mostrará la siguiente ventana la cual podemos dejar por defecto.



*Imagen No 11-56. Creación de talud.  
Fuente: Elaboración propia.*

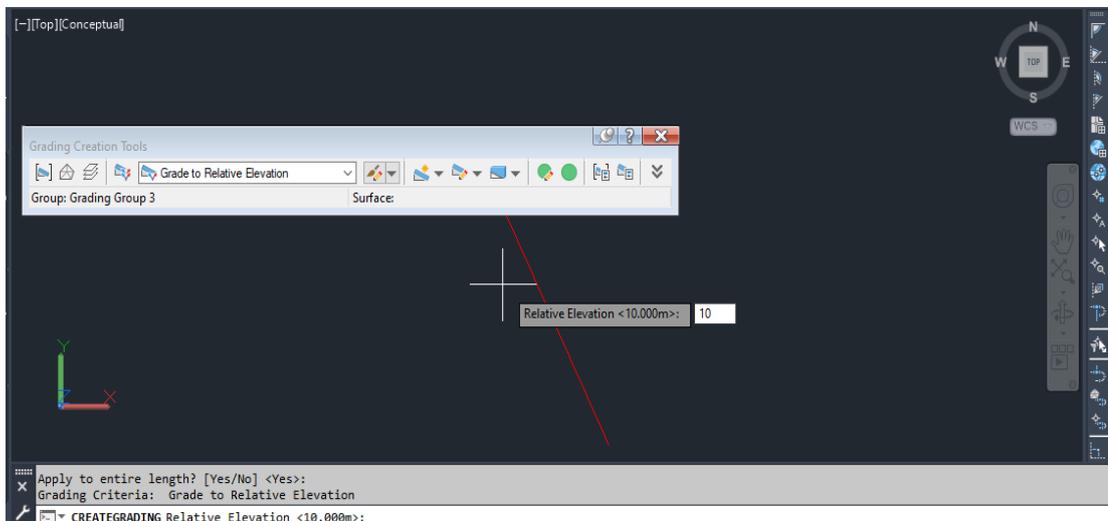
Nos preguntará si deseamos aplicar a toda la línea, seleccionaremos que sí.



*Imagen No 11-57. Creación de talud.*

*Fuente: Elaboración propia.*

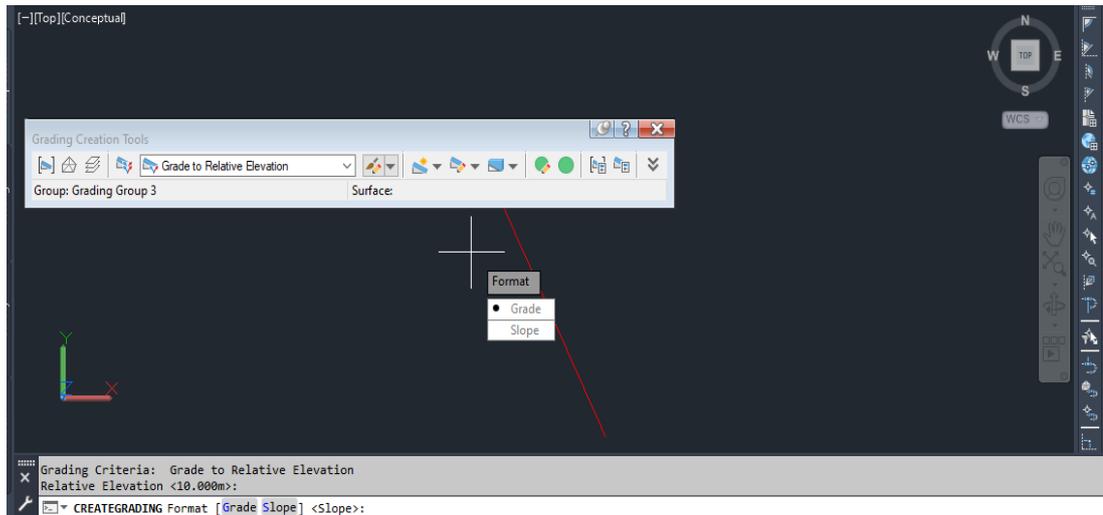
En Elevación Relativa digitamos 10 metros por diseño para el primer talud.



*Imagen No 11-58. Creación de talud.*

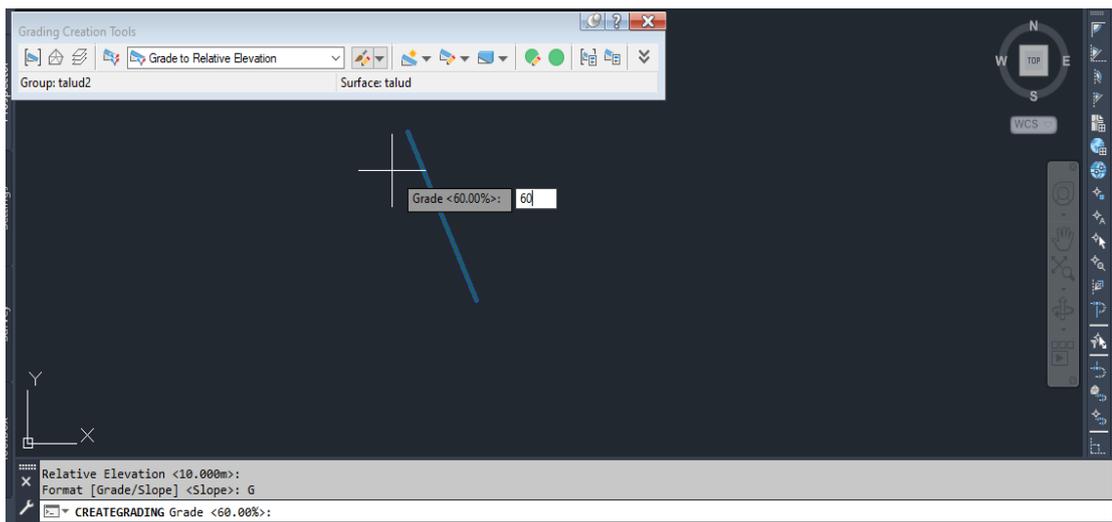
*Fuente: Elaboración propia.*

En Formato elegiremos la opción Grados.



*Imagen No 11-59. Creación de talud.  
Fuente: Elaboración propia.*

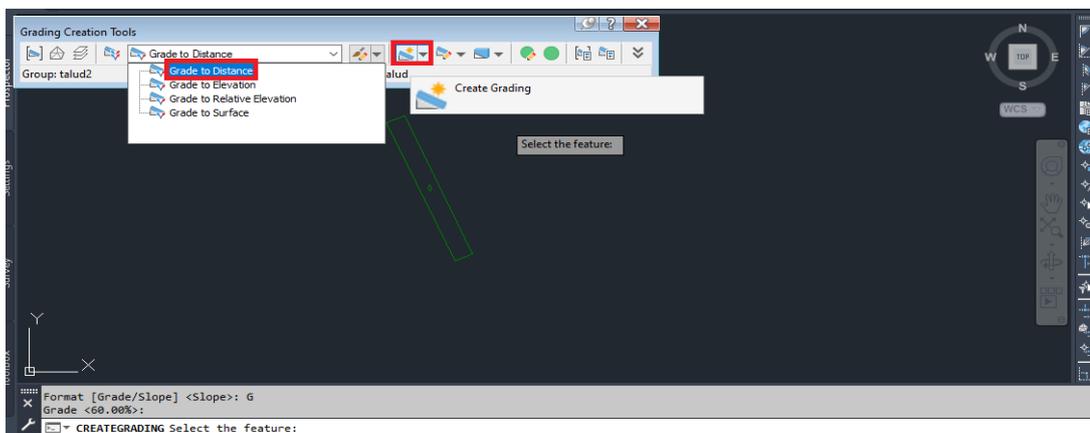
Escribiremos 60 grados según diseño y daremos Enter.



*Imagen No 11-60. Creación de talud.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se creará el primer talud.

