



Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón



## INFORME TÉCNICO DE PROCESADO DE DATOS

---

Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón

<b>Título</b>	Informe técnico de procesado de datos
<b>Versión</b>	1
<b>Autor</b>	
<b>Fecha</b>	2.018/04/09
<b>Materia</b>	Procesado de datos
<b>Publicador</b>	
<b>Tipo</b>	Texto
<b>Descripción</b>	Procesado de datos del proyecto
<b>Contribuciones</b>	
<b>Formato</b>	PDF
<b>Fuente</b>	Elaboración propia
<b>Derechos</b>	
<b>Identificador</b>	AyA_Dolinas_InformeTecnico
<b>Lenguaje</b>	Castellano
<b>Documentos relacionados</b>	
<b>Validez</b>	Hasta nueva versión



**Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados  
Centro de Documentación e Información  
UEN Investigación y Desarrollo**



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,  
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN  
EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

**Yo, Annette Henchoz Castro**

---

**N° Cédula: 1-0725-0409**

---

**Dependencia: Gerencia General**

---

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

**E-mail:** [centrodoc@aya.go.cr](mailto:centrodoc@aya.go.cr) **N° Teléfono:** 2242-5487

Annette  
Henchoz Castro

Firmado digitalmente por  
Annette Henchoz Castro  
Fecha: 2019.11.25 16:07:20  
-06'00'

**Firma:** \_\_\_\_\_



Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LIDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón



## FE DE ERRATAS

Se hace constar que, en el Documento Informe Técnico de procesado de datos, identificador AyA\_Dolinas\_InformeTecnico, de fecha 22 de enero de 2018, se han advertido los siguientes errores:

1. Página 26 (segundo párrafo). Se dice "Las ortofotografías generadas tienen un tamaño de pixel (GSD) de 0.10m". Debería decir **0.05m**.
2. Página 47 (primer párrafo). Se indica "La revisión manual de todas las zonas de interés extraídas ha dado lugar a la extracción de un total de 469 depresiones sobre el terreno..." Debería decir **467**.
3. Página 47 (segundo párrafo). Se indica como depresión identificada como de origen artificial la 299. Debería decir **399**.
4. Página 47 (segundo párrafo). Se indica "Por tanto, el número de dolinas identificadas como naturales es de 468". Debería decir **467**.
5. Página 47 (segundo párrafo). Se indica "... resultando un total de dolinas igual a 439". Debería decir **438**.
6. Página 51 (Tabla 7. Atributos correspondientes a las entidades puntuales). Los dos últimos campos MIN\_PT\_IDX y MAX\_PT\_IDX en la descripción dice "Identificador de los puntos de cota mínima (valor 1 cuando se trate de un punto de cota mínima, vacío en caso contrario)". Debería decir: "Identificador de los puntos de cota mínima (valor **0** cuando se trate de un punto de cota mínima, vacío en caso contrario)".
7. Página 54. Se dice: "... tal y como se muestra en la figura 23..." Debería decir: **figura 27**.
8. Página 66. Se dice en la última oración: "Como ejemplo, en la figura 41..." Debería decir: **figura 40**.
9. Página 74. (Tabla 19. Personal asistente a la jornada de capacitación). Se incluye al documento digital la lista de participantes con las firmas.

Las incidencias reseñadas se presentan corregidas en informe digital entregado con este documento y que sustituye el entregado el día 22 de enero de 2018.

Marcelo Solís Duncan  
Representante Consorcio Stereocarto



## TABLA DE CONTENIDO

1.- INTRODUCCIÓN.....	4
2.- FLUJO DE TRABAJO GENERAL .....	4
3.- VUELO FOTOGAMÉTRICO COMBINADO. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN.....	4
3.1.- Planificación del vuelo. ....	4
3.2.- MEDIOS TÉCNICOS EMPLEADOS.....	6
3.2.1.- Aeronaves.....	7
3.2.2.- Cámara fotogramétrica digital .....	8
3.2.3.- Sensor LiDAR.....	9
3.3.- EJECUCIÓN DEL VUELO COMBINADO FOTOGAMÉTRICO Y LIDAR.....	10
4.- PROCESADO DE DATOS .....	10
4.1.- PRODUCTOS CAPTURADOS EN VUELO .....	10
4.2.- PRODUCTOS DERIVADOS .....	11
4.3.- POST-PROCESO DE DATOS LIDAR .....	11
4.3.1.- Cálculo de la trayectoria .....	12
4.3.2.- Procesado de raw-laser .....	13
4.3.3.- Procesado de imágenes.....	14
4.3.4.- Cálculo de los parámetros de orientación externa de las imágenes digitales por orientación directa .....	14
5.- ORIENTACIÓN DE LAS IMÁGENES .....	16
5.1.- DEFINICIÓN DEL BLOQUE .....	17
5.2.- MEDICIÓN DE LOS PUNTOS DE FOTOCONTROL .....	17
5.3.- DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE ENLACE Y DE PASO .....	18
5.4.- CÁLCULO Y AJUSTE DEL BLOQUE .....	19
5.5.- RESULTADOS Y PRECISIONES OBTENIDAS.....	20
6.- OBTENCIÓN DE MODELOS DIGITALES .....	20
6.1.- Clasificación de datos LiDAR .....	20
6.2.- OBTENCIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS DIGITALES. ....	23
6.2.1.- Modelo Digital del Terreno (MDT) .....	24
6.2.2.- Modelo Digital de Superficie (MDS) .....	24
7.- GENERACIÓN DE ORTOIMÁGENES.....	25
7.1.- RECTIFICACIÓN DIFERENCIAL. ORTOFOTOGRAMA. ....	26
7.2.- TRATAMIENTO DE LA IMAGEN. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS.....	27
7.3.- MOSAICOS FOTOGRÁFICOS Y CORTE DE HOJAS.....	28
7.4.- CONTROL DE CALIDAD DE LAS ORTOFOTOS. ....	29



<b>8.- CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS DOLINAS EXISTENTES EN LA ZONA.....</b>	<b>30</b>
<b>8.1.- Introducción .....</b>	<b>30</b>
<b>8.2.- Información de partida. ....</b>	<b>32</b>
8.2.1.- Análisis previo de la información LiDAR y ortoimagen.....	32
<b>8.3.- Tratamiento automático de los modelos digitales de elevaciones .....</b>	<b>34</b>
8.3.1.- Obtención de modelos derivados. ....	34
8.3.2.- Detección de líneas de flujo y cuencas.....	36
8.3.3.- Detección preliminar de sumideros –sink–. ....	41
<b>8.4.- Revisión manual de depresiones. Obtención de parámetros para la caracterización. ....</b>	<b>43</b>
8.4.1.- Extracción de polilíneas 3D de las estructuras. Obtención de parámetros geomorfométricos.....	43
<b>8.5.- Análisis de resultados. Caracterización del área de dolinas. ....</b>	<b>52</b>
8.5.1.- Análisis de resultados .....	52
8.5.2.- Estadísticos globales del área de dolinas. ....	54
8.5.3.- Análisis de resultados de parámetros individuales de las dolinas .....	57
8.5.4.- Caracterización del área de dolinas.....	71
<b>8.6.- Conclusiones.....</b>	<b>73</b>
<b>9.- CAPACITACIÓN .....</b>	<b>74</b>



## 1.- INTRODUCCIÓN

El presente informe recoge la metodología empleada y resultados obtenidos derivados del proyecto “Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón” realizado por la empresa Stereocarto Centroamérica para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. El proyecto se divide básicamente en dos fases, la primera consistente en la captura de información de la zona de estudio mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas (cámara RGBI<sub>r</sub> y LiDAR) y, la segunda, derivada a partir de la anterior, el empleo de la información anterior para la caracterización de dolinas existentes en la zona mediante la definición de parámetros morfométricos con vistas a su potencial clasificación.

## 2.- FLUJO DE TRABAJO GENERAL

En la figura 1 se muestra el flujo general de procesado y tratamiento de los datos de vuelo para obtener los productos necesarios para el proyecto. Posteriormente se pasará a una descripción más detallada de cada etapa.

## 3.- VUELO FOTOGRAMÉTRICO COMBINADO. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN.

### 3.1.- Planificación del vuelo.

La primera fase de la captura de la información consiste en el proceso de planificación del vuelo en el que se establecen los parámetros geométricos del vuelo y la configuración de los sensores para obtener los productos requeridos según las condiciones requeridas en los términos de referencia para el proyecto y que cumplan con las necesidades del cliente y sus usuarios.

En la figura 2 se muestra el flujo de trabajo seguido en esta etapa inicial de Planificación del Vuelo.



Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenta, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón

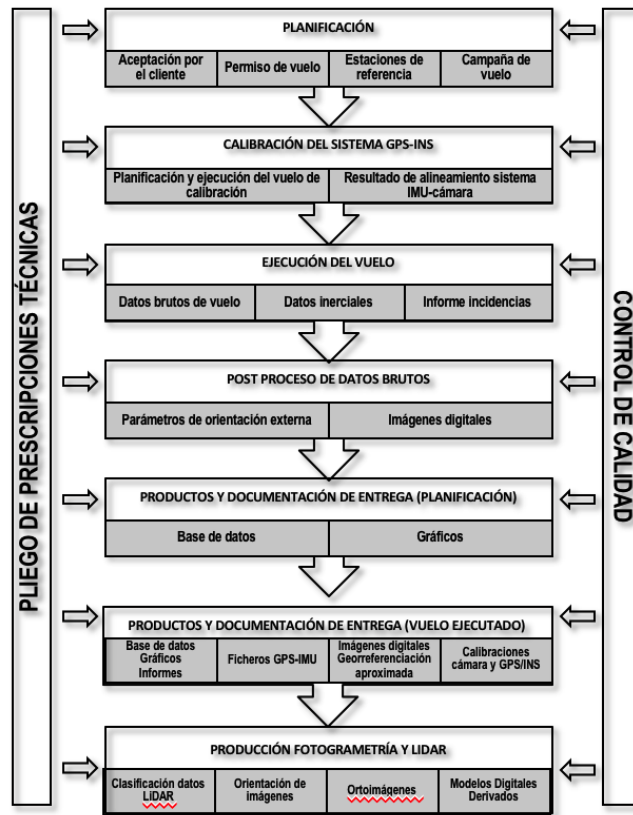


Figura 1. Esquema general de la producción cartográfica empleando captura de datos mediante Fotogrametría y LiDAR.

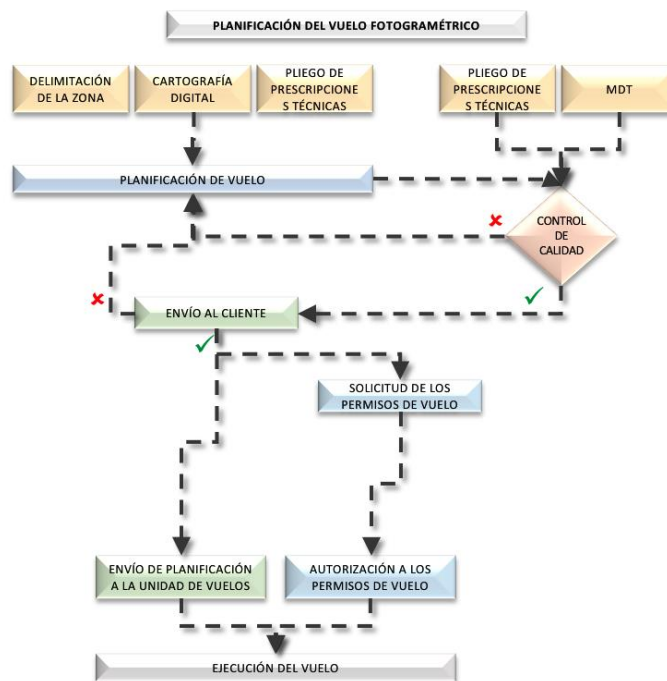


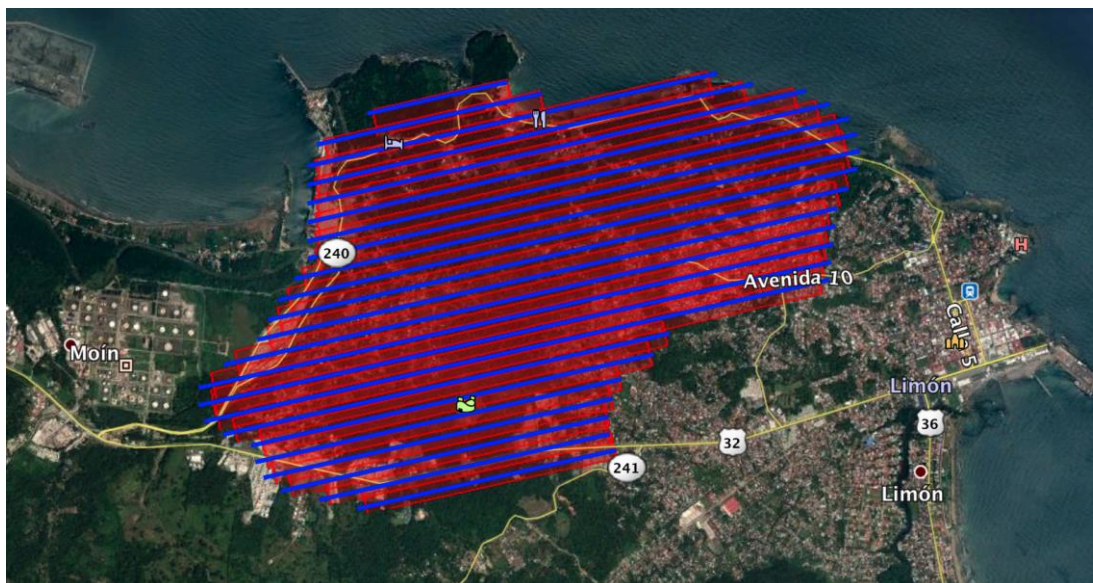
Figura 2. Diagrama de flujo de la fase de Planificación del Vuelo.

El resultado fundamental de esta fase son los ficheros que serán cargados en el sistema de vuelo para la ejecución del mismo, así como los gráficos de planificación que permiten la obtención de los respectivos permisos para llevar a cabo las operaciones de vuelo para la captura de las imágenes. Teniendo en cuenta la zona a cubrir se establece un proyecto de vuelo definido por los siguientes parámetros (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características del vuelo planificado.

Número de fajas	23
GSD medio de la imagen	4 cm
Densidad de datos LiDAR	>30 puntos/m <sup>2</sup>
Altura de vuelo sobre el terreno	400 m
Traslado longitudinal en la imagen	60%
Traslado transversal en la imagen	Mínimo 30%

En la figura 3 se muestra la configuración establecida para los ejes de las fajas (en color azul) y las zonas cubiertas por los fotogramas (en color rojo).



**Figura 3.** Gráfico de vuelo planificado (color azul: ejes de las fajas; color rojo: zona cubierta por los fotogramas).

### 3.2.- MEDIOS TÉCNICOS EMPLEADOS

Es evidente que dicha planificación se establece teniendo en cuenta unas determinadas características tanto de los medios aéreos con los que se va a llevar este trabajo como de los propios sensores de captura de la información. Dichos medios son elegidos entre los disponibles en la empresa para garantizar la calidad y características técnicas requeridas para los datos a capturar. Las especificaciones técnicas básicas de los equipos se resumen en

la tabla 2 a 4, incluidas en los apartados 3.2.1 (Aeronaves), 3.2.2 (Cámara fotogramétrica digital) y 3.2.3 (Sensor LiDAR).

### 3.2.1.- Aeronaves

La aeronave empleada para la realización de este trabajo ha sido un helicóptero Bell 206, cuyas características se resumen en la tabla 2. Una imagen de dicho equipo se muestra en la figura 4.

**Tabla 2.** Características de la aeronave.

Aeronave	
Marca y modelo	<b>Bell 206</b>
Matrícula	<b>TI-BGN</b>
Características generales:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longitud: 9.5 m</li> <li>- Diámetro rotor principal: 10.16 m</li> <li>- Altura: 2.83 m</li> <li>- Peso vacío: 1057 kg</li> <li>- Peso máximo al despegue: 1521 kg</li> <li>- Planta motriz: Allison doble eje (Rolls Royce)</li> <li>- Potencia: 250C20J (420 eje cv)</li> <li>- Velocidad nunca excedida (Vne): 225 km/h</li> <li>- Velocidad crucero (Vc): 214 km/h</li> <li>- Alcance: 732 km</li> <li>- Régimen de ascenso: 6.5 m/s</li> </ul>	



**Figura 4.** Helicóptero Bell 206 TI-BGN empleado para la captura de imágenes y LiDAR aéreo, equipado con el sistema de captura combinada imagen fotogramétrica y LiDAR.



### 3.2.2.- Cámara fotogramétrica digital

El sensor empleado para la captura de las imágenes es una cámara fotogramétrica de medio formato de última generación Leica RCD30, que permite la captura de imágenes de alta calidad, tanto geométrica como radiométrica a partir de los correspondientes procesos de calibración en laboratorio. Las características del sensor de captura de las imágenes se muestran en la tabla 3, mientras que una fotografía de la cámara se presenta en la figura 5.

**Tabla 3.** Características de la cámara fotogramétrica digital.

Sensor de captura de imágenes fotogramétricas digitales	
Sensor empleado	<b>RCD30</b>
Número de serie del Sensor	<b>RCD30-82006</b>
Resolución espectral	4 bandas (Rojo, Verde, Azul, Infrarrojo cercano)
Control automático de la exposición	Incluido
Sistema FMC	TDI
Sistema de navegación	FLIGHT PRO de LEICA Permite: <ul style="list-style-type: none"><li>- planificar el vuelo, determinando los centros de fotos.</li><li>- navegación en tiempo real.</li><li>- control automático de disparo.</li><li>- registro de eventos y de datos de captura de cada imagen.</li></ul>
Receptor GPS	NOVATEL Millenium <ul style="list-style-type: none"><li>- 12 canales bifrecuencia siguiendo las portadoras L1 y L2.</li><li>- Registro de observaciones superior 0.1 segundos.</li><li>- Modo de observación mediante código y diferencias de fase.</li><li>- Algoritmos de dobles diferencias para resolver la ambigüedad de fase.</li><li>- Precisión en las coordenadas de la cámara DGPS: 10 a 30 cms.</li></ul>
Sistema inercial (IMU/INS)	PosAV-510 <ul style="list-style-type: none"><li>- Frecuencia de registro: 200 Hz.</li><li>- Precisión 0.005 deg en Omega y Phi, 0.008 deg en Kappa.</li></ul>
Fecha de calibración	Diciembre 2013
Parámetros básicos en imágenes virtuales de alta resolución	
Distancia focal (m)	<b>0.053</b>
Tamaño del sensor (pixel)	<b>10320 x 7752</b>
Tamaño del píxel ( $\mu\text{m}$ )	<b>5.2</b>
Punto principal (mm)	<b>X = 0.0 ; Y = 0.0</b>
Parámetros de distorsión	<b>Imágenes libres de distorsión</b>
Parámetros básicos en imágenes virtuales con resolución multiespectral	
Distancia focal (m)	<b>0.030</b>
Tamaño del sensor (pixel)	<b>3654 x 4478</b>
Tamaño del píxel ( $\mu\text{m}$ )	<b>6</b>
Punto principal (mm)	<b>X = 0.0 ; Y = 0.0</b>
Parámetros de distorsión	<b>Imágenes libres de distorsión</b>



Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón



**Figura 5.** Sensor digital fotogramétrico Leica RCD30

### 3.2.3.- Sensor LiDAR

En cuanto al sensor LiDAR empleado para la captura de nubes de puntos 3D, se ha empleado un equipo Leica ALS50-II cuyas características técnicas más importantes se muestran en la tabla 4 así como en la figura 6. La configuración de este sistema permite su uso combinado en una única misión de vuelo con la cámara digital fotogramétrica presentando la ventaja de disponer de los dos conjuntos de datos (imagen fotogramétrica RGBIr y LiDAR de la misma fecha) y referidos al mismo sistema de referencia espacial.