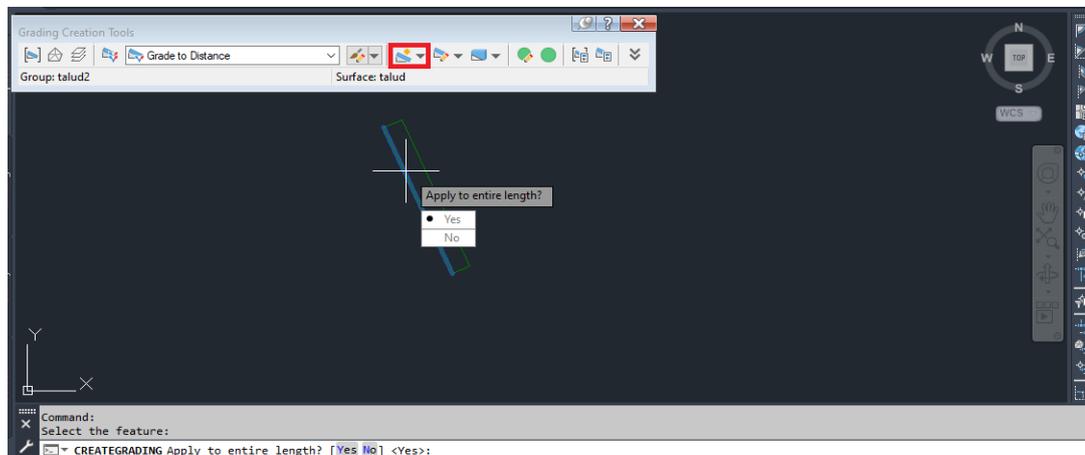
A continuación, para el siguiente segmento que según diseño es una berma de 4 metros de ancho, seleccionaremos “Grade to Distance” en la barra de herramientas.



*Imagen No 11-61. Creación de Berma.*

*Fuente: Elaboración propia*

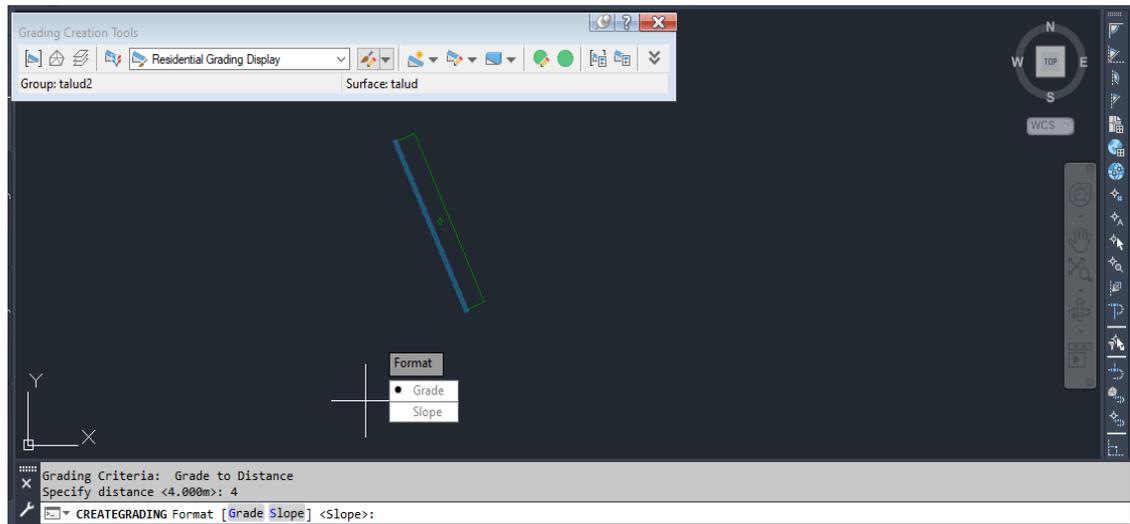
Crearemos una nueva explanación en el botón marcado y seleccionamos la línea de la corona del talud, nos preguntará si deseamos aplicar a toda la línea, seleccionamos que Sí.



*Imagen No 11-62. Creación de Berma de 4 metros de ancho.*

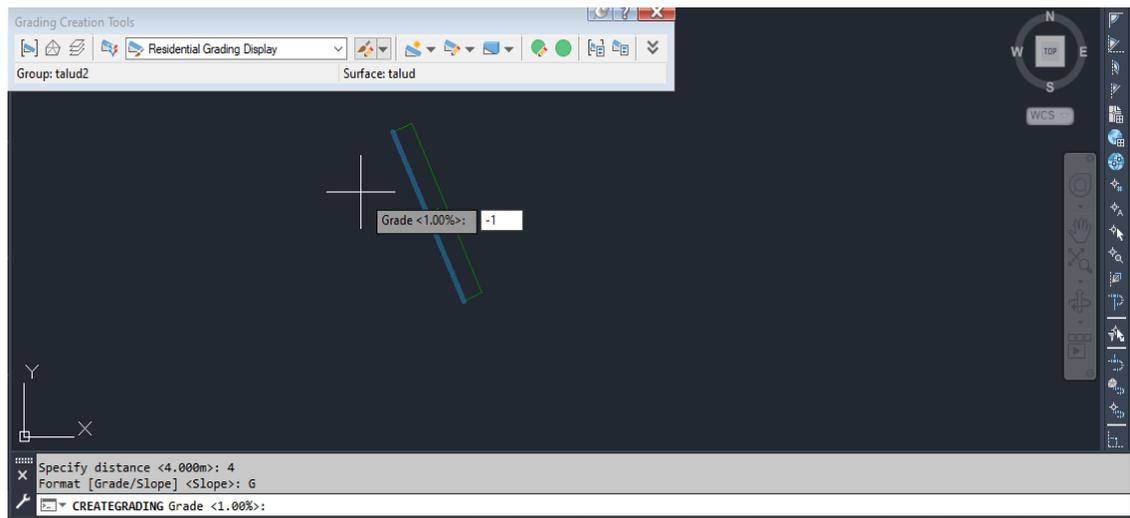
*Fuente: Elaboración propia.*

En Format seleccionamos Grados.



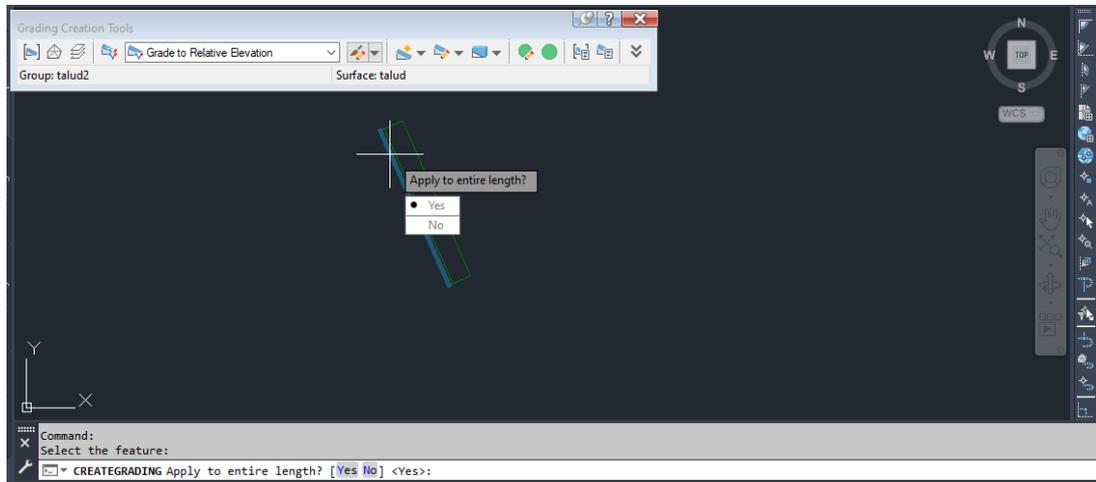
*Imagen No 11-63. Creación de Berma.  
Fuente: Elaboración propia*

Digitamos -1% para que tenga drenaje hacia la canaleta.



*Imagen No 11-64. Creación de Berma.  
Fuente: Elaboración propia.*

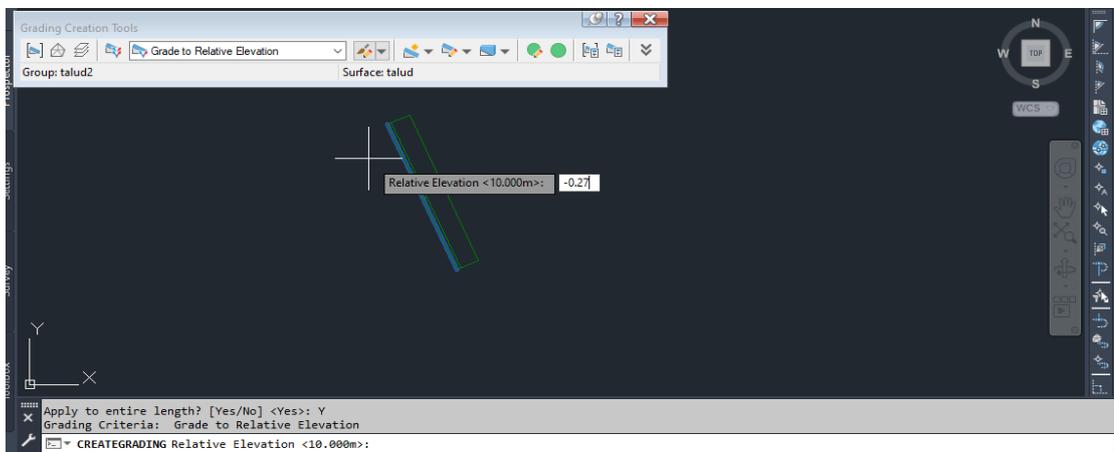
Para la siguiente sección que es canaleta nuevamente usaremos la opción “Grade to Relative Elevation”, nos preguntará si queremos aplicarlo a toda la línea y daremos clic en Sí.