**Tabla 4.** Características del sensor LiDAR Leica ALS50-II

Sensor de captura de datos LiDAR	
Sensor empleado	<b>ALS50 II</b>
Número de serie	<b>SN 73</b>
Altura de vuelo	<b>350 m</b>
Frecuencia de pulsación	<b>Hasta 150.000Hz (150.000 pulsos/seg.)</b>
Precisión a priori	<b>Hasta 10cm en altimetría</b>
Número de retornos capturados	<b>4</b>
Campo de visión (FOV)	<b>10º - 75º</b>
Captura de intensidades	<b>una por pulso</b>
Tecnología MPIA (Multiples Pulses in Air)	<b>Sí</b>



Figura 6. Sensor LiDAR ALS50-II

### 3.3.- EJECUCIÓN DEL VUELO COMBINADO FOTOGRAMÉTRICO Y LIDAR

El vuelo de captura de la información se realizó entre los días 24 al 26 de septiembre, bajo la configuración de vuelo combinado fotogramétrico y LiDAR.

## 4.- PROCESADO DE DATOS

### 4.1.- PRODUCTOS CAPTURADOS EN VUELO

En cuanto a la captura de imágenes hay que indicar que las imágenes han sido capturadas con una resolución radiométrica de 8 bits/pixel en cada uno de los canales considerados (RGB), así como los parámetros de posicionamiento (centro de proyección) y orientación (ángulos de inclinación) en cada una de las exposiciones programadas mediante el empleo de un sistema GNSS/INS. Esta información básica, que se almacena en formatos propios del fabricante para su posterior postproceso con el software específico será empleada en los posteriores procesos de orientación de las imágenes, conducentes a la obtención de los parámetros de orientación externa de cada fotografía.

Con respecto a la información capturada por el sensor LiDAR se almacena para cada uno de los pulsos la siguiente: a) número de retorno (el sistema permite la captura de hasta 5



retornos para cada pulso emitido); b) intensidad de la señal recibida (reflectancia que será equivalente a una toma correspondiente a la longitud de onda del propio sensor láser, 1064nm); c) ángulo de barrido (con una indudable incidencia en la propia calidad del dato); d) tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso, que se emplea para el cálculo de la distancia entre el sensor y el terreno en función de la velocidad de la luz; e) posición y orientación del sensor (GNSS/INS) que combinada con la distancia entre el sensor y el terreno permite el cálculo de la posición 3D de los puntos del terreno (XYZ).

#### 4.2.- PRODUCTOS DERIVADOS

Una vez capturada la información se lleva a cabo un postproceso de la misma, orientada a la obtención de los productos finales solicitados en los términos de referencia del proyecto, que son sometidos a los correspondientes controles para verificar la calidad de los mismos. Los productos básicos que se derivan del post-proceso de la información capturada en vuelo consiste básicamente en:

- a) Imágenes del vuelo en formato TIFF, con un tamaño de pixel proyectado sobre el terreno (resolución espacial) de 4 cm (GSD –ground sample distance-).
- b) Parámetros de la posición y orientación de la cámara en el momento de la toma (orientación directa del sensor) que será empleada como información inicial en el proceso de orientación indirecta de las imágenes.
- c) Archivos LiDAR de las nubes de puntos, en formato ASPRS LAS (<https://www.asprs.org/divisions-committees/lidar-division/laser-las-file-format-exchange-activities>), que incluye la posición del punto, así como otra información de interés (número de retorno, intensidad o reflectancia del punto, etc.).

Para la obtención de estos productos, es necesario realizar un postproceso orientado a la integración de la información capturada por los diferentes sensores, así como el ajuste de las propias imágenes. Este post-proceso es analizado en detalle en el apartado 4.3.

#### 4.3.- POST-PROCESO DE DATOS LIDAR

La información registrada en el vuelo por parte del sensor LiDAR consiste básicamente en dos conjuntos de datos:

- a) Uno relativo a las medidas realizadas por el subsistema láser que es el encargado de la medida de los puntos del terreno. Estos datos se capturan en formato \*.scn, formato bruto propio del sensor.
- b) Otro relativo a la posición del sensor (GNSS) y su orientación (INS) que proporciona las trayectorias seguidas por el sensor, que son indispensables para proporcionar las coordenadas terreno correspondientes a las nubes de puntos 3D capturadas por el sensor (a las que se hace referencia en el apartado a).



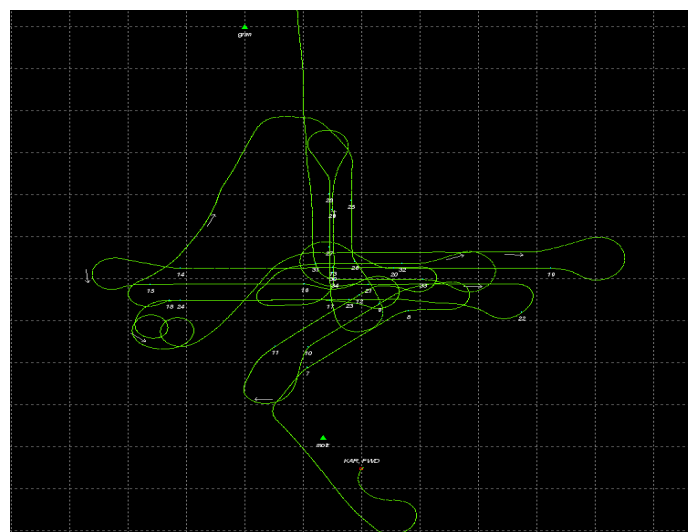
Es importante hacer indicar que para el correcto procesamiento de la información que permita obtener la posición del sensor en cada momento de toma (trayectoria), es necesario el realizar un post-proceso integrando la información con la procedente de otras estaciones GNSS ubicadas en localizaciones conocidas y a una distancia reducida –inferior a 80 km- con respecto a la zona de estudio (estaciones fijas o ubicadas exprofeso para la realización del trabajo).

En este sentido, durante el proceso de planificación, una de las labores que es necesario llevar a cabo es analizar la disponibilidad de redes de estaciones GNSS que dispongan de bases permanentes a una distancia máxima de 80 km de la zona de trabajo, así como la calidad de registro previsible en las mismas.

#### 4.3.1.- Cálculo de la trayectoria

El hecho de que las frecuencias de registro de los sensores de posicionamiento (GNSS) y de orientación (INS) son diferentes, junto con la necesidad de disponer de un registro continuo de las posiciones y las orientaciones atendiendo a la frecuencia de barrido del sistema, implican la necesidad de calcular la trayectoria seguida por el sensor. Dicha tarea se realiza a partir del software proporcionado junto con el propio sistema (Leica IPAS Pro GPS/INS Processor de LeicaGeosystems AG). Este software permite el cálculo de la trayectoria del sensor (figura 7), integrando la información proporcionada por el GNSS y el INS, proporcionando un primer control de calidad en el que se establece:

- Nº de Satélites recibidos en la observación. Asegurándonos un mínimo de dos bases de referencia, nunca se procesarán datos cuando el número de satélites recibidos sea inferior a 5 durante el tiempo de observación.
- Precisión en coordenadas XYZ de cada uno de los puntos de la trayectoria.



**Figura 7.** Trayectoria de un vuelo fotogramétrico obtenida a partir del postproceso de información capturada por los sensores GNSS/INS.



El cálculo de la trayectoria de vuelo concluye con un suavizado de la misma a partir de los datos procedentes de la IMU, que convertirán el cálculo DGPS en un cálculo más preciso y riguroso. De este proceso se obtiene el fichero solución de trayectoria (\*.sol) que contiene toda la información correspondiente a la trayectoria de la aeronave.

#### 4.3.2.- Procesado de raw-laser

Junto con el procesado de la información relativa a la posición y orientación del sensor conducente al cálculo de la trayectoria, es necesario el postproceso de la información capturada por el sensor láser, a fin de obtener la nube de puntos 3D requerida, junto con la información adicional necesaria para su posterior tratamiento (filtrado, clasificación, visualización, etc.). Esta fase del postproceso de datos brutos láser (raw-laser) se realiza a partir del software recomendado por el propio fabricante Leica ALS PPS de Leica Geosystems AG.

Dentro de este proceso se consideran los siguientes archivos:

- Configuración del ajuste del sensor. Este archivo procede del proceso de calibración del sensor que se realiza previamente al desarrollo del proyecto. Este fichero contiene toda la información referente a los giros (*roll, pitch, heading* – cabeceo, aleteo, deriva-), constante de torsión, corrección de distancias, compensación en altura, ángulo de corrección del escáner y parámetros de temperatura y presión.
- Fichero solución procedente del cálculo de la trayectoria mediante el post-proceso DGPS/INS (\*.sol).
- RawLaser, datos brutos procedentes del sensor. Formados por ficheros \*.scn (scanning), almacenados de forma secuencial y almacenados de forma organizada por carpetas. Cada una de estas carpetas contienen todos los ficheros correspondientes a cada línea de vuelo escaneada.

Con objeto de proporcionar las coordenadas terreno integrables con otras bases de datos cartográficas disponibles, es necesario definir el sistema de proyección sobre el que se desean obtener los datos. En el caso de este proyecto, se considera el sistema oficial de Costa Rica, efectuando la transformación en dos pasos, en primer lugar, se considera una transformación a un sistema UTM16N-WGS84, y en una segunda fase, se transforma al sistema CR14 para tener los datos en el sistema oficial considerado en este país.

El resultado de este procesamiento son los ficheros binarios en formato \*.LAS (laser airborne scanner) que contienen la información referente a coordenadas 3D de los puntos



(XYZ), intensidad, número e información de retorno, ángulo de escaneo y marca de tiempo de cada uno de los puntos. Así como diferente información relativa a la misión (tiempo GPS, sensor empleado, parámetros de clasificación –en el caso de que los hubiera-).

#### 4.3.3.- Procesado de imágenes

En cuanto al procesado de las imágenes digitales, su objetivo es disponer de imágenes de la mayor calidad geométrica y radiométrica que facilite su posterior interpretabilidad y se garantice la calidad métrica de las mismas, así como de los productos que se deriven de ellas. A través de este procedimiento se obtienen imágenes que pueden ser útiles para su posterior explotación. De forma breve los procesos que se consideran son los siguientes:

- a) Correcciones radiométricas. Consiste en la corrección de píxeles defectuosos y en la posterior ecualización del histograma de frecuencias, balanceado y contraste de la imagen.
- b) Correcciones geométricas. Se basan en la corrección de las distorsiones de imagen del sensor óptico y la corrección entre el centro geométrico y el centro óptico de cada CCD.

La fase de procesado de las imágenes finaliza con un exhaustivo control de calidad radiométrico para comprobar los niveles de saturación, rango dinámico de las imágenes y niveles medios del histograma, al tiempo que descarta la posible presencia de defectos o artefactos en las mismas.

#### 4.3.4.- Cálculo de los parámetros de orientación externa de las imágenes digitales por orientación directa

Tal y como se ha comentado con anterioridad, a partir de la información proporcionada por los sistemas GNSS/INS y mediante el postproceso correspondiente, es posible obtener información de la trayectoria seguida por la aeronave, y, por tanto, obtener cuál era la posición y orientación de la plataforma en el momento de cada una de las tomas expresada en coordenadas terreno. Esta información es básica para la realización de cualquier tipo de trabajo fotogramétrico, y si bien, tradicionalmente se ha desarrollado mediante un procedimiento de orientación indirecta basada en el empleo exclusivo de puntos de fotocontrol, el empleo de métodos de orientación ISO (integrated sensor orientation) supone una alternativa de gran interés, al permitir la reducción del número de puntos de fotocontrol necesarios, sin comprometer la calidad geométrica del bloque de imágenes.

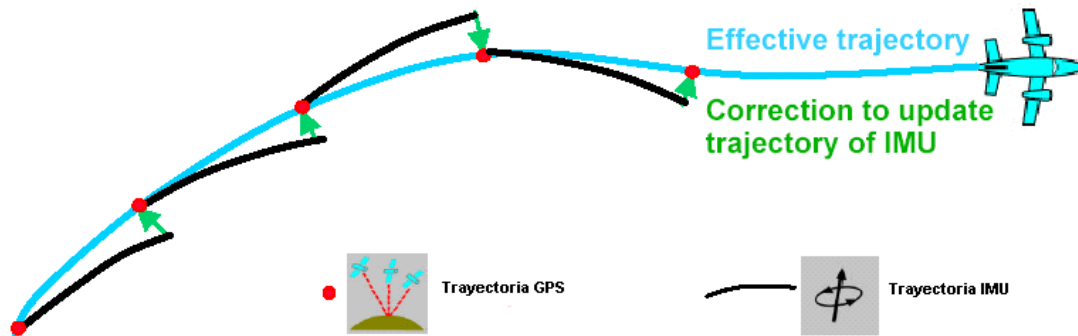
De esta forma el empleo de orientación ISO permite reducir el número de puntos de fotocontrol necesarios (con la lógica reducción de la fase de medida de puntos de fotocontrol en campo) al mismo tiempo que se agilizan los procesos de aerotriangulación aérea al disponer de una geometría bastante próxima a la realidad de la configuración del bloque.



A continuación, se describe de forma esquemática y resumida el procedimiento seguido para la obtención de los parámetros de orientación externa de las fotografías mediante el método de orientación directa.

1. Obtención del fichero de observaciones de la estación de referencia GNSS junto con el fichero de efemérides de los satélites.
2. Extracción y chequeo de los datos registrados por la unidad de medida inercial (datos relativos a relaciones angulares y aceleraciones lineales) y observaciones GNSS.
3. Conversión de los datos obtenidos en la fase anterior a un formato legible por el software de post-proceso, para la integración de GNSS-INS. En esta fase se realiza una nueva comprobación de los datos registrados por el INS y ambos receptores GNSS (ubicada en la aeronave y ubicada en el terreno como estación de referencia).
4. Obtención de la trayectoria GNSS en sentido directo e inverso. A partir de los datos GNSS del receptor móvil y el receptor terrestre se ha obtenido una trayectoria GNSS en post-proceso con registro de coordenadas cada segundo. Para mejorar la calidad de estimación de dicha trayectoria, se consideran dos trayectorias, una en sentido directo desde que el avión despegue realiza la toma fotográfica y vuelve al aeropuerto; y otra en sentido inverso, aterriza, realiza la toma fotográfica y despegue. La trayectoria final se establece a partir de la combinación de ambas trayectorias en los dos sentidos diferentes.
5. Obtención de la trayectoria final suavizada. Esta fase se centra en la comparación de la trayectoria generada mediante GNSS diferencial por combinación de los dos receptores, móvil y terrestre calculada con una frecuencia de 1 Hz (es decir, un registro cada segundo) en la etapa anterior, con la trayectoria generada por las observaciones tomadas por la IMU de relaciones angulares y aceleraciones lineales con 200 Hz (es decir, un registro para 5 ms). Al respecto hay que tener en cuenta que ambas trayectorias no pueden ser integradas de forma directa, puesto que mientras que la primera viene definida por coordenadas en el espacio tridimensional, la segunda viene definida por tres coordenadas en el espacio más tres valores angulares. De tal comparación, resultará una trayectoria final suavizada definida por 6 grados de libertad en la que se conserva la precisión absoluta de la técnica de GNSS diferencial y la precisión relativa proporcionada por los giróscopos y acelerómetros.
6. Interpolación en la trayectoria suavizada de las marcas de tiempo registradas por cada toma fotográfica en cada instante de tiempo. Debido a que la frecuencia de registro de la IMU es mucho mayor que la del GPS, la trayectoria final del vuelo

quedará definida por tres coordenadas y tres ángulos cada 0.005 segundos siendo el proceso de interpolación mucho más preciso y fiable (figura 8).



**Figura 8.** Integración de las trayectorias GNSS e INS mediante la aplicación de los filtros de Kalman para el cálculo de la trayectoria efectiva seguida por la aeronave (Leica Geosystems AG).

## 5.- ORIENTACIÓN DE LAS IMÁGENES

Aunque es posible obtener los parámetros de orientación externa de las imágenes mediante el método de orientación directa, la escala de trabajo y exactitud posicional requerida para este proyecto aconseja el empleo de métodos integrados de orientación (ISO –integrated sensor orientation-). Este método combina la información proporcionada por las observaciones de posicionamiento y orientación proporcionadas por el sistema GNSS/INS, con las medidas realizadas sobre las imágenes tanto a nivel de puntos de fotocontrol como de puntos de paso y enlace, que conectan fotogramas de la misma faja, y las diferentes fajas entre sí, respectivamente. Este método de orientación se considera óptimo para este tipo de aplicaciones que requieren un elevado nivel de calidad en cuanto a exactitud posicional de los productos generados. Al tiempo que se homogeneiza de forma importante la continuidad geométrica del bloque facilitando los procesos de visión estereoscópica de las imágenes capturadas, registrando una mejora en los propios procesos de correspondencia (*matching*) de imágenes.

La realización de una orientación de las imágenes mediante metodología ISO requiere la medida de puntos de paso/enlace (*tie points*) en el modelo, para poder establecer una red de ajuste de los diferentes fotogramas que se conectan entre sí, y se enlazan con el terreno a partir de la medida de puntos de fotocontrol. Esa información viene a complementar la propia información proporcionada por el sistema GNSS/INS relativa a las trayectorias de la aeronave y posición/orientación de la plataforma en cada uno de los instantes de disparo de una nueva fotografía. Esta compleja red garantiza la calidad geométrica del bloque y su propia exactitud



posicional, algo básico trabajos de estas características y con imágenes de alta resolución espacial y levantamientos LiDAR de gran densidad (decenas de puntos por m<sup>2</sup>).

En este sentido, se ha llevado a cabo un proceso de aerotriangulación de imágenes, que dará lugar al cálculo de los parámetros de orientación externa refinados de todos los fotogramas que componen el bloque, así como del cálculo de las coordenadas terreno de todos los puntos de paso/enlace y de los puntos de comprobación a fin de chequear su correcta posición. Estos parámetros de orientación externa son los requeridos para la explotación de las imágenes, tanto a la hora de visualizar las imágenes para su fotointerpretación (vectorización 3D), la realización de medidas sobre las mismas, la generación de modelos digitales de superficie mediante técnicas de *matching* o la propia generación de ortoimágenes, mediante el método de rectificación diferencial. A continuación, se describe la metodología empleada para el refinamiento de la orientación del bloque de imágenes, a partir de los parámetros de orientación externa estimados mediante orientación directa de las imágenes.

### 5.1.- DEFINICIÓN DEL BLOQUE

La primera etapa del proceso de orientación de imágenes mediante aerotriangulación digital es la propia definición del bloque de fotogramas al que se va a aplicar la metodología. Para ello es necesario determinar con el objeto de incorporar en el programa la información correspondiente, la siguiente información:

- a) Las fajas que definen el bloque.
- b) Los fotogramas que contiene cada faja.
- c) La orientación de las imágenes, respecto de la posición natural de la cámara.
- d) Los datos del certificado de calibración de la cámara fotogramétrica.
- e) Las coordenadas de los puntos de fotocontrol
- f) Los datos del apoyo aerocinemático registrados durante el vuelo: coordenadas 3D de los fotocentros y valores de los giros, a partir del post-proceso de información GNSS-INS.
- g) Estrategia de búsqueda de puntos homólogos (correlación de puntos de enlace y de paso) y método de ajuste.