*Imagen No 11-65. Creación de canaleta.*

*Fuente: Elaboración propia.*

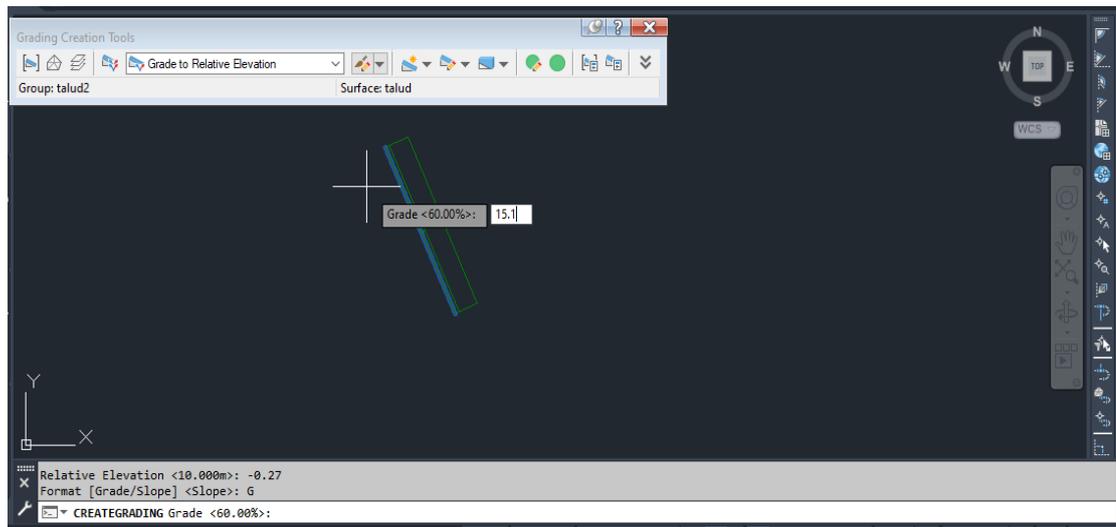
Nos solicita definir nuestra elevación relativa, ingresamos -0.27 metros según diseño.



*Imagen No 11-66. Creación de canaleta.*

*Fuente: Elaboración propia*

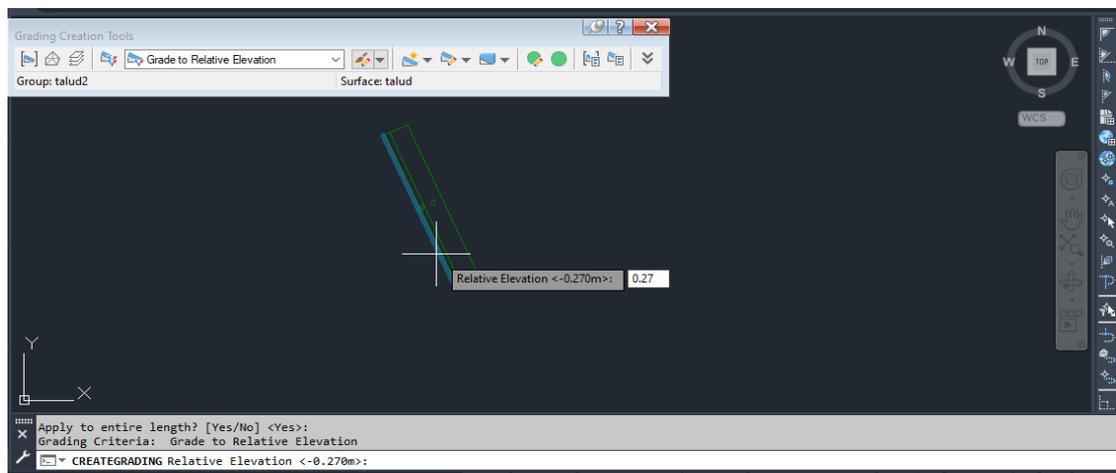
A continuación digitamos 15.1° y presionamos Enter.



*Imagen No 11-67. Creación de canaleta.  
Fuente: Elaboración propia.*

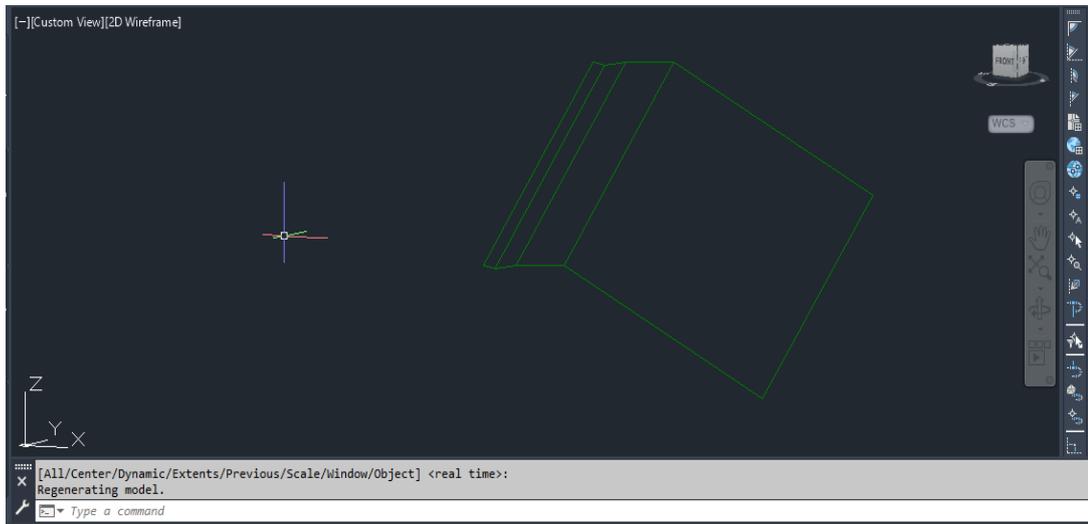
Para nuestra última sección repetimos los pasos anteriores.

En elevación relativa ingresamos 0.27 metros y en grados 27.4° según diseño.



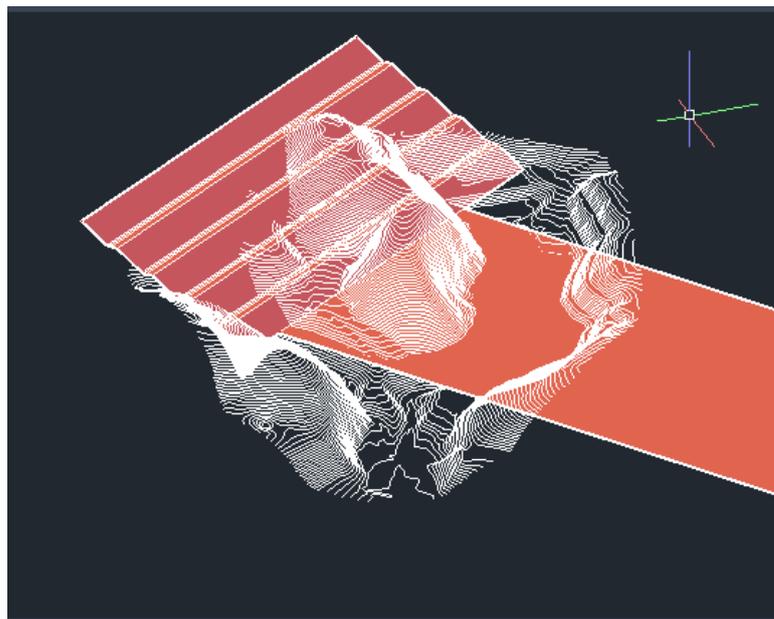
*Imagen No 11-68. Creación de canaleta.  
Fuente: Elaboración propia.*

Así obtenemos nuestra sección de talud de diseño.