El software utilizado para la realización de la aerotriangulación, en todas sus fases, ha sido Image Station Automatic Triangulation (ISAT) desarrollado por la empresa Z/I. Se trata de un software de fiabilidad altamente demostrada en el campo de la fotogrametría, que permite obtener precisiones internas de cálculo inferiores a 5 micras.

### 5.2.- MEDICIÓN DE LOS PUNTOS DE FOTOCONTROL

La localización de los puntos de fotocontrol sobre los fotogramas en que aparecen se ha realizado de forma asistida. Este proceso se simplifica de forma importante, al conocer, por



un lado, las coordenadas terreno del punto a medir (a partir de las reseñas de campo) y, por otro lado, las aproximaciones a los parámetros de orientación externa derivadas de la información GNSS-INS. De esta forma, y mediante la aplicación de las expresiones de colinealidad es posible obtener una buena aproximación a la posición del punto en cada una de las imágenes donde es visible (al conocer asimismo los parámetros de orientación interna de la cámara). El operador una vez que el punto está en una localización aproximada debe realizar el trabajo de medida manual, mediante visión estereoscópica de los pares de imágenes y ayuda de los croquis de campo de los puntos de apoyo.

### 5.3.- DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE ENLACE Y DE PASO

La medida y transferencia de puntos de enlace y de paso se ha realizado mediante el método de correlación automática (búsqueda y medida automática de puntos homólogos en dos o más fotogramas). Una vez que se realiza este proceso de medida automática (aerotriangulación digital automática) el bloque se somete a un control de calidad, a fin de verificar el ajuste correcto entre todas las imágenes que componen el bloque, comprobando la continuidad entre fotogramas y entre las diferentes fajas. Dentro de este proceso se incorporan puntos manuales en aquellas zonas en las que los procesos de medida han fallado o no se puede asegurar su correcto ajuste (algo frecuente, por ejemplo, en las zonas con gran presencia de arbolado). Asimismo, se identifican aquellos puntos mal correlados (blunders), mediante un análisis de los residuos derivados del ajuste del bloque, procediendo a su eliminación o a su remeida por otros puntos alternativos en donde se puede realizar una medida manual fiable.

El procedimiento empleado para la correlación automática en el software empleado es un procedimiento de *matching* mixto, en el que inicialmente se utiliza, un algoritmo de cálculo basado en correlación por entidades (*feature based matching* –FBM-) con un nivel de precisión de la medida en torno a 0,3 píxeles. Una vez que se refinan las medidas –que serán empleados como aproximaciones iniciales del proceso- y se calculan los parámetros de orientación externa en cada uno de las pirámides de imágenes en los niveles básicos, se procede a emplear el método de correlación por mínimos cuadrados (*least squares matching* –LSM-) que alcanza una precisión 0,1 píxeles. El software incorpora sistemas para la detección automática de errores groseros (*blunder detect*) que elimina del proceso los errores groseros debidos a los errores de correlación originados en las imágenes (falta de textura, texturas repetitivas, elementos a diferente nivel, elementos ocluidos, etc.). En la figura 9 se muestra un ejemplo de medida de puntos de paso y enlace mediante aerotriangulación digital automática en 6 fotogramas correspondientes a una misma zona de traslapo.

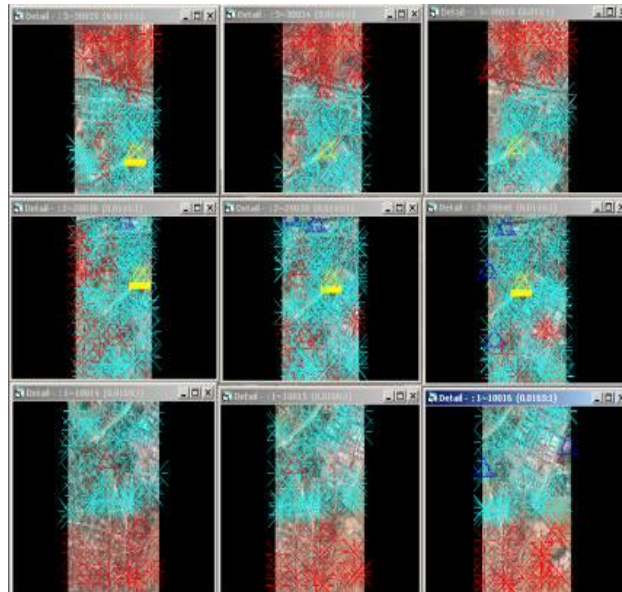


Figura 9. Medida automática de puntos de paso/enlace.

#### 5.4.- CÁLCULO Y AJUSTE DEL BLOQUE

Una vez que se dispone de todas las medidas sobre el bloque y se garantiza la calidad de las mismas, tanto en cuanto a distribución de las mismas no existiendo imágenes con un número bajo de medidas, ni errores en la correlación al identificar los puntos homólogos, se puede proceder al cálculo de los parámetros refinados de la orientación externa de las imágenes. Este proceso se ha realizado en dos fases diferentes:

- a) La primera fase consiste en el ajuste relativo del bloque. Esta fase es simultánea al control de calidad de la correlación automática y medición, en su caso, de puntos manuales, y consiste en el aseguramiento de la robustez del cálculo y la bondad de las coordenadas imagen medidas, sin influencia de coordenadas terreno. Con esto se obtiene un bloque coherente y fiable internamente, de tal modo que si en la siguiente etapa, en la que entran en juego las coordenadas del apoyo topográfico y del apoyo aerocinemático, se detectara algún error, éste vendrá provocado por algún tipo de fallo en las coordenadas del apoyo (error en la introducción de los datos, error de medida, etc.).
- b) En la segunda fase se introducen en el proceso de ajuste las coordenadas del apoyo, de manera que el bloque coherente obtenido en la fase anterior, es trasladado mediante una transformación tridimensional de coordenadas a su posición real en el terreno y los parámetros reales de orientación externa quedan definitivamente calculados. Se trata de un procedimiento de cálculo iterativo basado en la linealización de las expresiones de colinealidad, que requieren aproximaciones iniciales a los parámetros. En este caso, y teniendo en cuenta la disponibilidad de los parámetros de orientación externa obtenidos mediante orientación directa, los mismos son empleados como aproximaciones iniciales. El resultado es una red de



ajuste con información del terreno (puntos de fotocontrol), con información de las relaciones entre los fotogramas y las fajas que componen el bloque (puntos de enlace/paso) y la información de la posición y la orientación de la cámara en el momento de la captura de la imagen.

## 5.5.- RESULTADOS Y PRECISIONES OBTENIDAS

Los resultados derivados de este proceso de ajuste han sido los siguientes:

- Número total de imágenes: 1061
- Número total de puntos medidos sobre las imágenes: 57991 (>50 puntos/imagen)
- Número de puntos de control: 12
- Grados de libertad (redundancia del sistema): 93263.

Los errores que ponen de manifiesto la exactitud posicional del ajuste son los siguientes:

- $RMS_x = 0,065m$
- $RMS_y = 0,067m$
- $RMS_z = 0,140m$

Los errores derivados del GNSS diferencial son los siguientes:

- $RMS_x = 0,043m$
- $RMS_y = 0,041m$
- $RMS_z = 0,027m$

Los errores medios cuadráticos en la determinación de la orientación de la cámara por parte del INS son:

- $RMS_{\omega} = 0,005 \text{ deg}$
- $RMS_{\phi} = 0,005 \text{ deg}$
- $RMS_{\kappa} = 0,002 \text{ deg}$

Por último, el error medio cuadrático del conjunto del ajuste del bloque es:

- $\sigma = 2,3 \mu m$

## 6.- OBTENCIÓN DE MODELOS DIGITALES

### 6.1.- Clasificación de datos LiDAR

El sistema LiDAR realiza la captura de nubes de puntos 3D de una extraordinaria densidad en toda la zona de estudio, es evidente que se trata de un proceso de medida no discriminatorio en el que el láser distribuye puntos sobre el terreno de acuerdo con un determinado patrón de medida (que depende del equipo –frecuencia y anchura de barrido- y



de la velocidad de desplazamiento de la aeronave). Una vez que se dispone de la nube de puntos tridimensionales es necesario realizar la clasificación de los puntos capturados de acuerdo con las necesidades propias del estudio. En este sentido, hay que indicar que el propio formato LAS incluye parámetros de clase para cada uno de los puntos. El objetivo es obtener una nube de puntos en la que se diferencien empleando las diferentes clases posibles aquellos elementos de interés que aparecen en la escena (o de no interés para que sean descartados). Para ello se emplean procedimientos automáticos, que emplean las relaciones geométricas entre los puntos tanto a nivel de superficie (pendientes máximas, tolerancias de cambio de altura, etc.) como las relaciones existentes entre los diferentes retornos del mismo pulso.

Antes de comenzar con los trabajos de clasificación y edición de datos LiDAR es necesario establecer las pautas que se deben seguir durante la ejecución de los mismos. La finalidad de la planificación es tener diseñado un modo de trabajo tal que garantice tanto la ejecución del trabajo como el control del mismo, de acuerdo con las exigencias del pliego de especificaciones técnicas.

En este sentido, la planificación de un trabajo de edición de datos LiDAR, contempla los siguientes aspectos:

- Definición del bloque. Configuración de los parámetros generales del bloque de trabajo.
- Localización y tamaño del bloque.
- Nube de puntos a clasificar
- Especificación de los parámetros de clasificación en función de las características de la zona.
- Elección de la estrategia idónea en relación con las exigencias del pliego. Una vez conocidas las prescripciones técnicas del pliego y las características del bloque de datos LiDAR, conviene seleccionar la estrategia de trabajo, entendidas como el conjunto enlazado de soluciones a cada una de las fases de clasificación y tratamiento de datos LiDAR.
- Decisión del software más adecuado para llevar a cabo los pasos configurados por la estrategia. La disponibilidad de varias estaciones de tratamiento de modelos digitales con software independientes y de procedencias distintas, provee una amplia capacidad de solución de trabajos de diferentes naturalezas, lo que permite garantizar, a priori, la correcta ejecución del trabajo.
- Creación de los gráficos de seguimiento del trabajo. Se trata de una herramienta indispensable, tanto en formato digital como en papel, para llevar el control del estado del trabajo y poder localizar e inspeccionar las posibles incidencias.

Los datos LiDAR son clasificados inicialmente mediante algoritmos matemáticos automatizados que permiten tener una primera categorización de los puntos de la nube



LiDAR. Los parámetros de configuración de estos algoritmos son establecidos en función de las características de la zona de trabajo para obtener unos resultados óptimos.

El objetivo de la clasificación a utilizar en este proyecto es la diferenciación entre los puntos pertenecientes al terreno, de los puntos correspondientes a otros elementos, como, por ejemplo, vegetación, edificios, etc. En este sentido, y con la estrategia de emplear el método de clasificación más simple se han considerado tres clases diferentes de acuerdo con el estándar del formato LAS (tabla 5).

**Tabla 5.** Características del sensor LiDAR Leica ALS50-II

Código LAS	Nombre	Descripción
1	Default	Es la categoría inicial a la que están asignados todos los puntos antes de la clasificación. Una vez que se realiza la clasificación esta clase se emplea para designar a los puntos que no se consideran de interés para los objetivos del estudio (en nuestro caso, sólo se consideran de interés, los puntos ubicados sobre el terreno). Por tanto, dentro de esta clase están incluidos para este proyecto los puntos ubicados en zonas de vegetación (arbolado) y los puntos ubicados en edificaciones.
2	Ground	Se clasifican dentro de este grupo, aquellos puntos que definen el terreno desnudo, es decir, sin la presencia de vegetación, estructuras, etc.
7	Low points	Se clasifican dentro de esta categoría a los puntos que proceden de falsos ecos capturados por el sensor y que, por tanto, no tienen utilidad. Esta categoría es descartada para la obtención de los modelos digitales ya que al no corresponder con ningún tipo de elemento real introducirían errores en los modelos digitales del terreno y/o de superficies. De partida se consideran puntos con intensidad inferior a 4.

Tras la realización de este proceso inicial de clasificación automática, la misma debe ser revisada mediante operadores expertos asignando la clase que sea correcta para los elementos representados. En el caso de este proyecto los principales problemas derivados de la clasificación automática vienen derivados de la presencia de grandes masas de vegetación (arbolado) así como en la presencia de edificaciones de grandes dimensiones (naves industriales). Esta revisión se realiza mediante:

- inspección directa de la nube de puntos usando vistas en planta, perspectiva y perfiles de la misma e información gráfica adicional de forma simultánea (en el



caso de este proyecto, las imágenes y ortoimágenes aéreas tomadas en la misma fecha que el propio levantamiento LiDAR).

- revisión de mapas de sombras, para identificar zonas conflictivas que necesitan de una revisión más exhaustiva para la depuración del modelo.
- revisión de curvados de los modelos, identificando áreas no depuradas adecuadamente.

## 6.2.- OBTENCIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS DIGITALES.

El sistema LiDAR permite la captura de nubes de puntos de una elevada densidad (en el caso de este proyecto con una densidad de información superior a 50 puntos/m<sup>2</sup>) generando archivos de gran tamaño. Para facilitar su manejo la información es dividida por hojas para poder ser tratada y analizada. Estos trabajos deben ser realizados de forma que se garantice la continuidad de los modelos entre las mismas y no existan saltos bruscos artificiales, en este sentido, Stereocarto dispone de los procesos y herramientas para lograr dicho objetivo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la distribución de los puntos medidos por el sensor LiDAR no presentan una distribución regular sobre el terreno dependiendo del patrón del escáner empleado para la medida. Por otro lado, hay que tener en cuenta que la disposición de los puntos medidos varía desde la zona ubicada en la vertical del sensor (nadiral) con respecto a los bordes de la faja de barrido, y que además en las zonas laterales (en principio, las que pueden originar mayores problemas en las medidas por la inclinación del ángulo de incidencia del láser y la existencia de posibles oclusiones) se cuenta con los correspondientes solapes transversales entre fajas. En cualquier caso, para facilitar el manejo de la información a partir de la nube de puntos capturados se han generado los correspondientes modelos digitales de superficies y del terreno, en los formatos solicitados y de acuerdo con los parámetros técnicos establecidos en los términos de referencia de este proyecto.

En este caso, y teniendo en cuenta tanto la densidad de la información disponible como la propia exactitud posicional vertical de los puntos medidos, se ha optado por la generación de modelos digitales de elevaciones mediante métodos de interpolación con el objeto de generar una grilla regular con el espaciado definido en el proyecto de 0.5m. En este proyecto han sido generados dos tipos de modelos digitales de elevaciones diferentes, por un lado, el modelo digital del terreno y, por otro lado, el modelo digital de superficies, cuyas características se describen en los apartados siguientes.

### 6.2.1.- Modelo Digital del Terreno (MDT)

Se trata de un modelo digital de elevaciones calculado de forma exclusiva a partir de los Intervienen únicamente los puntos clasificados como terreno, es decir, los puntos como clasificados dentro de la clase 2 (Ground). A partir de dichos puntos se obtiene el modelo digital del terreno que se muestra en la figura 10.

Este modelo digital del terreno será el elemento fundamental empleado para la caracterización morfométrica de las dolinas existentes en la zona, y pone de manifiesto las ventajas del empleo del sistema LiDAR como un método de una gran eficacia para la obtención de cartografía en zonas en las que la presencia de vegetación (arbolado) es muy importante, como consecuencia de la capacidad de penetración del rayo láser entre las hojas de los árboles y la medida de diferentes retornos.

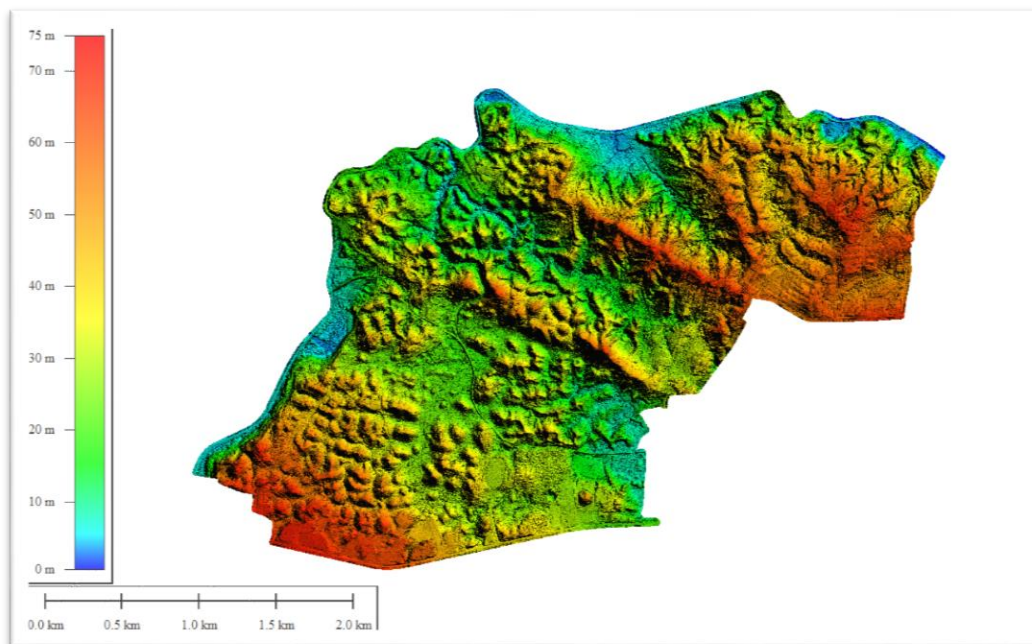
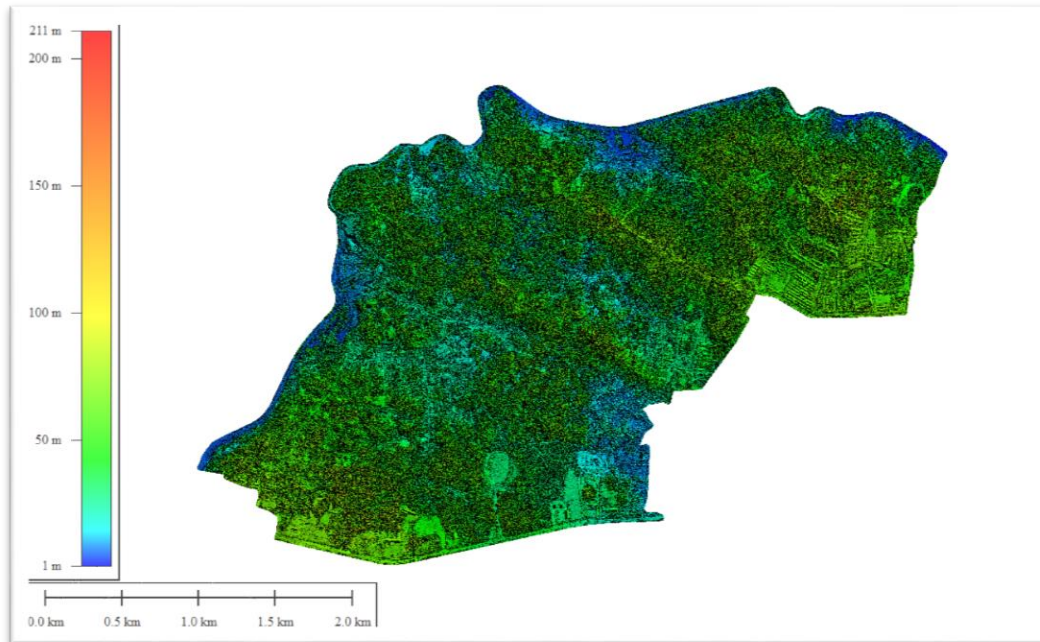


Figura 10. Modelo digital del terreno (MDT) de la zona de estudio.