*Imagen No 11-69. Superficie de talud creada.  
Fuente: Elaboración propia.*

Seguiremos repitiendo los pasos anteriores hasta obtener nuestra superficie deseada.



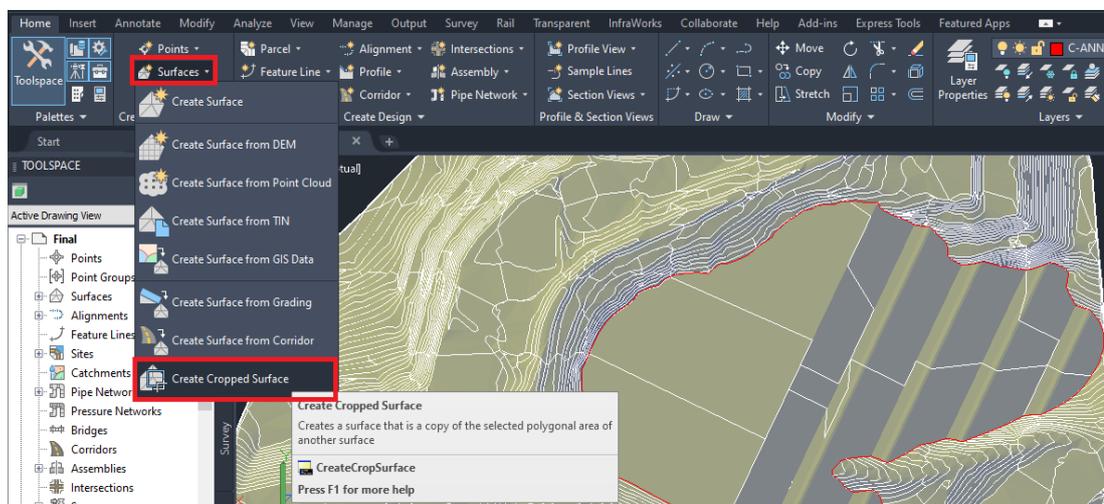
*Imagen No 11-70. Superficie de taludes de diseño.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se bordeará con una polilínea donde se intersectan ambas superficies para posteriormente recortar la superficie de taludes.



*Imagen No 11-71. Bordeado de intersección de superficies.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para recortar la superficie debemos usar la herramienta “Create Cropped Surface” en Surfaces.



*Imagen No 11-72. Recorte de superficie de taludes.  
Fuente: Elaboración propia.*

Nos abrirá la siguiente ventana donde nombraremos nuestra superficie como “Talud” y daremos clic en los tres puntos de “Select Crop Area”.

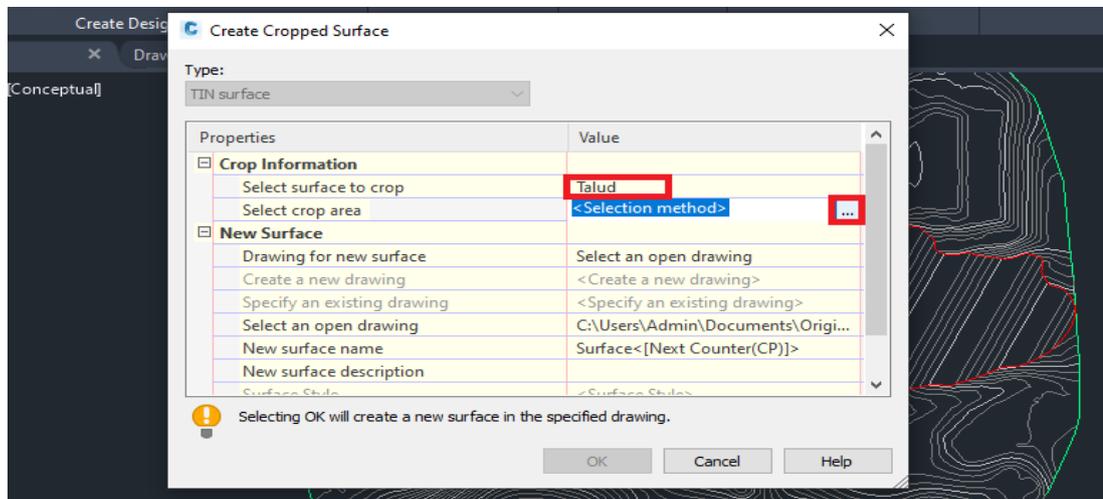


Imagen No 11-73. Corte de superficie de talud.

Fuente: Elaboración propia.

Seleccionaremos la opción “Objeto” y marcaremos la polilínea de borde creada.

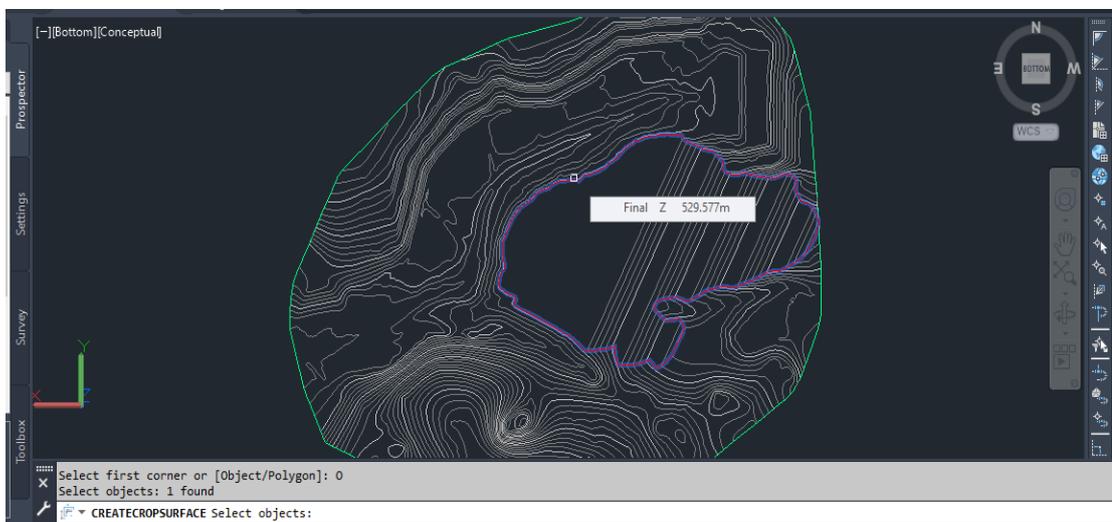
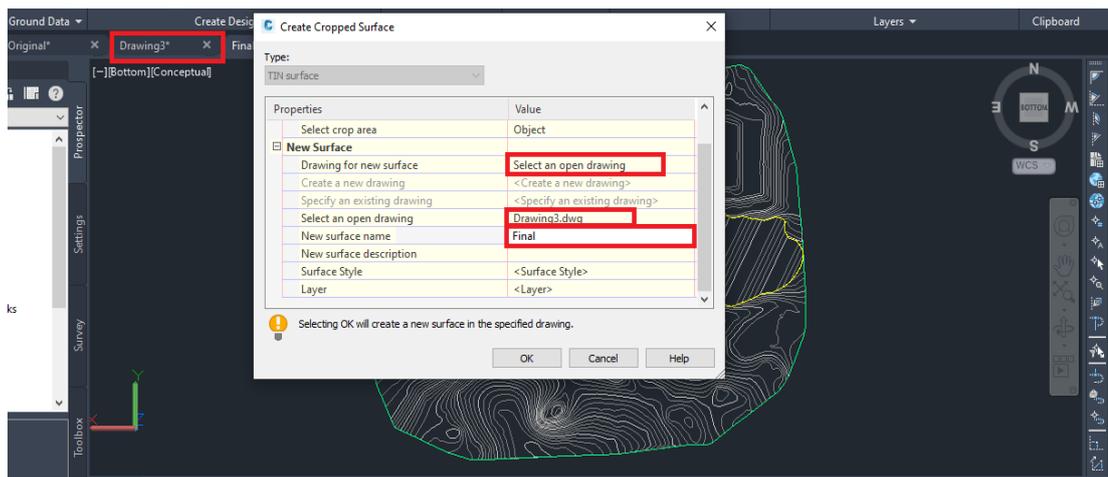


Imagen No 11-74. Corte de superficie de talud.

Fuente: Elaboración propia.