### 6.2.2.- Modelo Digital de Superficie (MDS)

El segundo modelo obtenido es el conocido como modelo digital de superficie, para el cual se emplean todos los puntos de las clases consideradas como de puntos útiles, que en el caso de este proyecto son las clases de código 1 y 2, y se descartan los puntos clasificados como clase 7 (Low Points). Un aspecto a tener en cuenta es que cada pulso láser podrá dar lugar a diferentes retornos al incidir con los elementos presentes en la escena, copas de árboles, ramas intermedias, vegetación, suelo desnudo, por lo que es importante realizar una buena selección de los puntos a considerar. Así, para la generación del modelo digital de superficies se ha optado por seleccionar el primer retorno (first pulse) de cada rayo emitido

por el sensor. Al igual que en el caso anterior, se ha generado un modelo digital en formato raster con un espaciado de 0,5m, en el que se representan todos los elementos que existen en la zona de estudio. Dicho modelo digital de superficies se representa en la figura 11.



**Figura 11.** Modelo digital de superficies (MDS) de la zona de estudio.

## 7.- GENERACIÓN DE ORTOIMÁGENES

Por último, hay que tener en cuenta que si bien la información proporcionada por el sensor LiDAR proporciona una información con una extraordinaria densidad de la zona de estudio (puntos 3D en sistema de coordenadas terreno), en muchos estudios es necesario disponer de una información continua sobre la zona de estudio a efectos de la interpretación de los elementos y fenómenos que pueden ser observada en la misma. A tal efecto, en este proyecto se ha optado por el empleo de un vuelo combinado imagen digital RGB y LiDAR, por lo que junto con la nube de puntos se dispone de las imágenes que permiten la observación estereoscópica (tridimensional) del terreno facilitando el análisis de los elementos existentes.

No obstante, para facilitar su incorporación en los sistemas de información geográfica es necesario el disponer de un mosaico de ortoimágenes. Este mosaico es obtenido a partir de las ortoimágenes generadas de cada una de las imágenes capturadas en la zona de estudio corrigiendo los efectos producidos por las condiciones de la toma, básicamente la inclinación y la propia perspectiva central o cónica de la toma, así como los desplazamientos debido al relieve. Esto permite obtener un documento cartográfico con una escala constante (hay que



recordar que en las imágenes originales la escala depende de la distancia entre la cámara y el terreno, por lo que no es constante) y proyectada de acuerdo a un determinado sistema de coordenadas (en este caso, la oficial de Costa Rica).

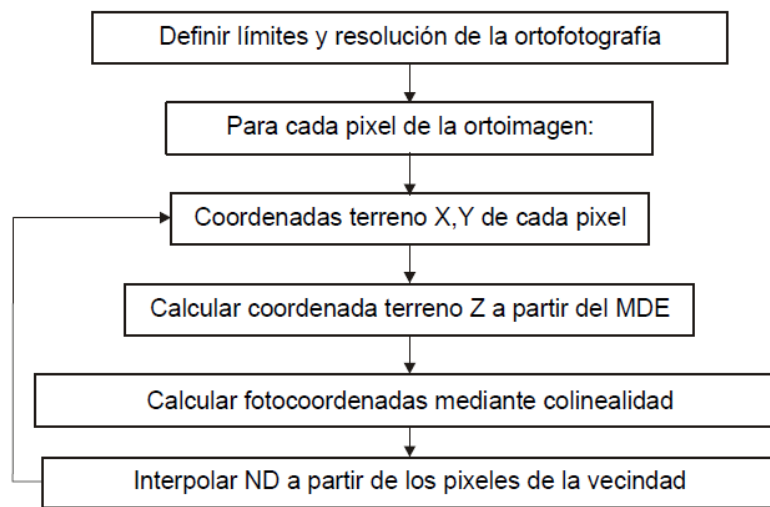
Para llevar a cabo dicha rectificación diferencial es necesario disponer de las imágenes originales, sus parámetros de orientación externa, y el modelo digital de la zona de estudio. Las ortofotografías generadas tienen un tamaño de pixel (GSD) de 0.05m.

### **7.1.- RECTIFICACIÓN DIFERENCIAL. ORTOFOTOGRAMA.**

La rectificación diferencial de las diferentes imágenes ha sido realizada empleando el programa Ortho Master de la empresa Inpho.

El primer paso en el procedimiento de ortorrectificación es establecer para cada fotograma cuál es el área en la que se desea aplicar la transformación, como elemento básico dicha área se establece en función de los traslajos longitudinales y transversales empleados en el vuelo, seleccionando para cada imagen aquella zona representada del terreno con una distancia con respecto al nadir inferior que en cualquier otra de las fotografías de las que forman modelo. De esta forma se establece el ortoárea que descarta las zonas situadas en las zonas más próximas a los bordes de la imagen, es decir, las zonas en las que el desplazamiento debido al relieve (e incluso el desplazamiento debido a la inclinación, aunque en este caso los ángulos de inclinación son muy bajos al tratarse de un vuelo con una configuración de vuelo vertical) es menor. En cualquier caso, siempre se mantiene suficiente área de solape entre ortoáreas contiguas para poder establecer una línea de mosaico adecuada, que no sea perceptible en el documento final.

El programa de rectificación diferencial utilizado asigna un valor dentro de la escala de niveles digitales de cada canal a cada píxel (punto imagen) de la ortofoto definitiva. Para ello calcula para cada píxel, a partir de sus propias coordenadas, el origen de la ortoimagen y el GSD de la misma, las coordenadas terreno X e Y correspondientes, y a partir de las mismas se obtiene la coordenada Z en base al modelo digital del terreno disponible para dicha área. A partir de la posición del punto del terreno XYZ y en función de los 6 parámetros de orientación externa de las imágenes es posible conocer la posición de dicho punto en la imagen mediante la aplicación de las expresiones de colinealidad, y, por tanto, el valor de nivel digital asociado a cada canal. El esquema básico se muestra en la figura 12.



**Figura 12.** Esquema del proceso de rectificación diferencial u ortorrectificación.

## 7.2.- TRATAMIENTO DE LA IMAGEN. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS.

Otro elemento básico de las ortoimágenes, junto con su calidad geométrica, es que exista una buena continuidad radiométrica en el mosaico de las mismas, a fin de facilitar las tareas de fotointerpretación, al tiempo que se proporciona un producto con una apariencia visual más adecuada. Para ello, las ortofotografías que proceden de las imágenes que han sido tomadas en 3 días diferentes y, lógicamente en diferentes condiciones de iluminación de la escena, son ajustadas dando lugar a un mosaico uniforme mediante el ajuste radiométrico de los tonos entre unas y otras, manteniendo en todo momento la mayor fidelidad posible a los tonos naturales del terreno. Esta tarea consiste en una modificación tanto a nivel global como local de los niveles digitales de los tres diferentes canales de la imagen, y el análisis de los valores de brillo y contraste de los histogramas de los mismos incluyendo un tratamiento de realce (mejora de balances cromáticos y del contraste de la imagen) que mejore las posibilidades de interpretación de las imágenes finales. Esta tarea se ha llevado a cabo con el software Inpho Orthovista.

Todo este tratamiento debe tener en cuenta, lógicamente, todas las características del proyecto (resolución de la imagen, elementos de la escena, características del vuelo, etc.) y se ha aplicado globalmente sobre la imagen a partir del análisis de los histogramas radiométricos de las ortofotos digitales. En resumen, se puede indicar que el ajuste radiométrico realizado a las imágenes ortorrectificadas se ha encaminado a evitar las discrepancias cromáticas entre fotogramas contiguos y conseguir una cobertura radiométricamente homogénea de la totalidad del área del proyecto para asegurando la continuidad radiométrica y cromática dentro del área de interés.



### 7.3.- MOSAICOS FOTOGRÁFICOS Y CORTE DE HOJAS.

Una vez ortorrectificados los fotogramas iniciales del vuelo y realizado el ajuste radiométrico entre los mismos se llevó a cabo el proceso de mosaico de las imágenes y el corte según la distribución de hojas designada para el proyecto.

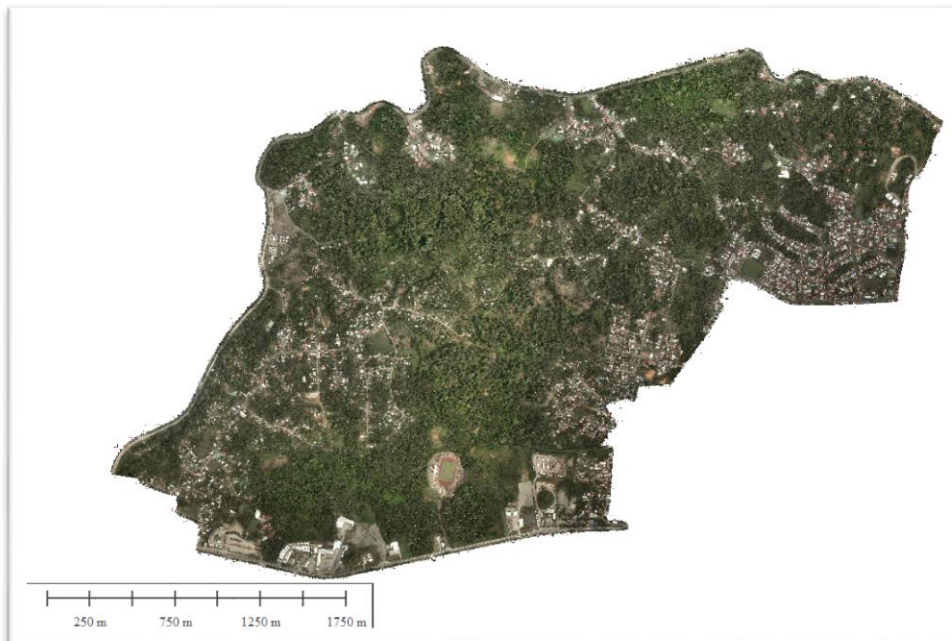
El proceso de mosaico consiste en la unión de los diferentes fotogramas ortorrectificados de forma que se obtenga una sensación de imagen única continua dentro de la hoja cartográfica. Este mosaico se realiza aprovechando las zonas de solape entre ortofotografías contiguas, por esta zona se traza la denominada línea mosaico que permite fusionar los ortofotogramas en una única ortoimagen.

La línea de mosaico es trazada de forma automática por medio del procedimiento denominado de mínimos cambios radiométricos. Este algoritmo busca la zona de máxima similitud radiométrica entre las imágenes contiguas para hacer pasar por ahí la línea de mosaico de forma que quede lo más disimulada posible y tratando siempre de que se tome de cada imagen la zona más nadiral posible.

Una vez se dispone de la línea automática de mosaico, esta es revisada para comprobar que es correcta y no interfiere con estructuras que pudieran delatar por donde se ha realizado la unión, es decir, se comprueba que la línea no corta edificaciones, puentes, etc. ya que, debido al diferente abatimiento que presentarían estos objetos en las distintas imágenes que se fusionan, aparecerían discontinuidades geométricas en los elementos.

Para hacer manejable el volumen de información que se ha de gestionar, visualizar, manipular, etc. se hace necesario dividir la superficie de trabajo en hojas cartográficas. Cada hoja cartográfica contendrá un ámbito geográfico determinado definido por los límites de la hoja, y la información está incorporada en los propios ficheros GeoTIFF en los que se ha almacenado la información, así como los sistemas de referencia. Esto facilita su posterior manejo en sistemas de información geográfica u otros programas de tratamiento de información cartográfica.

Una vista global de la ortoimagen final obtenida para las zonas de estudio se muestra en la figura 13, donde se puede observar la buena continuidad de la misma. Las características en cuanto a la resolución espacial de la ortoimagen (relacionada con el GSD de la misma) dan lugar a un producto cartográfico de un indudable interés para la fotointerpretación de los elementos que aparecen en la zona de estudio (zonas de vegetación, edificaciones, vías de comunicación, etc.). La fuerte presencia de vegetación en la zona provoca que lamentablemente salvo unas pocas excepciones no puedan ser identificadas ni delimitadas dolinas en la superficie, al quedar cubiertas por la densa masa vegetal existente.



**Figura 13.** Mosaico de ortoimágenes de las zonas de estudio.

#### **7.4.- CONTROL DE CALIDAD DE LAS ORTOFOTOS.**

En todo este largo proceso para la obtención del mosaico de ortoimágenes como producto final del proyecto, es necesario tener en cuenta la importancia de la calidad del producto cartográfico, tanto a nivel radiométrico (facilitando la interpretabilidad del mismo y la detección de elementos de interés) como a nivel geométrico (puesto que como tal documento cartográfico debe estar sometido al cumplimiento de unas tolerancias en cuanto a exactitud posicional garantizando la no presencia de deformaciones ni artefactos en las mismas). En este sentido, Stereocarto aplica a todos sus productos los más estrictos controles de calidad, para verificar que los mismos se ajustan a las necesidades del cliente, reflejadas en los propios términos de referencia de los proyectos y contratos en los que participa, contando con las herramientas y personal especializado en dichas tareas.

El control de calidad aplicado sobre el mosaico final de ortoimágenes, es un proceso que se divide básicamente en dos fases:

- 1) Control radiométrico, control de continuidad interna y detección de distorsiones. En ésta se trata de verificar que no haya diferencias visuales en la radiometría del mosaico. Para ello se realiza un barrido visual de los productos con el fin de detectar distorsiones en las imágenes para su posterior corrección en una 2ª fase de edición de ortorrectificación. Por último, se verifica que no existan desplazamientos fuera de tolerancia (como norma general 2 veces el tamaño de



pixel) entre imágenes dentro de los mosaicos. El resultado del control fue satisfactorio.

- 2) Control geometría externa. Se realizó un barrido visual en comparación con la cartografía y el DTM para verificar que no hubiese desplazamientos apreciables en zonas a priori inmóviles desde la fecha de los vuelos hasta la actualidad (zonas urbanas, vías de comunicación, etc.). El resultado en zonas urbanas fue satisfactorio al igual que en zonas boscosas y/o costeras.

## **8.- CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS DOLINAS EXISTENTES EN LA ZONA.**

### **8.1.- Introducción**

La última fase de este proyecto, y dejando al margen las actividades de comunicación y presentación de resultados, es la detección y caracterización de las dolinas existentes en la zona de estudio denominada como (Zona 6) con vistas a su posterior clasificación a fin de proporcionar información adicional acerca del funcionamiento del sistema hídrico kárstico presente en la zona. A esta memoria se anexan una serie de mapas relativos a esta segunda fase, entre los cuales se dispone de un mapa de localización de la zona, que se presenta ajustado en escala en la figura 14, en la que se muestra el mosaico de ortoimágenes de la zona 6, incluyendo igualmente la toponimia correspondiente a los principales núcleos de población del área.

En cuanto al proceso de detección y caracterización de dichas estructuras, es necesario hacer notar que el mismo ha atendido exclusivamente a información geomorfológica extraída de los sensores remotos empleados en este proyecto (imagen aérea, tanto a nivel de modelos estereoscópicos como ortorrectificada; y LiDAR aerotransportado) poniendo de manifiesto la potencialidad de uso de estos sensores remotos para este tipo de estudios. La información obtenida, sin duda es de gran interés para el estudio de este tipo de fenómenos medioambientales y, lógicamente esta información deberá ser completada y a posteriori con trabajos de campo específicos, a fin de determinar aspectos de indudable interés como geológicos (por ejemplo, presencia de fracturación visible en el área), hidrogeológicos (ensayos de trazadores que permitan analizar la conectividad interior de las diferentes estructuras, dando lugar al sistema kárstico que todo hace apuntar que en esta área tiene una gran importancia, seguramente mayor que la propia red hidrográfica superficial), edafológicos, e incluso ambientales, analizando si en las mismas se realiza algún tipo de vertido que pueda considerarse como un riesgo para la contaminación del acuífero al que alimentan).

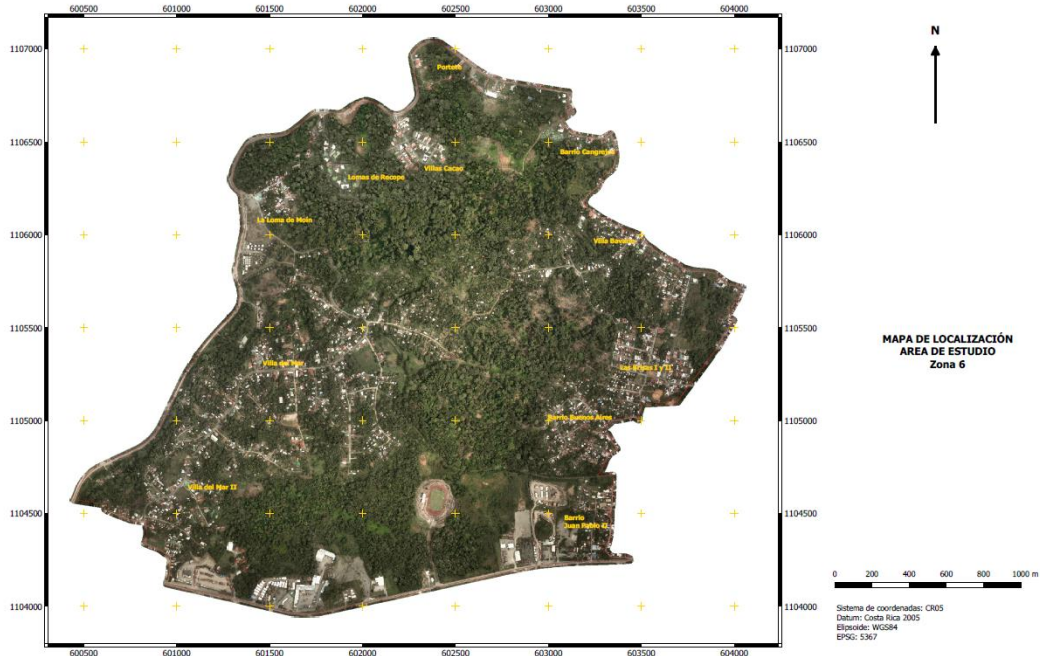


Figura 14. Mapa de localización del área de estudio (zona 6).

Es importante indicar que la metodología aplicada se trata de una metodología novedosa pero que está siendo empleada en diferentes investigaciones dando lugar a publicaciones en revistas del máximo prestigio internacional, como, la recientemente publicada de Jeanpert et al. (2016)<sup>1</sup> y Telbisz et al. (2016)<sup>2</sup>. No obstante, como se comentará en este informe en este caso, las condiciones de aplicación han sido más complejas, como consecuencia de la vegetación presente en la zona y el hecho de las propias alteraciones del paisaje por la presencia de edificaciones y vías de comunicación existentes en el área.