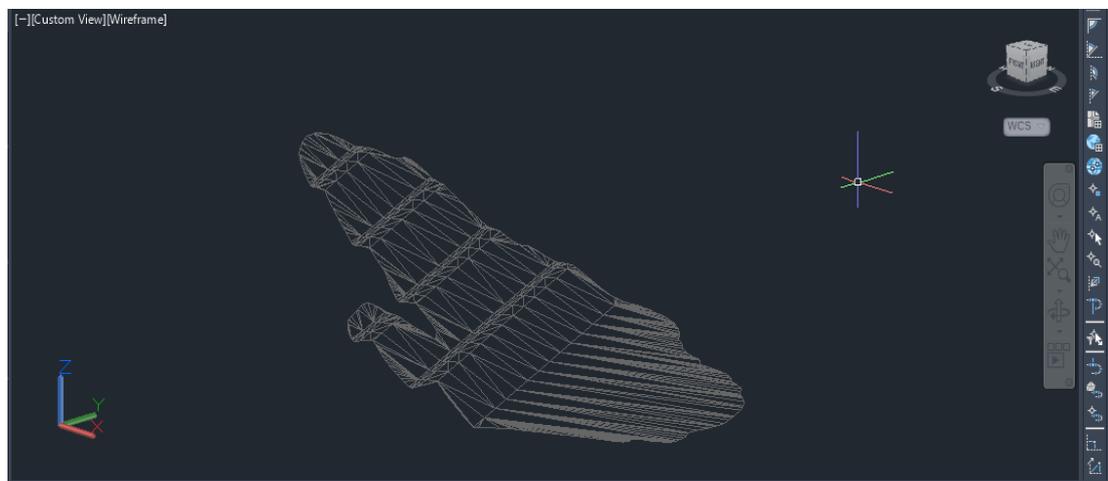
Abriremos un nuevo dibujo auxiliar para colocar provisionalmente nuestra superficie recortada y lo seleccionamos en la opción de “Select an open drawing”.

Nombraremos la superficie a crear como “Final” y daremos clic en OK.



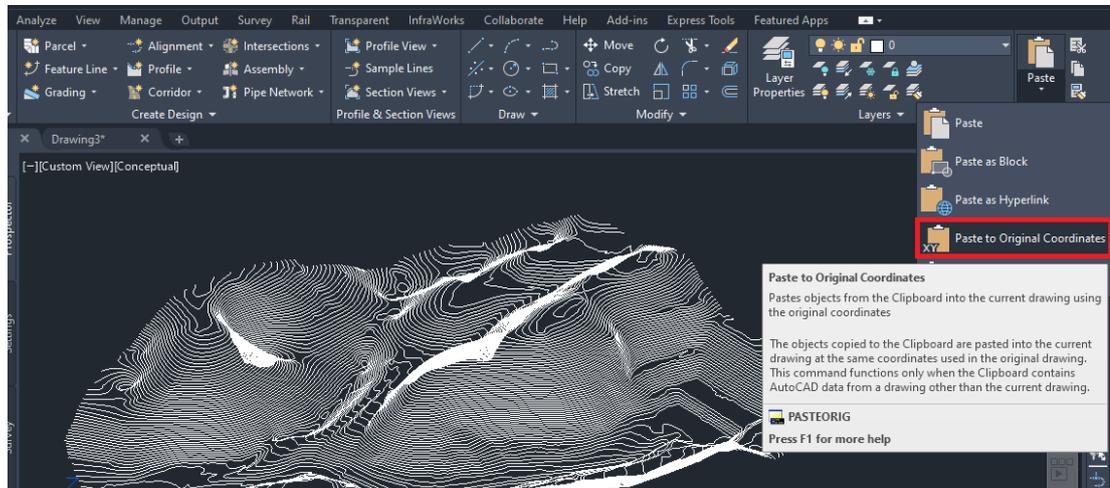
*Imagen No 11-75. Parámetros para la creación de superficie recortada.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se crea la superficie recortada en el dibujo auxiliar.



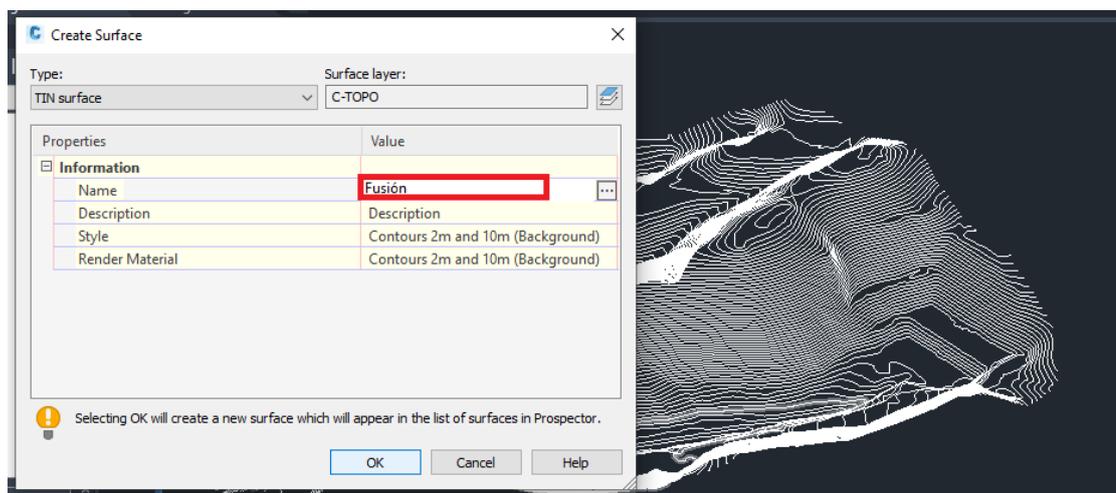
*Imagen No 11-76. Superficie de taludes recortada.  
Fuente: Elaboración propia.*

Procedemos a copiarla y pegarla en nuestro dibujo de trabajo principal con la opción “Paste to Original Coordinates”.



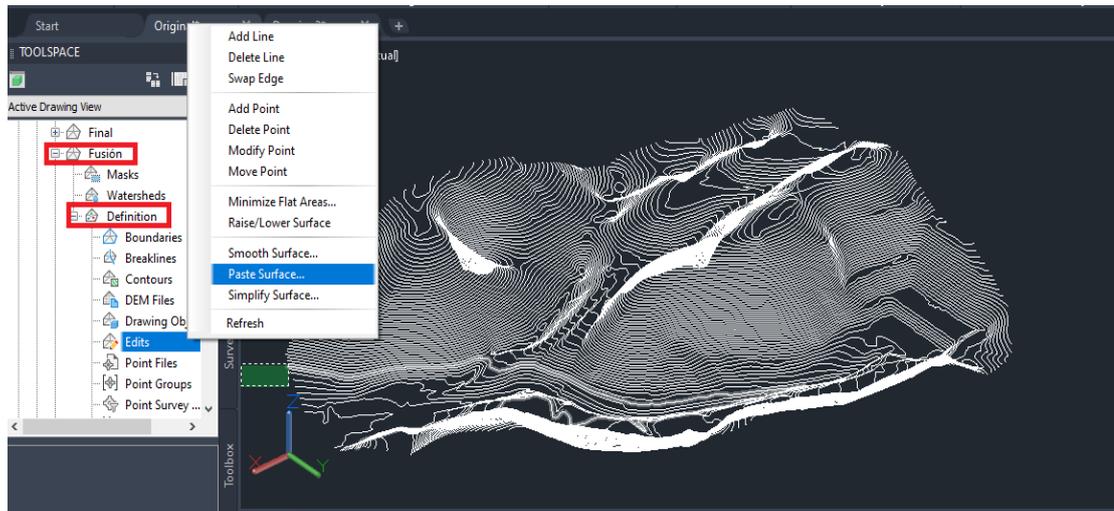
*Imagen No 11-77. Colocación de ambas superficies en un mismo dibujo.  
Fuente: Elaboración propia.*

Procedemos a crear una nueva superficie donde se fusionarán la superficie del terreno y los taludes.



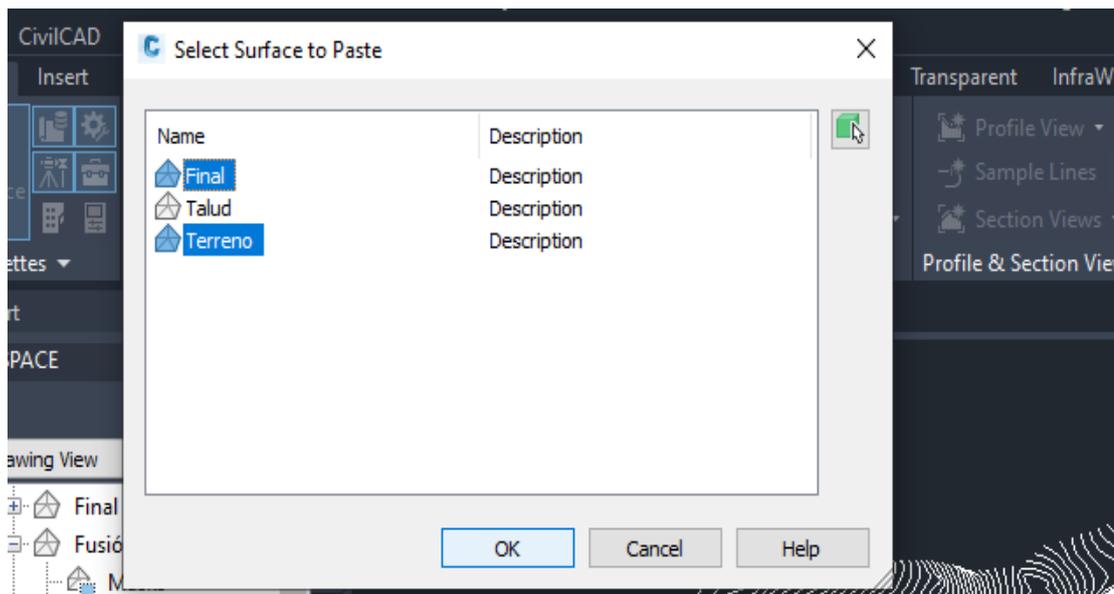
*Imagen No 11-78. Creación de superficie final.  
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez creada iremos a “Definition” > “Edits” > “Paste Surface”.



*Imagen No 11-79. Creación de superficie final.  
Fuente: Elaboración propia.*

Procedemos a seleccionar las superficies a fusionar.



*Imagen No 11-80. Selección de superficies a fusionar.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se creará la superficie fusionada final.

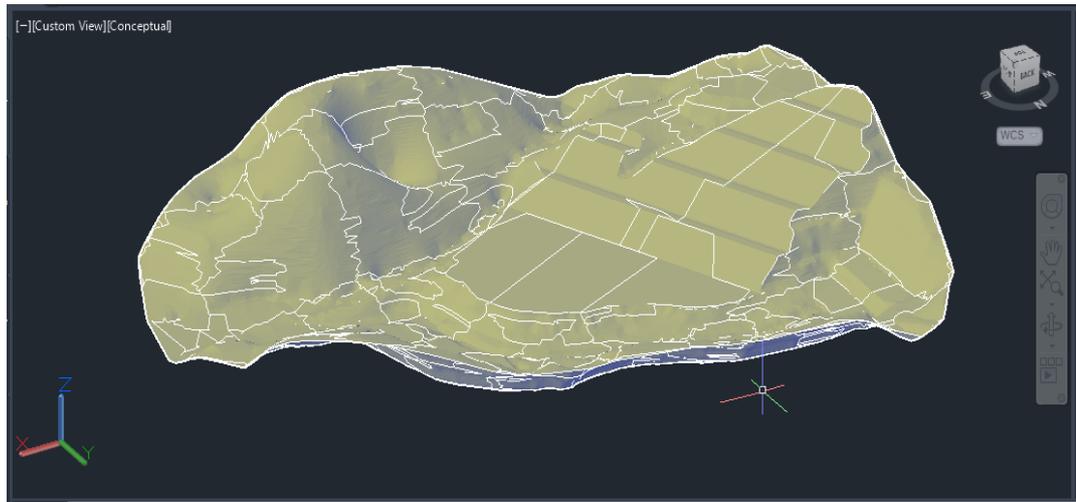


Imagen No 11-81. Superficie de diseño.  
Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del volumen de corte usaremos la herramienta “Volumes Dashboard” en la ventana “Analyze”.

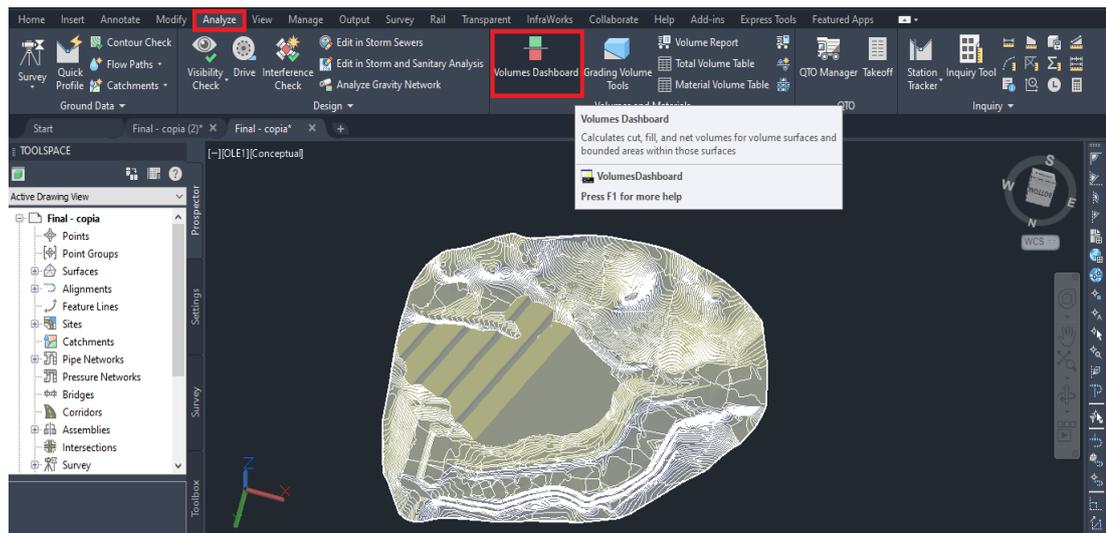


Imagen No 11-82. Cálculo de volúmenes.  
Fuente: Elaboración propia.

Se abrirá la siguiente ventana donde nombraremos nuestra superficie de volúmenes, posteriormente seleccionamos nuestra Superficie base “Terreno” y la superficie de comparación “Fusión” y daremos OK.

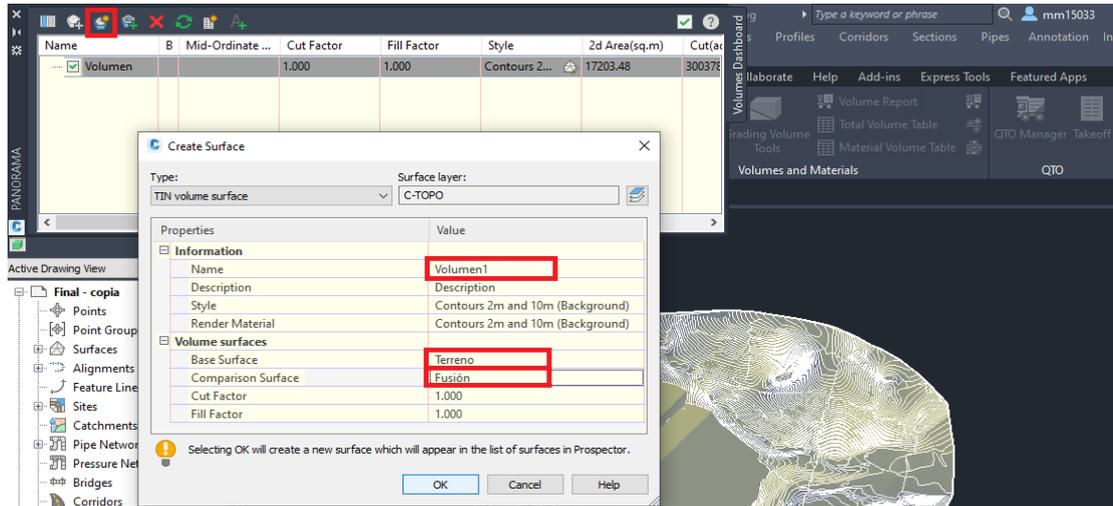


Imagen No 11-83. Cálculo de volúmenes.  
Fuente: Elaboración propia.

Podemos generar un reporte PDF en el ícono marcado.