Para la realización de este trabajo se ha contado con la colaboración de un equipo de miembros del Grupo de Investigación “Sistemas Fotogramétricos y Topométricos” de la Universidad de Jaén (España), bajo la dirección del Prof. Dr. Jorge Delgado García, Dr. en

<sup>1</sup> Jeanpert, J., Genthon, P., Maurizot, P., Folio, J. -L., Vendé-Leclerc, M., Sérino, J., Join, J. -L., and Iseppi, M. (2016) Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). *Earth Surf. Process. Landforms*, 41: 1854–1868. doi: [10.1002/esp.3952](https://doi.org/10.1002/esp.3952).

<sup>2</sup> Telbisz, T.; Látos, T.; Deák, M.; Székely, B.; Koma, Z.; Standovár, T. (2016). The advantage of LiDAR digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets Aggtelek Karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica*, 45 (1), 7-18.



Ciencias Geológicas por la Universidad de Granada (España) y Profesor Titular de Universidad del área de conocimiento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría.

## 8.2.- Información de partida.

Este trabajo de detección y caracterización parte, como información base, de las nubes de puntos 3D generadas a partir de las capturas del sensor LiDAR y que posteriormente han sido procesadas para alinear y ajustar las diferentes fajas (*strips*); y de una forma muy especial, la clasificación de los puntos capturados por el sensor en función de si se considera que los mismos están ubicados sobre el terreno (*ground data, LAS class 2*) o sobre otros elementos presentes en el mismo (en este caso, básicamente vegetación –árboles-, edificios o incluso otros elementos presentes en la escena como vehículos, contenedores, etc.) (*LAS class 1*). En este sentido, se plantean para esta fase del proyecto las siguientes etapas:

- a) Análisis previo de la información LiDAR y de ortoimagen.
- b) Tratamiento de los modelos digitales de elevaciones. Obtención de modelos derivados.
- c) Detección preliminar de depresiones en el terreno.
- d) Revisión manual de depresiones. Trazado 3D de las estructuras. Obtención de parámetros geomorfométricos.
- e) Integración de la información final. Caracterización del área de dolinas.

### 8.2.1.- Análisis previo de la información LiDAR y ortoimagen

La primera etapa a tener en cuenta en este procesamiento es la propia información de partida, especialmente analizando que los datos cubren la totalidad del área de estudio, y, por otro lado, estableciendo unas valoraciones iniciales en cuanto a la tipología de los datos medidos (puntos sobre el terreno, puntos sobre vegetación –árboles-, puntos sobre edificaciones, etc.) así como valores relativos a la densidad de la información, tanto global como sobre el terreno.

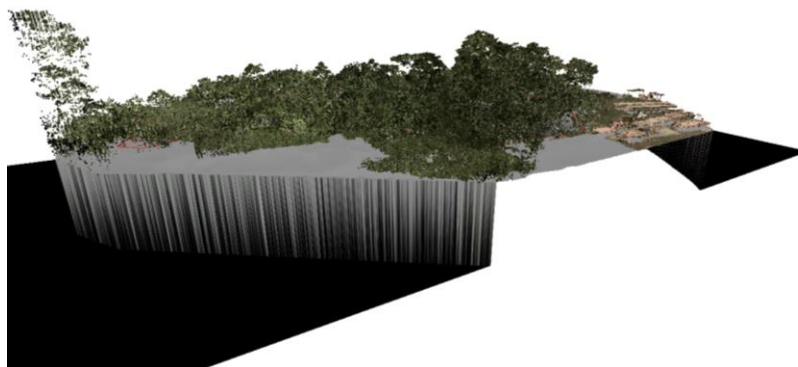
El número total de puntos XYZ capturados sobre la zona mediante el sensor LiDAR ha sido de 460.661.660 puntos, con una distribución de 407.062.157 puntos de primer retorno, 49.765.341 puntos de segundo retorno, 3.705.807 puntos de tercer retorno y 128.355 puntos de cuarto retorno. No se detectan puntos relativos al quinto retorno. Este número de puntos en el área considerada da lugar a una densidad global de 56.52 puntos/m<sup>2</sup> que da lugar a un espaciado medio de 0.13 m. Si se considera el punto de retorno único la densidad es de 49.94 puntos/m<sup>2</sup> con un espaciado de 0.14 m. Estos espaciados plantean que en la superficie considerada por cada una de los píxeles o teselas que integran los modelos digitales de elevaciones generados en este trabajo contienen como media un total en torno a 14 puntos, cifra que se considera más que suficiente para la correcta caracterización de la morfología del terreno.



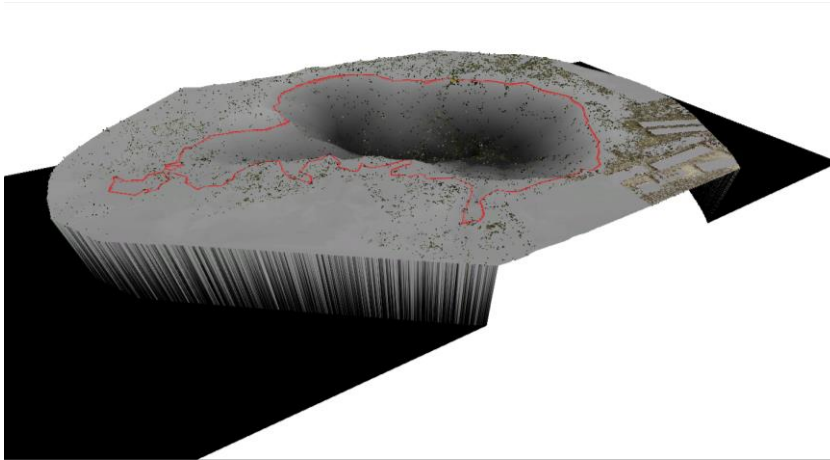
De dichos puntos un total de 87.584.318 puntos han sido clasificados sobre el terreno, lo que pone de manifiesto que sólo un 19.01% de los puntos serán los empleados para definir las estructuras de interés. Esta cifra pone de manifiesto la importante presencia de vegetación y de edificios sobre la zona, siendo un elemento diferenciador de este trabajo frente a publicaciones previas en esta misma temática. No obstante, el hecho de la extraordinaria densidad alcanzada en los procesos de captura permite tener una densidad de 13.42 puntos/m<sup>2</sup>, que supone un espaciado medio en torno a 0.27m, considerándose que ambos parámetros son adecuados al objetivo que se persigue de la caracterización correcta de las dolinas.

Por último, hay que indicar que junto con la nube de puntos 3D, también se dispone de imágenes aéreas de la zona con una extraordinaria resolución espacial (GSD=5cm) capturadas con una cámara fotogramétrica digital (Leica RCD-30), que proporcionan una fuente de información adicional en cuanto a la detección de elementos presentes en la zona, permitiendo la fotointerpretación estereoscópica de los mismos (aunque la existencia de vegetación dificulta la propia fotointerpretación de rasgos sobre el terreno) así como el propio empleo de ortoimágenes derivadas (empleada para la detección del rasgo de presencia de vegetación o no en la zona de dolina o, por ejemplo, para intentar discriminar algunas estructuras y depresiones con morfología similar a las propias dolinas, pero de carácter artificial como, por ejemplo, estanques o piscinas).

Como conclusión a esta primera etapa se puede indicar que la información disponible se considera adecuada para la detección y caracterización de las estructuras buscadas (figuras 15 y 16).



**Figura 15.** Representación 3D de las nubes de puntos medidos por el sensor LiDAR en una zona de dolina. Representación de todos los puntos coloreados, de acuerdo con la información capturada por la cámara fotogramétrica digital (ortoimagen).



**Figura 16.** Representación 3D de la nube de puntos medidos por el sensor LiDAR en una zona de dolina. Representación de todos los puntos coloreados, de acuerdo con la información capturada por la cámara fotogramétrica digital, habiéndose clasificado los puntos pertenecientes al terreno.

Por último, dentro de esta primera etapa se ha procedido a la conversión de los ficheros originales en formato LAS, a formato LAZ (formato comprimido de LAS) lo que supone un importante ahorro de espacio de almacenamiento sin afectar a la calidad de los datos. Para mayor información sobre el formato LAZ se recomienda la consulta de <https://www.laszip.org> siendo en la actualidad un formato empleado por un elevado número de organizaciones cartográficas en todo el mundo. Los programas de compresión y descompresión de este formato son de dominio público, y han recibido diversos premios a nivel internacional.

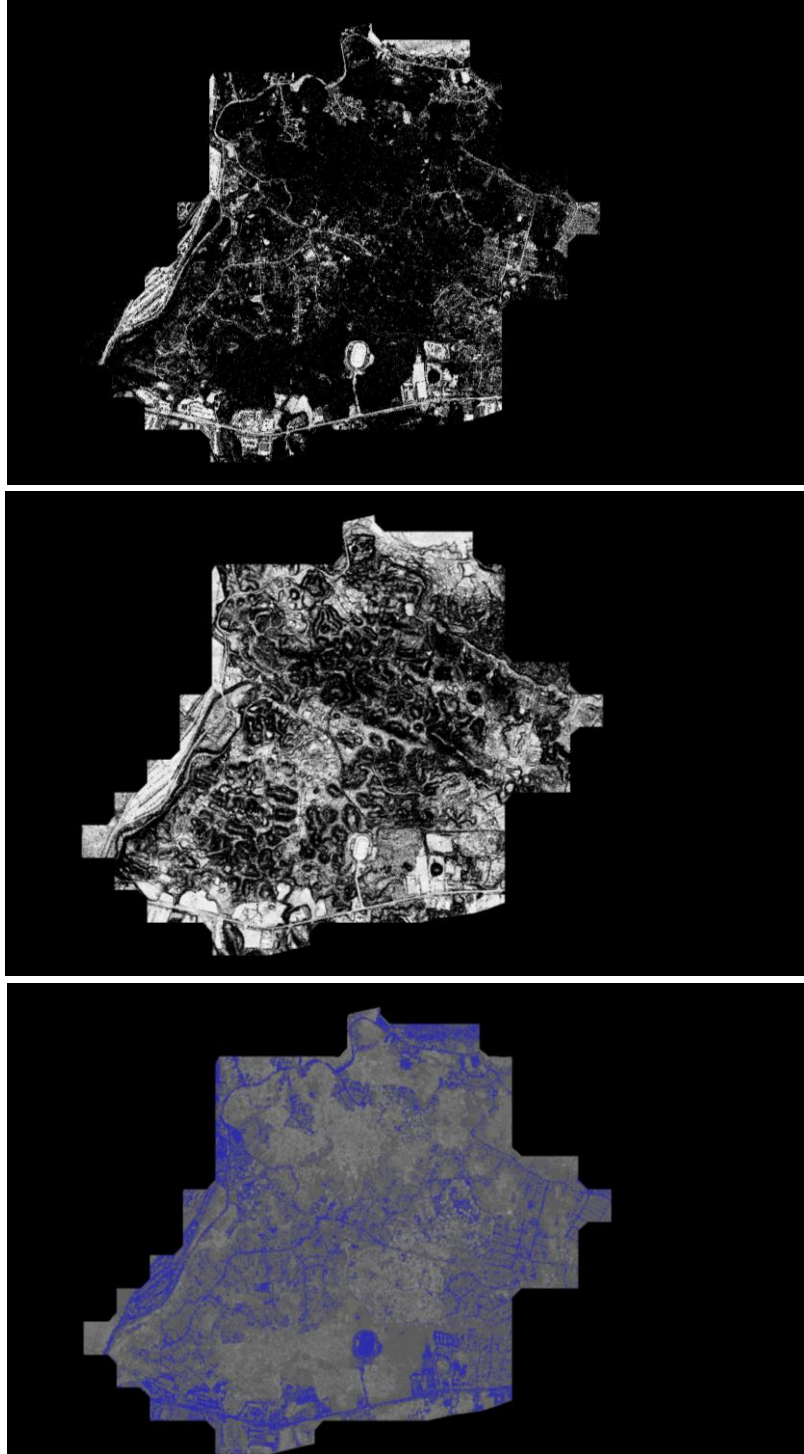
### 8.3.- Tratamiento automático de los modelos digitales de elevaciones

#### 8.3.1.- Obtención de modelos derivados.

Tras la clasificación de los puntos en función de su pertenencia o no al terreno, es posible generar dos productos del máximo interés para cualquier proyecto de estas características, por un lado, el modelo digital de superficies (MDS) y el modelo digital del terreno (MDT). Éste último, será el empleado en la caracterización de las dolinas, si bien, se considera que el primero también es de un indudable interés para el proyecto, al aparecer reflejado en el mismo la existencia de edificaciones en la zona, así como otros elementos tales como la propia vegetación presente en la zona.

Por otro lado, se ha generado igualmente un modelo digital de superficies normalizado (nMDS) obtenido como la diferencia de los dos anteriormente mencionados que puede ser utilizado para analizar la altura de los elementos presentes en el terreno, tanto árboles como edificaciones. En dicha figura se puede observar, la importante diferencia entre el modelo digital de superficies (como consecuencia de la fuerte presencia de vegetación y

edificaciones en la zona) con respecto al modelo digital del terreno. En este modelo digital del terreno se pueden observar una morfología característicamente kárstica del terreno, apreciable incluso a la escala de observación empleada en la representación en dicha figura (figura 17).



**Figura 17.** *Sup: Modelo digital de superficies (MDS); Centro: Modelo digital del terreno (MDT); Inf.: Modelo digital de superficies normalizado (nMDS).*



### 8.3.2.- Detección de líneas de flujo y cuencas.

El análisis de las redes hidrológicas es uno de los aspectos más importantes de un elevado número de estudios medioambientales y de ingeniería civil. Es evidente que las aportaciones a este tipo de estudios que supone disponer de un modelo digital de elevaciones de gran calidad son evidentes, permitiendo gracias a su estructura codificada y a su carácter digital la aplicación de algoritmos que permitan llevar a cabo laboriosas tareas que tradicionalmente se han venido desarrollando de forma manual, mediante la aplicación de los algoritmos correspondientes que permiten establecer la red hidrológica de la zona, y a través del análisis de las vertientes establecer la localización de cuencas endorreicas que se pueden corresponder con dolinas en el área.

El elemento principal en todos estos estudios es la línea de flujo, que se define como el trayecto que, a partir de un punto inicial, sigue la línea de máxima pendiente (Felicísimo, 1995)<sup>3</sup>. De esta forma, se puede plantear que la delimitación de trazado de las líneas de flujo sólo pretende el reproducir mediante una simulación simple el propio proceso de escorrentía superficial que se producirá en el propio modelo. El inicio de dichas líneas de flujo partirá de las celdas más elevadas y, progresivamente irá analizando todas las celdas del modelo para determinar cuál es la celda en la que drena cada una de las consideradas. El fin de las líneas lógicamente vendrá dado por encontrar una concavidad (como sucede en este proyecto cuando existe una dolina que da lugar a una cuenca endorreica), al desembocar en el mar o al llegar al borde del modelo. Es importante tener en cuenta que en esta modelización simple no se tiene en cuenta las propias características de los suelos o rocas presentes en el terreno, que pueden dar lugar a una infiltración que limite dichos drenajes en función de los límites de escorrentía superficial de cada posición.

El segundo concepto de interés es el de área subsidiaria, definida como el conjunto de elementos del MDE cuyas líneas de flujo convergen en un punto único. Una cuenca hidrológica puede ser definida como un área subsidiaria en la que el punto que ejerce de sumidero tiene algunas características singulares (el área subsidiaria puede establecerse para cualquier punto del territorio, mientras que no todos los puntos son sumidero de una cuenca hidrológica). La definición de estas características puede realizarse con diferentes criterios, pero, en el caso presente, un punto del modelo se definirá como sumidero de una cuenca cuando cumpla una de las tres condiciones siguientes:

---

<sup>3</sup> Felicísimo, A.M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicación a las ciencias ambientales. Disponible on-line en: <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>



- se trate del punto de menor altitud de una concavidad (implica un posterior drenaje subterráneo o el relleno de la concavidad en caso de lluvia si es un terreno impermeable).
- se encuentre en el borde del modelo y todos sus vecinos drenen hacia él (supone una incertidumbre en la delimitación de cuencas que no están completamente incluidas en el modelo).
- esté situado en la línea de costa y drene al mar. Habitualmente, las propiedades de una cuenca suelen definirse mediante el uso de índices que expresan básicamente las relaciones observadas empíricamente entre algunos parámetros morfológicos y los procesos hidrológicos existentes.

Chorley (1969)<sup>4</sup> y Mark (1975)<sup>5</sup> propone que las características de las cuencas y redes de drenaje pueden dividirse en propiedades geométricas, que incluyen las propiedades dimensionales (elevaciones, longitudes, áreas y volúmenes), y propiedades topológicas, que relacionan conjuntos de objetos de la red (como la relación de bifurcación, la densidad de cauces, etc). Los índices descritos en la bibliográfica son muy abundantes y pueden ser vistos de una forma global en el trabajo de Gregory y Walling (1973)<sup>6</sup>.

El trazado de las líneas de flujo puede realizarse de acuerdo con criterios muy simples: partiendo de un punto del modelo, la línea de flujo se construye siguiendo el sentido de máxima pendiente hasta llegar a un sumidero, al borde del modelo o a la costa. Es posible, por tanto, su construcción de forma automática a partir de los datos del MDE. Esta modelización, aunque simple, representa un paso más en la explotación de los datos en los modelos digitales. El proceso de construcción de una línea de flujo a partir de un punto inicial, es iterativo y consta de tres fases elementales:

1. Se fija el punto inicial de la línea, P(i).
2. Se calculan las pendientes hacia sus 8 vecinos más próximos. Pueden darse 3 casos:
  - i. Todas las pendientes son negativas (se trata de una concavidad): fin de la línea.
  - ii. Todas las pendientes son negativas y el punto está en el borde del MDE (la cuenca continúa probablemente fuera de los límites del MDE): fin de la línea.
  - iii. Se localiza al menos un punto con pendiente positiva: se elige el punto con pendiente máxima.

---

<sup>4</sup> Chorley, R.J. (1972): Spatial analysis in geomorphology. Methuen, London. 393 p.

<sup>5</sup> Mark, David M. (1975): "Geomorphometric parameters: a review and evaluation". Geografiska Annaler, 57A (3-4): 165-177.

<sup>6</sup> Gregory, K.J.; Walling, D.E. (1973): Drainage basin, form and process. A geomorphological approach. Edward Arnold, 458 pág. London



3. El punto elegido (pendiente máxima) se incorpora a la línea de flujo y se toma como base para volver al paso 2.

El trazado de la línea finaliza, bien cuando se alcanza el borde del modelo, bien cuando llega a una depresión o concavidad. Esta última situación puede reflejar formas reales (dolinas, por ejemplo) pero, en ocasiones, se origina por artefactos provocados por la naturaleza discreta de la información de altitud, circunstancia frecuente cuando los puntos del modelo describen valles angostos o cauces meandriformes con perfiles poco profundos (Carrara et al., 1991)<sup>7</sup>.