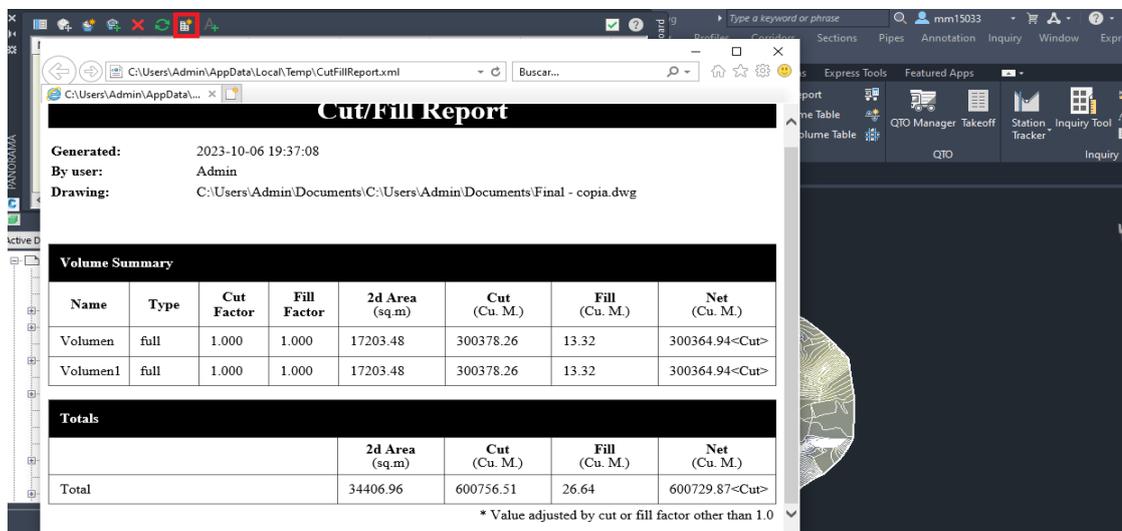


Imagen No 11-84. Generación de reporte de volúmenes de corte.  
Fuente: Elaboración propia.

O bien podemos crear una tabla en el dibujo dando clic en el ícono marcado.

The screenshot displays the AutoCAD interface. At the top, a table lists the volume data for a specific object:

Name	B	Mid-Ordinate ...	Cut Factor	Fill Factor	Style	2d Area(sq.m)	Cut(ac
Volumen			1.000	1.000	Contours 2...	17203.48	300378

Below this, the 'Active Drawing View' shows a tree structure of the drawing's elements, including Points, Point Groups, Surfaces, Alignments, Feature Lines, Sites, Catchments, Pipe Networks, Pressure Networks, and Bridges.

In the bottom right, the 'Prospector' panel displays a 'Cut/Fill Summary' table:

Name	Cut Factor	Fill Factor	2d Area	Cut
Volumen	1.000	1.000	17203.48sq.m	300378.26 Cu. M.
<b>Totals</b>			<b>17203.48sq.m</b>	<b>300378.26 Cu. M.</b>

Imagen No 11-85. Creación de tabla de volúmenes de corte.

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO XII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusión**

Para llevar a cabo un levantamiento fotogramétrico exitoso se debe tener un orden o plan de vuelo bien definido para no tener ningún inconveniente o imprevisto en el levantamiento. Tener en cuenta todos los parámetros necesarios para las condiciones en campo es esencial, como lo son el tiempo de vuelo, la altura de vuelo, la configuración del RTH, la duración de la batería misma, etc. son parámetros que se deben verificar y que son muy importantes para las condiciones en campo, sobre todo en el análisis de una cárcava en donde las condiciones de vuelo son riesgosas, agregando el hecho de estar cercano a una zona restringida como lo es el aeropuerto de Ilopango. Las técnicas aprendidas durante el curso de especialización fueron muy valiosas y de gran ayuda; por ejemplo, se usó la técnica de Estático para dar coordenadas a un vértice geodésico. Además, La técnica RTK usada para el levantamiento de los puntos de control también contribuyó a cumplir con los objetivos de este trabajo. En resumen, las técnicas aprendidas sobre tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería, es valiosa en el campo de la construcción, siempre y cuando se aplique a proyectos donde facilite y reduzca el tiempo; en este caso haciendo uso de drones en levantamiento topográfico para el análisis de cárcava en residencial Santa Lucía, municipio de Ilopango.

## Recomendaciones

- Ajustar el área de vuelo y la altura de tal manera que la batería dure lo suficiente para completar la misión y luego evitar problemas de bloqueo o restricciones, sobre todo en un área restringida como por ejemplo en cercanía del aeropuerto de Ilopingo.
  
- Un día previo al levantamiento en campo se debe verificar las condiciones climáticas en aplicaciones o en internet, así como también las condiciones técnicas como por ejemplo verificar si en el sitio hay acceso a internet para el caso del levantamiento con la técnica Estática.
  
- Es importante el reconocimiento en campo previo al uso de cualquier equipo, así con anticipación se prevén todos los pros y contras para ir preparados y no tener ningún retraso el día que se usará equipo GPS o dron.
  
- Al menos dos miembros del grupo deben tener computadoras o equipos potentes con las siguientes características:
  - Windows 10 como mínimo
  - Procesador i7 de 10th Gen o superior
  - Memoria RAM de 16 GB o más
  - Tarjeta de video NVIDIA y gráficos dedicados
  - Disco de almacenamiento SSD de 1 TB.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- *INFORME DE SEGUIMIENTO A CÁRCAVA EN COLONIA SANTA LUCIA. ILOPANGO, SAN SALVADOR. MOP-DACGER-30-2019.*
- *Hacia un sistema de clasificación de cárcavas, Jesús E. Santiago.*
- *El Estado y las garantías constitucionales: formación de cárcavas en las colonias de San Salvador. Revista entorno, Universidad Tecnológica de El Salvador.*
- *Material didáctico visto en Tecnología GPS y sensores remotos para proyectos de ingeniería civil, Ing. Wilfredo Amaya 2023.*
- *Sitio oficial de la IERS: [https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home\\_node.html](https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html)*
- *Conceptos básicos de sistemas geodésicos de referencia del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.*
- *Conceptos básicos en geodesia como insumo para un tratamiento adecuado de la información geoespacial.*

## ANEXOS

### Anexo 1 - Perfil de corte de superficie



## Anexo 2 - Informe de Pix4D



# Quality Report

Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

**!** **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

**💡** Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary **i**

Project	Santa Lucia
Processed	2023-10-18 11:55:17
Camera Model Name(s)	FC6310_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.87 cm / 1.13 in
Area Covered	0.081 km <sup>2</sup> / 8.0913 ha / 0.03 sq. mi. / 20.0043 acres

### Quality Check **i**

<b>?</b> Images	median of 76033 keypoints per image	<b>✓</b>
<b>?</b> Dataset	263 out of 263 images calibrated (100%), all images enabled	<b>✓</b>
<b>?</b> Camera Optimization	0.42% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	<b>✓</b>

🔍 Matching	median of 26924.1 matches per calibrated image	✓
🔍 Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.049 m	✓

### 🔍 Preview

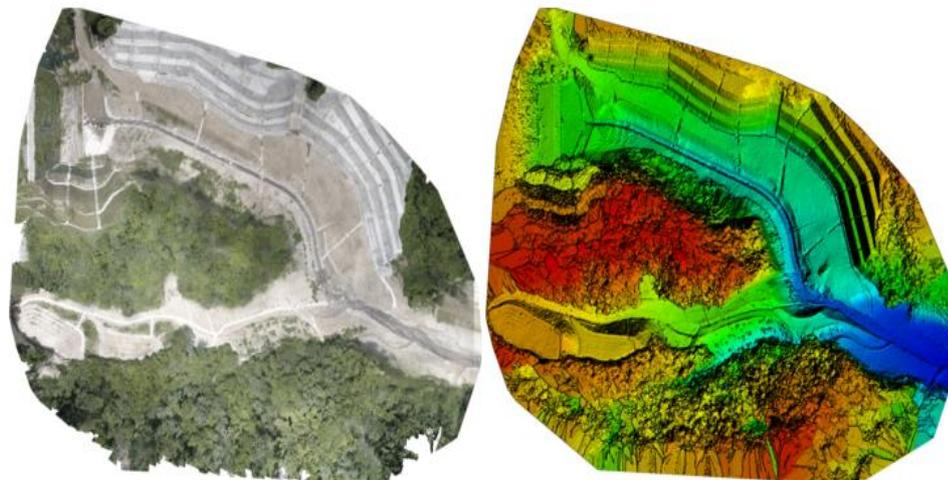


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

## Calibration Details

Number of Calibrated Images	263 out of 263
Number of Geolocated Images	263 out of 263

### 🔍 Initial Image Positions

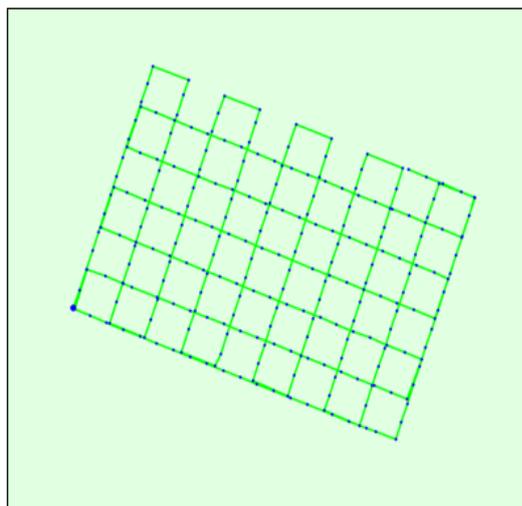
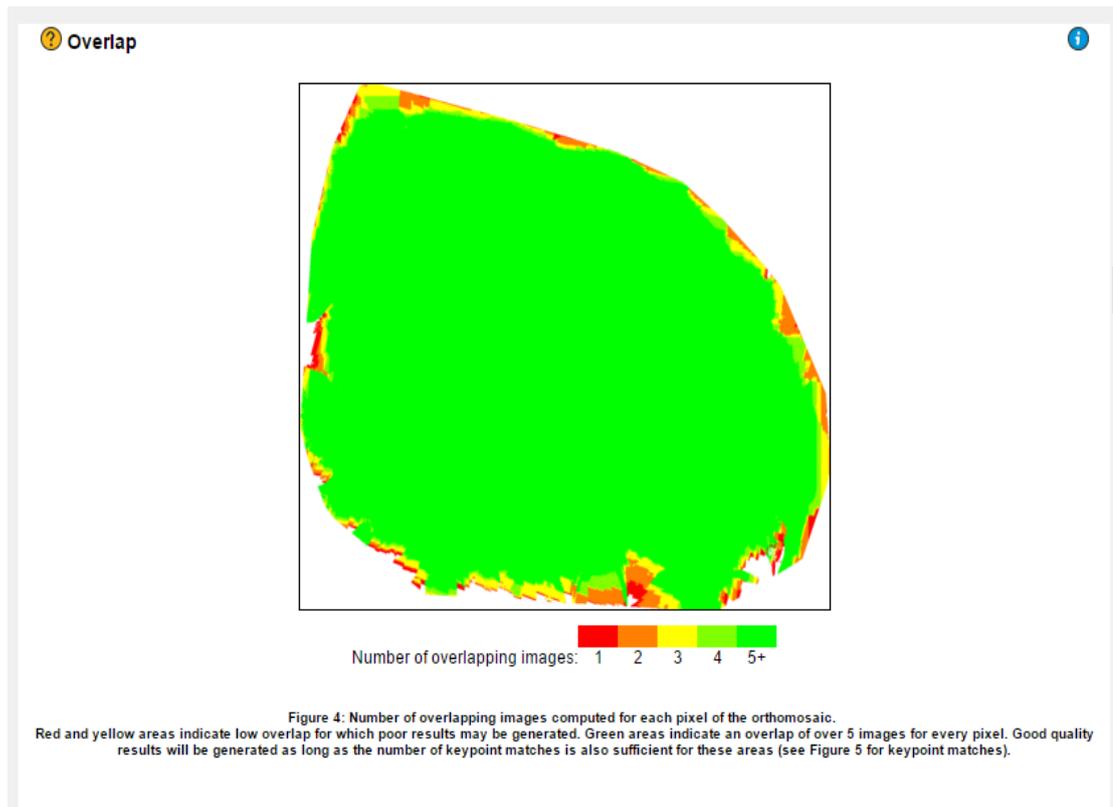
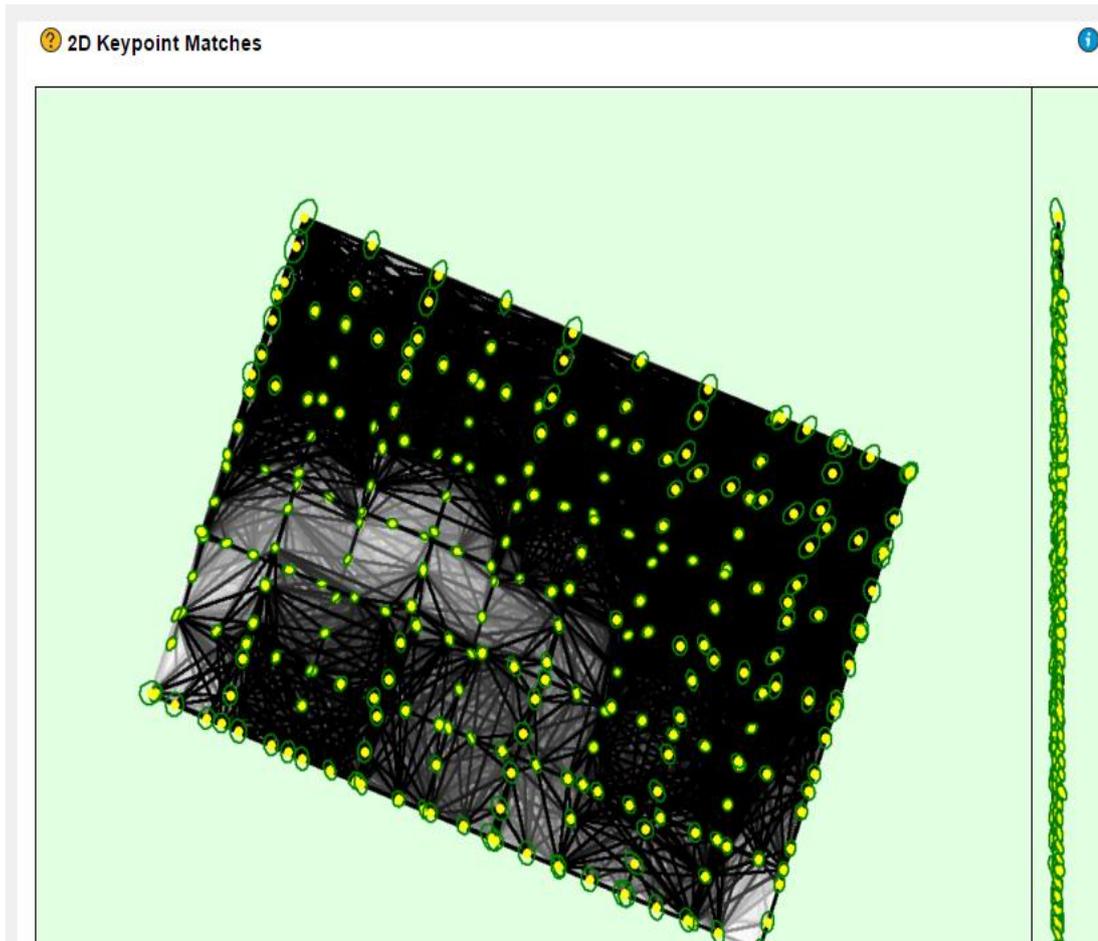


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.





## **GLOSARIO TÉCNICO**

**Geodesia:** Geo, Tierra; daien, dividir; puede definirse como dividir la Tierra.

**Geoide:** Geo: Tierra, Eidos: aspecto o apariencia; puede definirse como forma real de la Tierra.

**WGS84:** Sistema geodésico mundial creado en 1984, por sus siglas en inglés (World Geodetic System).

**CTRS:** Sistema de referencia terrestre convencional, por sus siglas en inglés (Conventional Terrestrial Reference System).

**IERS:** Servicio Terrestre internacional de rotación, por sus siglas en inglés (International Earth Rotation Service).

**NAD27:** Datum de Norteamérica de 1927, por sus siglas en inglés (North American Datum of 1927).

**USGS:** Inspección geológica de Estados Unidos, por sus siglas en inglés (United States Geological Survey).

**GPS:** Sistema de posicionamiento global, por sus siglas en inglés (Global Position System).

**ITRS:** Sistema internacional de referencia terrestre, por sus siglas en inglés (International Terrestrial Reference System).

**ITRF:** Marco internacional de referencia terrestre, por sus siglas en inglés (International Terrestrial Reference Frame).

**SIRGAS:** Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (2001), Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (2001), Sistema de Referencia Geodésico para las Américas (2020)

**Fotogrametría:** Photo: Luz, Grama: Dibujo/Trazo/Representación, Metron: Medir; esto puede entenderse como medir objetos por medio de la luz.