La identificación y delimitación de las cuencas puede considerarse una generalización del trazado de líneas de flujo. El objetivo final es crear una matriz de las mismas dimensiones que el MDE donde cada punto tenga asignado un número, correspondiente a la cuenca a la que pertenece, al que se puede incorporar otro código adicional indicando a qué cuenca drena, salvo en el caso de que sea la última de la línea de flujo. Todo este proceso hay que tener en cuenta que está especialmente diseñado para cuencas fluviales convencionales y con modelos digitales de una resolución media-alta. En este proyecto hay que tener en cuenta la extraordinaria complejidad del diseño de la red hidrográfica, por dos causas fundamentales, en primer lugar, por las propias características del área con fuertes fenómenos kársticos que dan lugar a una importante presencia de dolinas (incluso generadas en varias fases) que llevan a una fuerte presencia de cuencas endorreicas en la zona; y, en segundo lugar, por el fuerte impacto antrópico en la zona de estudio con diversas construcciones, vías de comunicación, etc. que alteran la configuración natural tanto de las cuencas como de las líneas de flujo (e incluso, en muchos casos, mediante canalizaciones subterráneas que convierten en invisibles las líneas de flujo en los modelos digitales de elevaciones.

Por último, la delimitación de cuencas de drenaje, supuesta la conectividad hidrológica no presenta dificultades especiales. Al respecto, uno de los algoritmos más citados en la bibliografía fue el propuesto por Collins (1975)<sup>8</sup> si bien en este proyecto se ha considerado más adecuado emplear el basado en las líneas de flujo que se describe a continuación:

1. Se asigna inicialmente el valor de cuenca 0 a todos los puntos del MDE y a continuación se elige un punto P(i) del MDE.

---

<sup>7</sup> Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzetti, F.; Pasqui, V.; Reichenbach, P. (1991): "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard". *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 427-445.

<sup>8</sup> Collins, Stanley H. (1975): "Terrain parameters directly from a digital terrain model". *The Canadian Surveyor*, 29(5): 507-518.



2. Se comprueba si está asignado a alguna cuenca. En caso afirmativo se continúa con el siguiente punto del modelo; en caso negativo se calcula su línea de flujo, compuesta por n puntos.
3. Se comprueba el valor de cuenca del último punto de la línea. Pueden presentarse dos casos:
  - a. El punto final de la línea no está asignado aún a ninguna cuenca (mantiene el valor 0): se asigna a todos los puntos de la línea un nuevo valor de cuenca y se inicia el proceso con el siguiente punto del MDE.
  - b. El punto final de la línea es diferente de cero, lo que implica que la línea de flujo comunica con una cuenca preexistente: todos los puntos pertenecientes a la línea actual se asignan a esa cuenca y se inicia el proceso en 1 con un nuevo punto del modelo.

El proceso continúa hasta que todos los puntos del MDE han sido barridos una vez. Puede notarse que todos los puntos se asignan a una cuenca, sin que existan puntos con códigos especiales. El proceso es de ejecución relativamente rápido. Aunque el método puede realizarse partiendo de cualquier punto del modelo, se ha comprobado que es preferible operar eligiendo los puntos por orden decreciente de altitud. De esta forma, los perfiles iniciales son los más largos y barren el mayor número de puntos del modelo. En este caso, debe solucionarse el problema de la ordenación de los elementos de un MDE en función de la altitud para lo cual, dado el elevado número de datos que suelen componer un modelo, es conveniente utilizar un método de elevada eficacia.

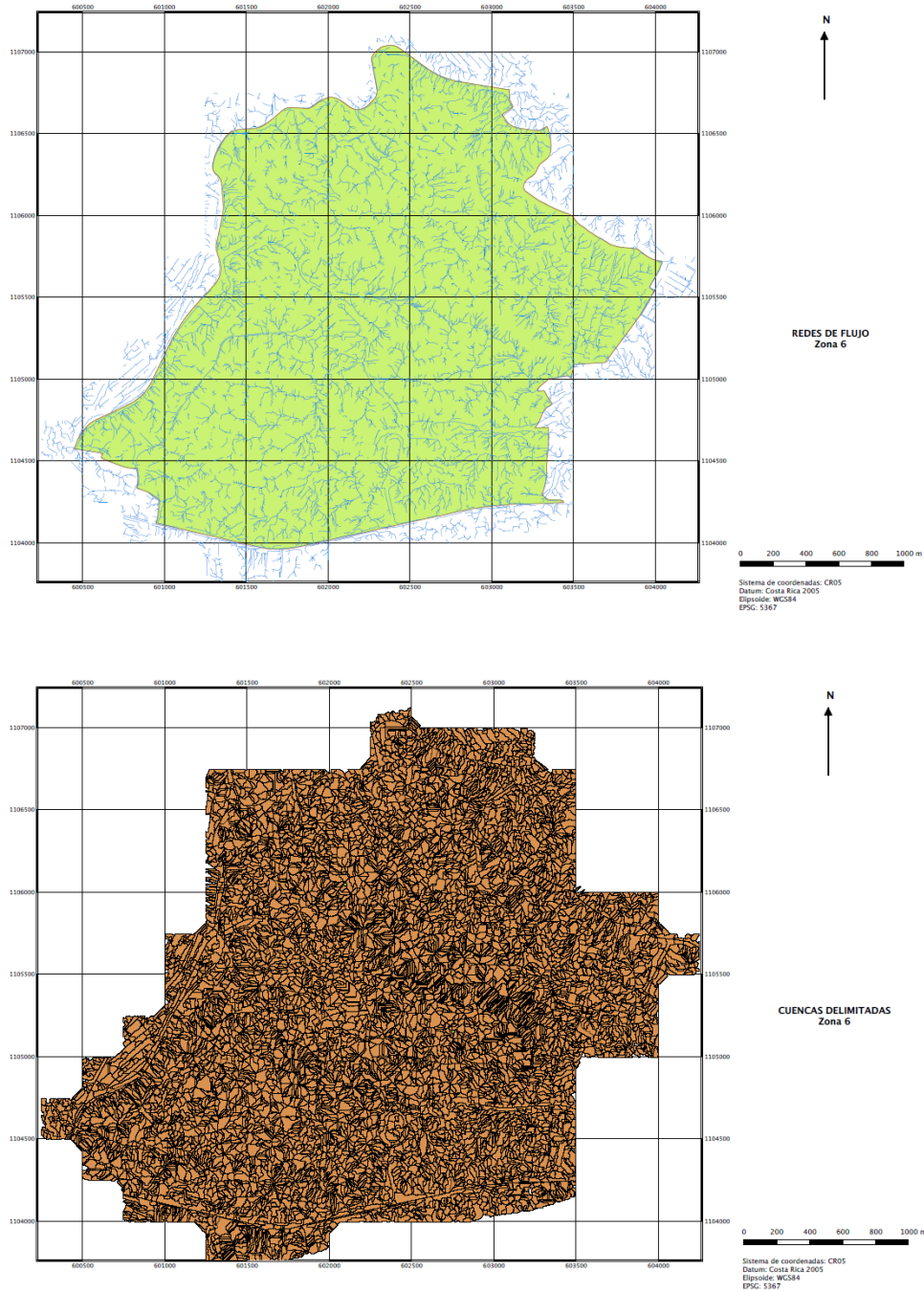
Un detallado estudio sobre los algoritmos para la modelización hidrológica de cuencas puede ser consultado en Jones (2002)<sup>9</sup>.

En este proyecto para llevar a cabo estos cálculos se ha empleado el programa Global Mapper v.17.0, si bien es evidente que hubiera sido posible el realizar este tipo de cálculos con otros programas de dominio público (como, por ejemplo, WhiteBox GAT (<http://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/Whitebox/>), SAGA <http://www.saga-gis.org/o> LandSerf <http://www.landserf.org/>). Estos programas de dominio público tienen la ventaja de ser en algunos casos de código abierto, lo que permite incluso incorporar modificaciones en los mismos. A raíz de la aplicación de estos algoritmos se obtienen los resultados que se presentan en la figura 18. Al respecto, es importante hacer notar que estos algoritmos, si bien dan lugar a resultados adecuados no están especialmente ideados para trabajar en paisajes geomorfológicos con la complejidad de este acuífero (un elevado número de cuencas endorreicas, morfologías complejas, etc.) y a partir de un MDE con un nivel de detalle como

---

<sup>9</sup> Jones, R. (2002). Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computer & Geosciences*, 28(9), 1051-1060.

el empleado en este proyecto (MDS espaciado 0.5m). En este sentido, y para estas operaciones globales se recomienda el empleo de modelos digitales con un espaciado mayor 1 ó 2 m, que permiten reflejar de una forma correcta la geometría de la zona, pero que elimina los problemas derivados de la excesiva irregularidad del terreno a nivel lugar, que podrían dar lugar a la detección de “falsas estructuras –cuencas, drenajes, etc.-“.



**Figura 18.** *Sup.:* Mapa de líneas de flujo extraídas del modelo digital del terreno; *Inf:* Delimitación de cuencas vertientes individuales.



Si se observan dichas figuras se puede observar unos ciertos patrones de distribución en la zona considerada, con cauces (que a pesar de la complejidad de la zona) se distribuyen en dos direcciones fundamentales (aproximadamente N105ºE y su dirección perpendicular N15ºE) que podría, quizá deberse a estructuras geológicas en la zona.

Ambos archivos han sido suministrados en formato SHP con la siguiente estructura:

Archivo Red\_Drenaje\_Cauces:

Layer	Stream
Elevation	(campo en blanco)
Stream_ID	Código identificador de la línea de flujo
In_Flow	Parámetro de flujo de entrada
Out_Flow	Parámetro de flujo de salida
Drain_Area	Área drenada expresada en km <sup>2</sup>

Archivo Red\_Drenaje\_Cuencas:

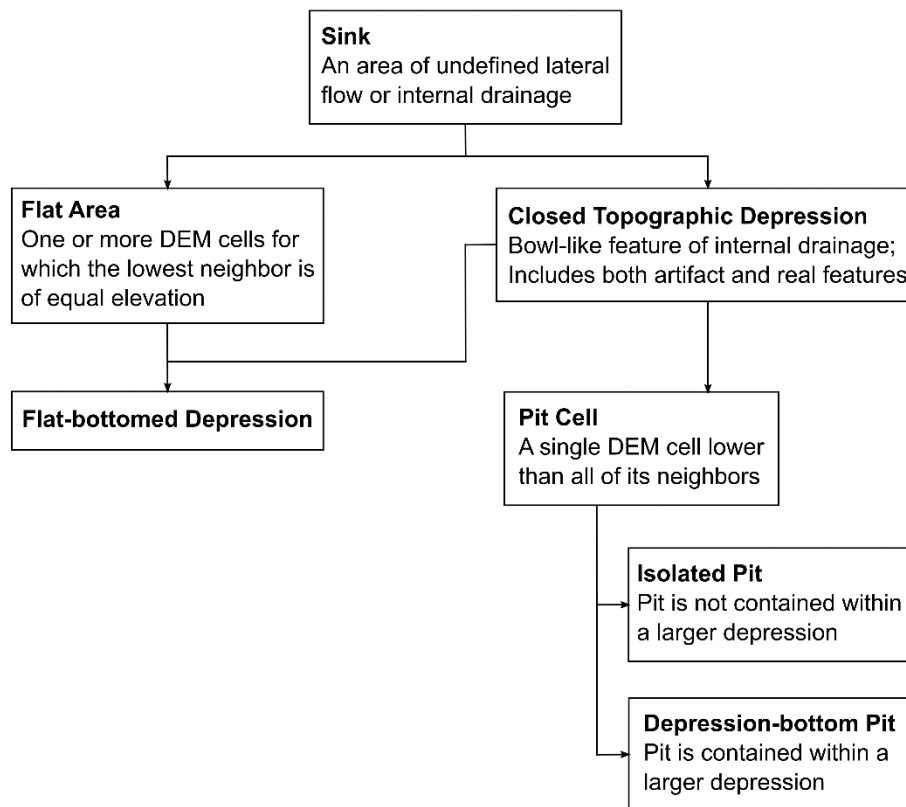
Layer	Stream
Stream_ID	Código identificador de la Cuenca
Next_Stream	Código de la cuenca en la que vierte
Area	Área de la cuenca expresada en m <sup>2</sup>

La complejidad de la cuenca queda puesta de manifiesto analizando que en la superficie correspondiente a la zona 6 de estudio (6,36 km<sup>2</sup>) el número total de líneas de flujo extraídas ha sido de 9.053 y el número de cuencas ha sido de 11.131. Hay que tener en cuenta que el número de cuencas al que se hace referencia no se corresponde con el de cuenca vertiente, sino con el de una determinada superficie del terreno (que incluso puede ser igual a 1m<sup>2</sup>) que se corresponde a la resolución del modelo digital de elevaciones empleado (1x1m) con unas características propias en cuanto a la cuenca a la que drenan y o de las que reciben agua, lógicamente analizando los códigos (Next\_Stream) se puede obtener de una forma simple las correspondientes cuencas vertientes. Una cuenca con un valor de Next\_Stream igual a 0 indica que la misma no vierte su agua a ningún sitio (concavidad) por lo que debe ser considerada como una cuenca de límite de modelo, o bien, como una cuenca endorreica que en este caso, y teniendo en cuenta la característica kárstica de la zona implicaría la existencia de una dolina.

### 8.3.3.- Detección preliminar de sumideros –sink–.

Una vez que se dispone de información relativa a la red de drenaje de la zona (líneas de flujo y cuencas) el siguiente paso será la determinación de de las depresiones cerradas en la zona (*sink*). Los "*sink*" son definidos (figura 19) como un área de flujo lateral no definido o de drenaje interno (cuenca endorreica), que puede ser debido a la existencia de una zona llana en la que se produzca una indeterminación en la definición de las líneas de flujo ("*flat area*")

o una verdadera depresión topográfica (“*closed topographic depression*”). Este último caso es el que nos interesa como objeto de este estudio, al corresponderse con las morfologías asociadas a las dolinas, y dentro de este ámbito hay que descartar aquellos que sean pozos aislados (“*isolated pit*”), que puedan ser incluso debidos a errores en los propios modelos digitales de elevación, por la captura incorrecta de puntos, por la clasificación de puntos en una clase incorrecta o por problemas en los algoritmos de interpolación empleados. En este proyecto se considera la clasificación clásica de “sink” publicada en el trabajo de Lindsay (2015)<sup>10</sup>



**Figura 19.** Denominaciones de estructuras determinadas relacionadas con depresiones del terreno a partir del análisis geomorfométrico de Modelos Digitales del Terreno (Lindsay, 2015)<sup>10</sup>.

En la figura 20 se muestra un esquema de los “sink” detectados, es evidente que esta detección automática reflejará diversas estructuras, especialmente en el caso de esta zona con morfología compleja y con un elevado número de estructuras antrópicas. Esta primera extracción debe ser analizada en este sentido, descartando estructuras no naturales e

<sup>10</sup> Lindsay, J.B. (2015). Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. *Hydrological Processes*, 30(6), 846-857.

incorporando algunas que no han sido correctamente detectadas, por su morfología o por sus propias dimensiones.

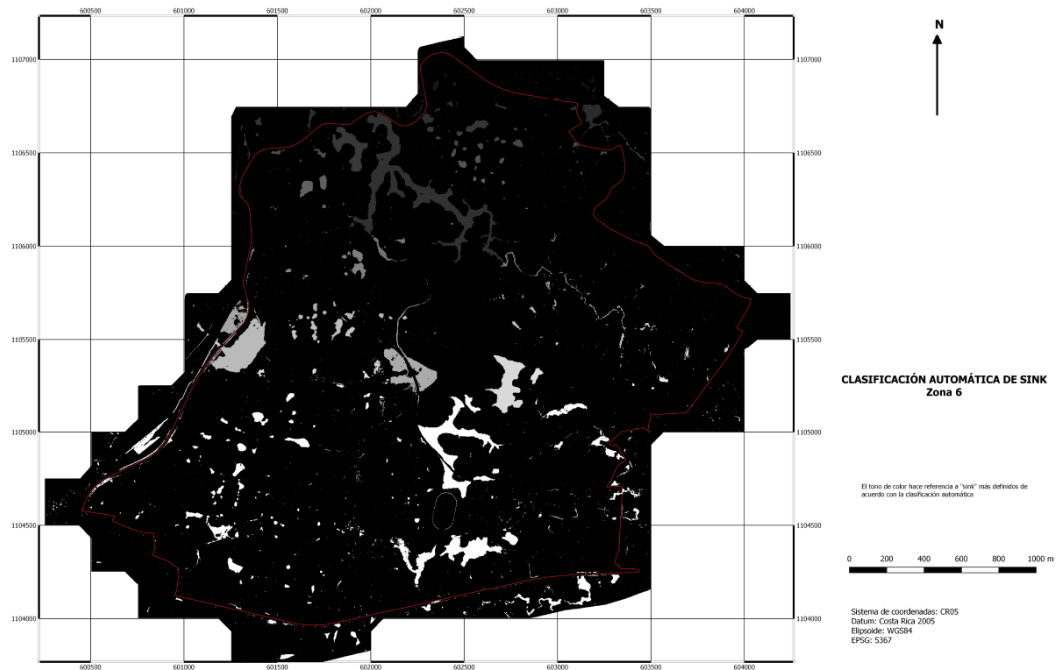


Figura 20. Detección automática de "sink"

## 8.4.- Revisión manual de depresiones. Obtención de parámetros para la caracterización.

### 8.4.1.- Extracción de polilíneas 3D de las estructuras. Obtención de parámetros geomorfométricos.

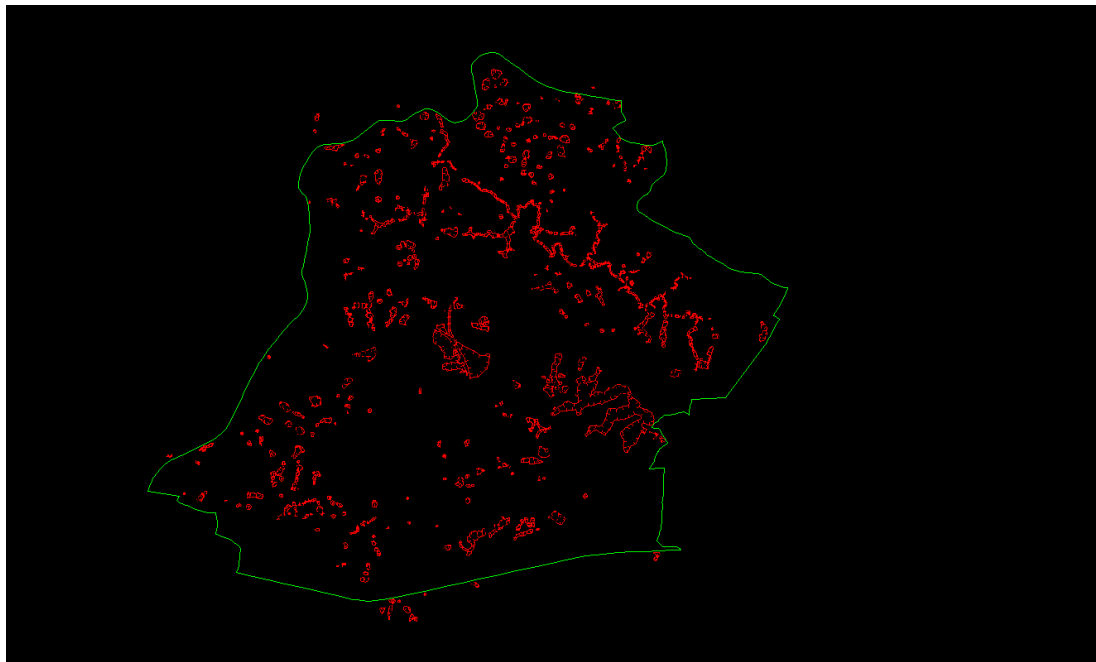
Los sistemas actuales nos permiten, tal y como se ha mostrado en los apartados anteriores, el realizar una identificación automática de diversos elementos de interés para el estudio, como, por ejemplo, líneas de flujo, cuencas vertientes y depresiones "sink". No obstante, hay que tener en cuenta que, como indicó Band (1986)<sup>11</sup>, si bien las concavidades se pueden corresponder con cuencas endorreicas, también es posible que puedan ser debidas a errores de los datos o incluso a problemas derivados de los métodos de interpolación empleados para la transformación a una estructura raster de la información discreta disponible en los puntos medidos sobre el terreno. Es, por ello, que es recomendable una

<sup>11</sup> Band, Lawrence E. (1986) Topographic partition of watersheds with digital elevation models. Water Resources Research, 22(1), 15-24.



revisión manual de las concavidades detectadas. Es por ello, que para este proyecto se ha procedido a una revisión de cada una de las depresiones extraídas (descartando aquellas con tamaños inferiores a  $1\text{m}^2$ ). Dicha revisión consideró la propia morfología de la zona obtenida a partir del modelo digital del terreno (con la ayuda del curvado realizado y el trazado de perfiles adicionales en el caso de ser necesario). Es evidente, que el trazado de cada una de las estructuras no es una labor sencilla, especialmente en el caso de estructuras cuyos límites han sido modificados de forma artificial (carreteras, edificaciones, etc.) o en el caso de estructuras anidadas o estructuras que se han producido en diferentes fases (así, por ejemplo, se ha detectado la existencia de dolinas que se han generado en el fondo de depresiones previas, apuntando a posibles fenómenos tectónicos en la zona –levantamientos, o incrementos del poder erosivo por disolución en las redes, etc.-.

El número inicial de zonas de interés consideradas ha sido finalmente de 502 distribuidas por toda la zona (figura 21). A cada una de estas zonas se les ha asignado un código, que es al que se hace referencia a lo largo de todo el estudio, si bien lógicamente no todas las zonas de interés detectadas se corresponden con dolinas reales, o también se puede dar el caso de que una vez analizada la zona en detalle, se ha considerado aconsejable la diferenciación en varias subunidades en cuyo caso reciben el código de la zona acompañada de una letra (a, b, c, ...).



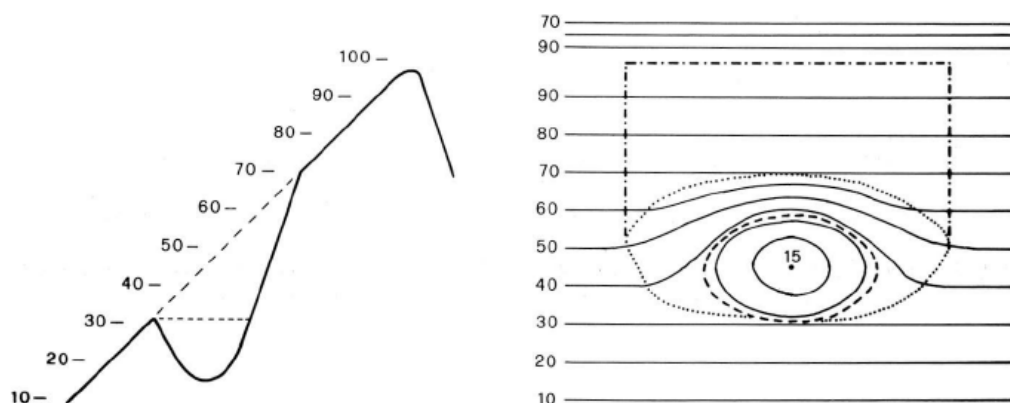
**Figura 21.** Selección de zonas de interés en el área.

En estas zonas trazadas de forma preliminar, y a objeto de facilitar el trabajo con la información disponible, se ha procedido generar conjuntos de datos individuales compuestos, considerando un buffer de 25m alrededor de los límites definidos de forma preliminar para

las estructuras. Esto facilita la caracterización del propio entorno y permite llevar a cabo un análisis con un mayor detalle. Los ficheros extraídos para cada zona (siempre que la información estuviera disponible, algo que no es posible en las zonas detectadas fuera de los límites de zona) han sido:

- a) Nube de puntos LiDAR correspondiente a la zona de interés (total de puntos), coloreadas empleando los tonos reales de la ortoimagen disponible en la zona para facilitar la interpretación de los objetos que aparece en la misma. Fichero dol\_a\_<código\_zona>.laz.
- b) Nube de puntos LiDAR correspondiente a la zona de interés (puntos del terreno), coloreadas empleando los tonos reales de la ortoimagen disponible en la zona para facilitar la interpretación de los objetos que aparece en la misma. Fichero dol\_g\_<código\_zona>.laz.
- c) Modelo digital del terreno del área en formato ArcGrid.
- d) Curvado (curvas de nivel con equidistancia de 0.5m) –en formato Shapefile y AutoCAD DXF-.
- e) Ortoimagen (con GSD=0.05m) –en formato GeoTIFF-.

Es evidente que el trazado de la delimitación de la dolina no es una labor sencilla, que debe tener en cuenta los cambios de pendiente a nivel local del terreno. Esto es especialmente complejo cuando se plantea la cartografía de dolinas en superficies inclinadas, tal y como se indica en el trabajo de Bondesan et al. (1992)<sup>12</sup> donde se plantea la necesidad de establecer una reconstrucción de la forma de la ladera antes de estar sometida al propio proceso de disolución que ha dado lugar a la dolina (fig. 22).



**Figura 22.** Trazado de dolinas sobre terreno inclinado (Bondesan et al., 1992)<sup>11</sup>.

Es evidente, que esto no es siempre sencillo, especialmente en casos de dolinas que se han producido en varias etapas tal y como se han detectado en diversos casos en este estudio. En las figuras 23 y 24 se muestran dos ejemplos de cartografiado de dolinas,

<sup>12</sup> Bondesan, A.; Meneghel, M. y Sauro, U. (1992). *Morphometric Analysis of Dolines*. Int.I. Speleol. 21 (1-4), 1-55.



Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón



atendiendo al modelo digital de elevaciones, algo que ha sido indispensable como consecuencia de la fuerte presencia de vegetación en la zona.

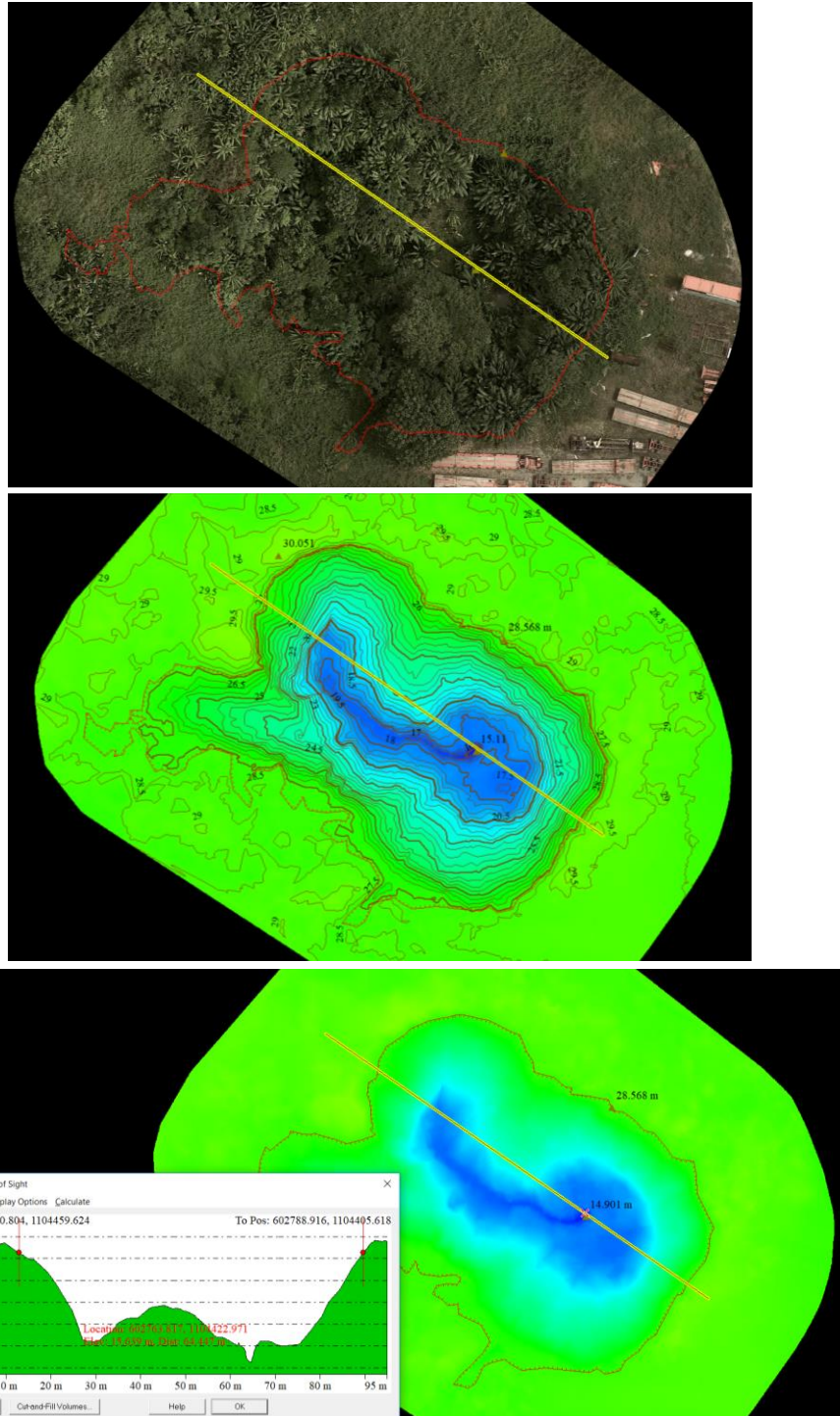
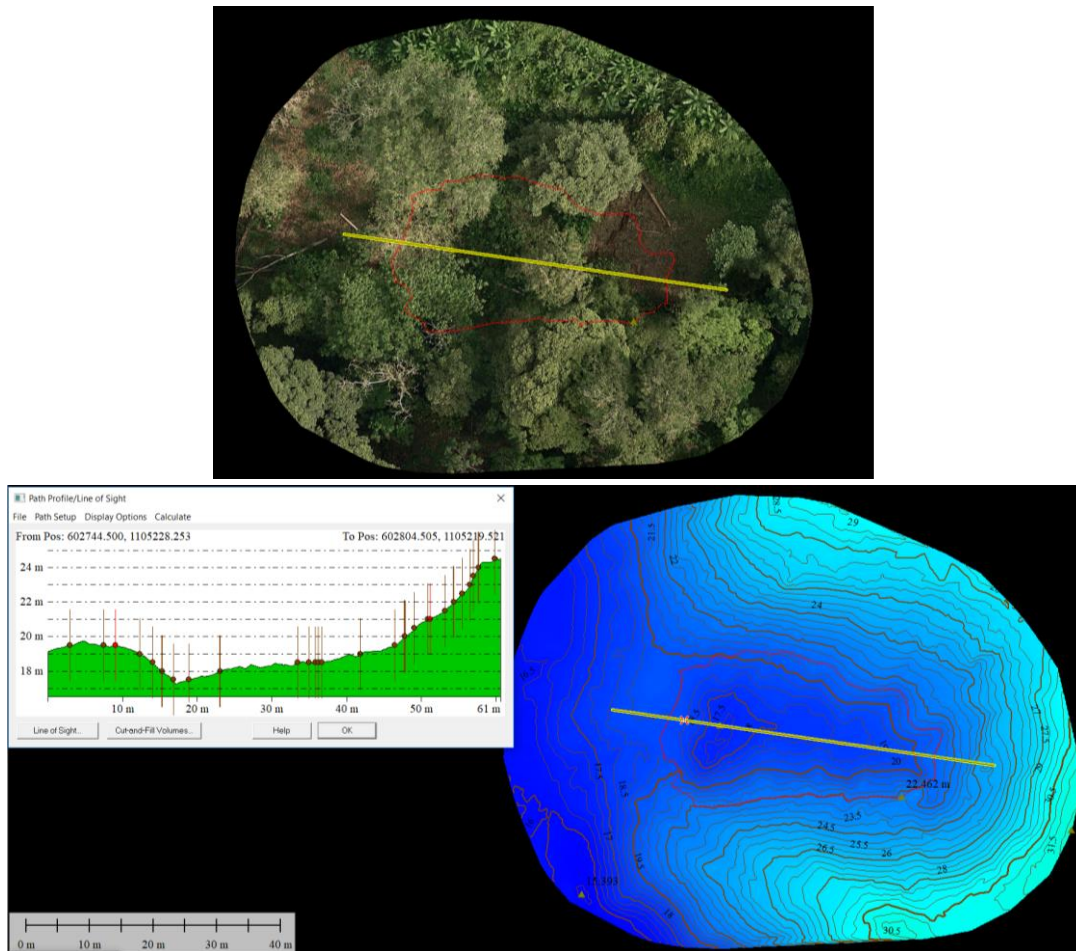


Figura 23. Delimitación de contorno de la dolina (superficie llana).



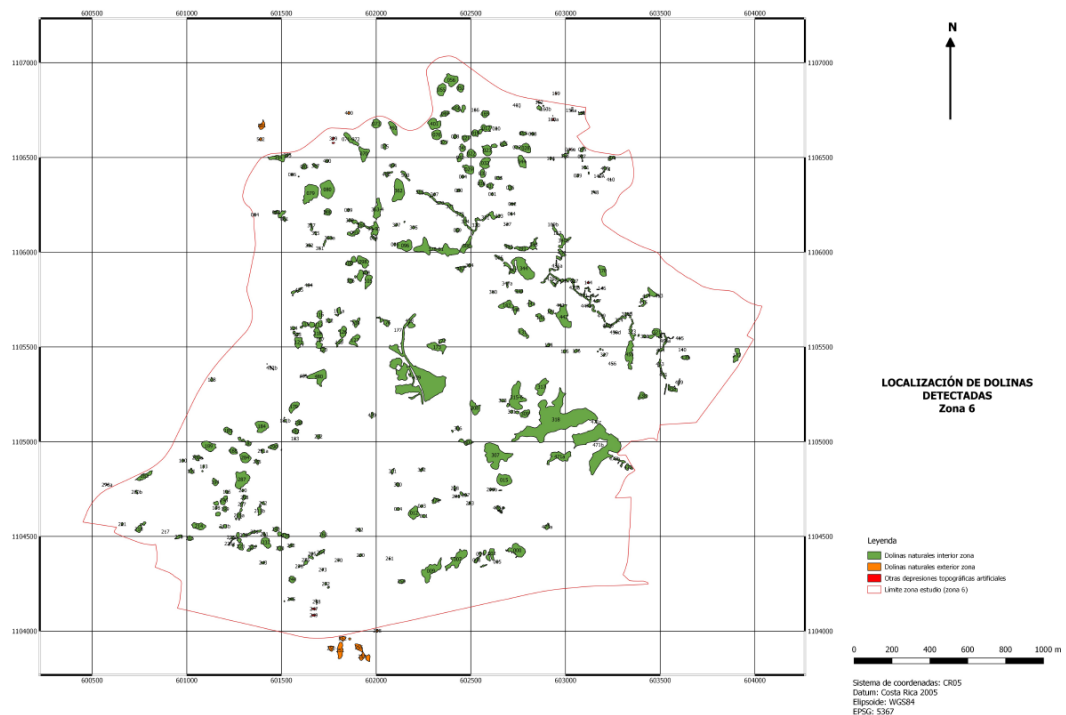
**Figura 24.** Determinación de una dolina (terreno inclinado).

La revisión manual de todas las zonas de interés extraídas ha dado lugar a la extracción de un total de 467 depresiones sobre el terreno, descartando los falsos positivos –elementos que no son verdaderas depresiones–. Al respecto hay que indicar que dentro de las depresiones detectadas hay algunas que en realidad se trata de estructuras artificiales en el terreno como, por ejemplo, balsas, piscinas o estanques (figura 25).

Las depresiones identificadas como elementos de origen artificial son las siguientes: 046a, 046b, 140, 144, 160a, 160b, 183, 247, 249, 289, 398, 399, 402a, 402b y 403. Es decir, un total de 15 depresiones con origen atribuido como antrópico, siendo el número de dolinas naturales igual a 452. Asimismo, hay que considerar que algunas están fuera de los propios límites de la zona de estudio (14, códigos: 159, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 258, 278a, 278b, 400, 501 y 502), aunque se han incorporado como referencia para futuros estudios de zonas limítrofes, resultando un total de dolinas igual a 438. La distribución espacial de las diferentes depresiones localizadas se muestra en la figura 26.



**Figura 25.** Ejemplo de depresiones localizadas en la fase automática (160a y 160b), pero que se corresponde a una estructura artificial (piscinas).



**Figura 26.** Localización de las dolinas detectadas tras la supervisión manual. A este informe se adjunta dicho mapa en formato DINA2, con una escala de 1:10000 de representación. En color verde las dolinas dentro de la zona consideradas estructuras naturales, en color naranja las dolinas naturales ubicadas fuera de la zona de estudio y, en color rojo, las estructuras que dan lugar a depresiones pero tienen un origen antrópico.



Para cada una de estos límites detectados, y empleando la información correspondiente al modelo digital del terreno de la zona, se han proporcionado información altimétrica a los límites establecidos para cada una de las dolinas.

La información inicial se ha organizado en dos archivos SHP, uno relativo con la información de los polígonos y otra correspondiente a la información de las entidades puntuales, que hacen referencia a los puntos de cota máxima y cota mínima existentes en cada dolina. La descripción de los correspondientes campos que incluyen dichos archivos se detalla en las tablas 6 y 7.

**Tabla 6.** Atributos correspondientes al fichero de entidades poligonales.

Campo	Tipo	Descripción
CAPA	String	Denominación completa de la dolina. Denominación de la entidad (Dolina+<NOMBRE>). Ej.: Dolina000999.
TIPO	String	Tipo de la entidad (dolina)
NOMBRE	String	ID de la dolina. El nombre viene definido por 3 números a los que se añade una letra en el caso de existen varias estructuras en la misma zona preliminar detectada.
Z_MIN	Real(4,2)	Coordenada Z mínima (expresada en m)
Z_MAX	Real(4,2)	Coordenada Z máxima (expresada en m)
X_MAX	Real(9,3)	Coordenada X máxima (expresada en m)
Y_MAX	Real(10,3)	Coordenada Y máxima (expresada en m)
Z_MEDIA	Real(5,3)	Media de las cotas registradas en el interior del polígono que define la dolina. Expresada en metros.
Z_MODAL	Real(5,3)	Moda de las cotas registradas en el interior del polígono que define la dolina. Expresada en metros.
Z_SD	Real(10,9)	Desviación típica de las cotas registradas en el interior del polígono que define la dolina. Expresada en metros.
PROFUND	Real(4,2)	Diferencia entre la cota mayor y menor registradas en la dolina. Expresada en m.
PERIMETRO	Real(12,2)	Longitud del perímetro del polígono que define la dolina. Expresada en m.
AREA2D	Real(10,2)	Área planimétrica del polígono que define la dolina. Expresada en m <sup>2</sup> .
AREA3D	Real(9,7)	Área proyectada sobre la superficie del modelo digital del terreno dentro del polígono que define la dolina. Expresada en m <sup>2</sup> .
REL_AREAS	Real(10,8)	Relación entre la superficie 2D y la superficie 3D que pone de manifiesto la irregularidad de la dolina y su morfología. Adimensional.
ELONGACION	Real(10,4)	Se representa mediante el cociente iso-perimétrico que viene definido por la relación entre $4*\pi*\text{Área}/\text{Perímetro}^2$



		(también se denomina como método de Polsby-Popper <sup>13</sup> y circularidad de Cox <sup>14</sup> y equivale al cuadrado del índice de compactación de Richardson <sup>15</sup> ). Cuando más se aproxime la forma del polígono a un círculo, el valor tenderá a 1, en caso de polígonos muy elongados tenderá a 0. Adimensional.
VOLUMEN	Real(10,9)	Volumen de la dolina expresada en m <sup>3</sup> , calculada a partir del modelo digital de elevaciones.
ASPECTO	String	Orientación media de la dolina, expresada como punto cardinal y en grados con respecto al N.
PENDMED_G	Real(4,2)	Pendiente media de la pendiente de la dolina. Expresada en grados.
PENDMED_P	Real(5,2)	Pendiente media de la pendiente de la dolina. Expresada en %.
PENDSD_G	Real(4,2)	Desviación típica de la pendiente de la dolina. Expresada en grados.
PENDSD_P	Real(4,2)	Desviación típica de la pendiente de la dolina. Expresada en %.
PENDQ1_G	Real(4,2)	Primer cuartil de la pendiente de la dolina. Expresada en grados.
PENDQ1_P	Real(4,2)	Primer cuartil de la pendiente de la dolina. Expresada en %.
PENDQ2_G	Real(4,2)	Mediana de la pendiente de la dolina. Expresada en grados.
PENDQ2_P	Real(4,2)	Mediana de la pendiente de la dolina. Expresada en %.
PENDQ3_G	Real(4,2)	Tercer cuartil de la pendiente de la dolina. Expresada en grados.
PENDQ3_P	Real(4,2)	Tercer cuartil de la pendiente de la dolina. Expresada en %.
PENDMAX_G	Real(4,2)	Pendiente máxima de la dolina. Expresada en grados.
PENDMAX_P	Real(4,2)	Pendiente máxima de la dolina. Expresada en %.
DIDE	Real(8,7)	Diámetro Ideal. Diámetro del círculo con área equivalente a la superficie de la dolina.
CEQU	Real(8,7)	Circunferencia equivalente. Circunferencia de un círculo con área equivalente a la superficie planimétrica de la dolina.
ISIN	Real(11,10)	Índice de sinuosidad. Relación entre el perímetro planimétrico de la dolina y la circunferencia de un círculo con área equivalente al área planimétrica de la dolina. Esta relación, que nunca es menor que 1, es un índice que pone de manifiesto la irregularidad de los límites de la dolina, así como su propia elongación.
HVOL	Real(10,9)	Profundidad volumétrica. Relación entre el volumen de la dolina y la superficie planimétrica de la misma. Expresado en m.

<sup>13</sup> Li, W.; Goodchild, M.F., and Church, R. (2013). An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(6), 1227-1250.

<sup>14</sup> Polsby, D.D., and Popper, R.D. (1991). The third criterion: compactness as a procedural safeguard against partisan gerrymandering. *Yale Law & Policy Review* 9(2), 301-353.

<sup>15</sup> Richardson, L.F. (1961). The problem of contiguity: an addendum to *Statistics of Deadly Quarrels*. *General Systems Yearbook*, 6, 139-187.



VDVP	Real(9,8)	Relación de volumen desarrollado. Es la relación entre el volumen de la dolina, y el volumen de un cono con una base equivalente al área planimétrica de la dolina y una altura equivalente a su profundidad máxima. Este parámetro que emplea como alternativa a las expresiones clásicas de clasificación morfológica, basadas en el aspecto (plato, cuenco, cónica y pozo) y a las basadas en la relación diámetro/altura que se ajustan mal en el caso de dolinas con morfologías de planta que tengan escasa similitud a un círculo. Este radio es aproximadamente 1 cuando la dolina tiene una morfología cónica, es menor de 1 cuando las pendientes de las dolinas son convexas y mayor de 1 cuando las pendientes de las dolinas son cóncavas.
VEGETACION	String	Presencia de vegetación en la dolina. Expresada en tres niveles: Sí, No, Parcial.
OBSERVAC	String	Otra información de interés sobre el entorno obtenida de la observación de la ortoimagen (por ejemplo, zona urbana, proximidad a vías de comunicación, carácter artificial, fuera de zona, etc.).
CLASE	Integer	Clase asignada a la depresión en función de lo indicado en el apartado 8.5 de este informe.

**Tabla 7.** Atributos correspondientes a las entidades puntuales.

Campo	Tipo	Descripción
TIPO_ENTID	String	Tipo de la entidad (dos valores posibles: Minimum Elevation Location, Maximum Elevation Location).
TIPO	String	Tipo del punto (Spot Elevation).
Z	String	Cota del punto considerado. Expresado en metros.
NOMBRE	String	ID de la dolina. El nombre viene definido por 3 números a los que se añade una letra en el caso de existen varias estructuras en la misma zona preliminar detectada.
MIN_PT_IDX	String	Identificador de los puntos de cota mínima (valor 0 cuando se trate de un punto de cota mínima, vacío en caso contrario)
MAX_PT_IDX	String	Identificador de los puntos de cota máxima (valor 0 cuando se trate de un punto de cota mínima, vacío en caso contrario)

Asimismo, y a nivel global se han calculado los indicadores globales, incluidos en la oferta como:

- Área total de la zona de estudio.
- Área de dolinas.
- Área dolinizada (%).
- Dolinas/km<sup>2</sup>.
- Distancia media teórica entre vecinos más próximos.
- Distancia media al vecino más próximo que indica el grado de aislamiento de los focos de dolinización. Da una idea del área de captación hidrológica de la dolina.



- R (índice de distribución espacial). Indica si las dolinas se distribuyen formando agregados o aleatoriamente.
- Factor de elongación de las dolinas (inicialmente considerado como  $L/W$ , y que finalmente ha sido expresado como el cociente iso-perimétrico, al tratarse de un indicador más robusto.
- $L_{ar}$ (km). Distancia media al vecino más próximo de igual rango.

Al respecto es importante indicar que se han proporcionado información de todos los parámetros indicados en la oferta, incluyendo tan sólo la supresión del índice de anchura de la dolina (frecuentemente de complicada definición práctica salvo en el caso de dolinas de forma ovalada) y el cambio del parámetro de elongación definido originalmente en la oferta como la relación entre longitud y anchura de la dolina, optando por el cociente iso-perimétrico que se considera un indicador más robusto.

Por otro lado, hay que hacer referencia al cálculo de un elevado número de indicadores adicionales que se consideran de interés, tanto para caracterizar la pendiente topográfica en el interior de la dolina, como para establecer coeficientes de forma, volúmenes, sinuosidades, etc. intentando proporcionar una visión más completa de las mismas.

## 8.5.- Análisis de resultados. Caracterización del área de dolinas.

### 8.5.1.- Análisis de resultados

Hay que tener en cuenta que el estudio morfométrico de las dolinas es prácticamente tan antiguo como el propio estudio de las mismas, así, los primeros estudios al respecto se deben a Cvijic (1893)<sup>16</sup>, que inicia una línea continuada por Lozinski (1907)<sup>17</sup>. Desde los primeros trabajos siempre se ha intentado establecer una relación entre los parámetros morfológicos de las dolinas y sus elementos genéticos, como los planteados en los propios trabajos de Coleman y Balchin (1959)<sup>18</sup>, que incorporan algunos parámetros que aún se utilizan como la propia relación profundidad diámetro.

Williams (1966)<sup>19</sup> publica el primer trabajo de morfometría en karst con información derivada de mapas a escala media y fotografías aéreas. Su trabajo iba orientado al desarrollo

---

<sup>16</sup> Cvijic, J. (1893). Der Karstphänomen. Geographische Abhandlungen, 5, 217-329.

<sup>17</sup> Lozinski, W. von (1907). Die Karsterscheinungen in Galazisch-Podohon, J. Geol. Reichsanst., Wien, 683-726.

<sup>18</sup> Coleman, A.M.; Blanchin, W.G.Y. (1959). The origin and development of surface depressions in the Mendip Hills. Proceedings of the Geologists Association, 70, 291-309.

<sup>19</sup> Williams, P.W. (1966). Morphometric analysis of temperate karst landforms, Irish Speleology, 1, 23-31.



de un método de análisis morfométrico de formas kársticas en las zonas templadas de las Islas Británicas, adoptando las técnicas que se venían empleando para el análisis morfométrico fluvial.

Los estudios se continúan a lo largo del siglo XX recibiendo un importante impulso a partir del uso generalizado de los modelos digitales de elevaciones como elemento fundamental para la representación del terreno. Así, por ejemplo, Day (1983)<sup>20</sup> realiza un estudio en Barbados en una zona de 124,5 km<sup>2</sup>. Uno de los elementos básicos de su estudio fue considerar la población de dolinas existente de acuerdo con una malla de 1km<sup>2</sup>. En cada celda de su malla estableció una medida de la densidad de dolinas, y 7 parámetros adicionales: 1) relieve local, medido como la diferencia de cota máxima y mínima dentro de la celda; 2) gradiente de pendiente local; 3) densidad de valles, como una medida del índice de permeabilidad (a mayor número de valles menor número de dolinas y viceversa); 4) orden del valle, calculada de acuerdo con el método de Strahler dentro de cada celda; 5) la distancia al valle más próximo, expresado como la distancia desde el centro de la celda al valle más próximo; 6) profundidad edáfica y 7) profundidad piezométrica. Asimismo, para cada dolina realizó medidas de longitud, anchura, dirección del diámetro máximo.

Es evidente, por tanto, el interés del análisis estadístico morfométrico de las dolinas que además ahora se está viendo enriquecido por la disponibilidad de modelos digitales de elevaciones de mayor resolución, o por el uso de técnicas como el LiDAR que permite la captura de información incluso en áreas de fuerte vegetación o bosque. No obstante, es importante tener en cuenta que, en este tipo de estudios, sólo estamos teniendo uno de los muchos factores que es necesario tener en cuenta, la forma. Y que la forma, sin duda, viene influenciada por otros muchos factores que será necesario considerar y analizar, para poder tener una explicación correcta de los fenómenos. Sin duda, la información morfométrica constituye un buen punto de partida (especialmente cuanto como en este caso, incluye la detección de las formas en zonas de difícil localización como consecuencia de la fuerte presencia de vegetación arbórea), pero nunca debe ser el único punto considerado.

Así, cualquier tipo de morfologías debe ser considerado dentro de un contexto geológico, geomorfológico, climático, edafológico y botánico del área kárstica. Aunque también es cierto que algunos parámetros de importancia medioambiental suelen mostrar correlaciones fuertes con determinados parámetros morfológicos. No obstante, la complejidad de este tipo de estructuras debe trasladar una llamada a la prudencia, ya que dentro de una misma zona podemos encontrar diferentes periodos e incluso, tal y como sucede en este caso, diversas dolinas interconectadas dentro de depresiones tipo uvalas, que

---

<sup>20</sup> Day, M.J. (1984). Predicting the location of surface collapse within karst depression: a Jamaican example. En: Beck, B.F. (ed.), Sinkholes: their geology, engineering and environmental impact, Balkema, Rotterdam, 147-151,



apuntan a que las mismas puedan haber sido fruto de diferentes periodos. En este sentido, hay que tener en cuenta que las formas que observamos hoy en día, no son sino una foto fija de la actualidad, de una larga y compleja historia geológica, que es necesario interpretar.

En este sentido no se considera adecuado llevar a cabo clasificaciones estadísticas a partir de los datos obtenidos, tipo análisis cluster o multivariante, ya que no debemos olvidar que los perímetros trazados de las dolinas son sólo el fruto de una interpretación sobre un modelo digital de elevaciones. Es, por ello, que se considera más adecuado el disponer de información que pueda apoyar otras conclusiones y otras fuentes de información (cuantitativa o cualitativa) de las que se pueda disponer en la zona.

Al respecto se han elaborado diversos mapas (que se adjuntan a este informe en formato A2 y escala 1:10.000) y que aquí se representan ajustados en escala simplemente a modo de referencia de las indicaciones que se han podido deducir de los mismos.

#### **8.5.2.- Estadísticos globales del área de dolinas.**

Dentro de este apartado se hace referencia a los parámetros calculados a nivel global dentro de toda la zona de estudio, lógicamente en estos cálculos sólo se tienen en cuenta las depresiones consideradas como naturales y ubicadas dentro de la zona de estudio.

La superficie completa de la zona considerada (zona 6) es de 6.360.299,98 m<sup>2</sup> de los cuales un total de 414.564,88 m<sup>2</sup> se consideran afectados por dolinas, lo que representa el 6,52%. No obstante, hay que tener en cuenta que este cálculo está afectado por presencia de edificaciones en el área de estudio, así como naves industriales y vías de comunicación que han afectado a la morfología natural de las estructuras. El volumen total de las superficies detectadas se estima en 828.670,44m<sup>3</sup>. No obstante, y tal como se muestra en la figura 27 la distribución parece no ser homogénea en toda el área de estudio, para verificar esta suposición se compara la distribución real entre las entidades detectadas con la que tendría si la distribución fuera homogénea. Para llevar a cabo este cálculo se puede considerar las distancias entre las entidades, entre los centroides o bien entre cualquier otro punto que se considere como representativo de las mismas. Los problemas derivados de la determinación con precisión de los límites de las diferentes dolinas extraídas, así como el hecho de que teniendo en cuenta su morfología el centroide puede estar ubicado fuera del propio polígono, han llevado a aconsejar que el punto considerado como referencia sea el punto de menor cota –sumidero–. Estos puntos, han sido extraídos de la combinación entre los polígonos extraídos y los propios modelos digitales de elevaciones.

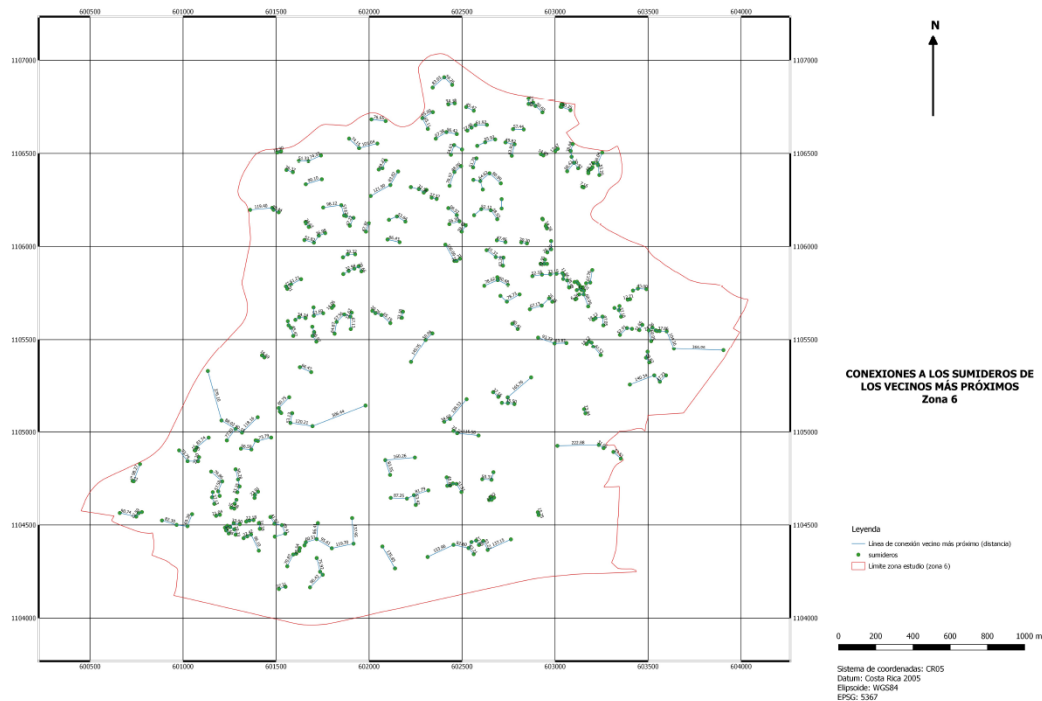


El método empleado ha sido el del vecino más próximo, y se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8.** Análisis de vecinos más próximos (puntos de referencia: puntos de cota mínima de todas las dolinas naturales detectadas dentro del área de estudio).

Distancia media observada	43.20m
Distancia media esperada	71.56m
Índice de vecino más próximo (R)	0.6037
Número de puntos	438
Z-Score	-15.8679

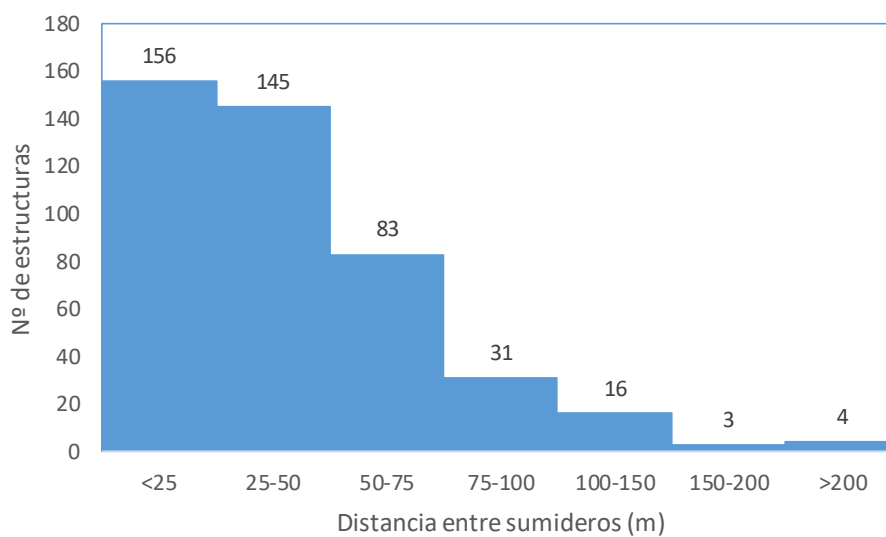
Como se puede comprobar la distancia media observada es considerablemente inferior a la esperada si todas las dolinas se distribuyeran homogéneamente en el área de estudio, dando lugar a un valor de índice de vecino más próximo de 0.6037. Este índice será igual a 1, para distribuciones homogéneas y de 0 para datos con fuertes agrupaciones. Por último, indicar que el valor normalizado de Z-Score es un valor muy pequeño (-15.8679), poniendo de manifiesto, que se puede considerar que la distribución de los puntos no sigue una distribución homogénea con más de un 99% de probabilidad. En la figura 27 se muestran las relaciones existentes entre las dolinas en función de su mayor proximidad.



**Figura 27.** Mapa de conexiones entre sumideros más próximos.



La distribución de distancias pone de manifiesto que más del 35% de las dolinas están situadas a menos de 25m del sumidero más cercano indicando una considerable agrupación, este porcentaje asciende a más del 68% cuando la distancia considerada es de 50m (figura 28). Es este sentido, y de acuerdo con los estadísticos básicos presentados en la tabla 9 se puede indicar como, el rango intercuartílico ( $Q_3-Q_1$ ) tiene una amplitud de 33.63m, estando comprendido entre 20.75m y 54.38m. Los datos presentan una distancia media de 43.20m y una desviación típica de 36.11m, especialmente influenciada por distancias grandes (4 casos con distancias superiores a 200m).

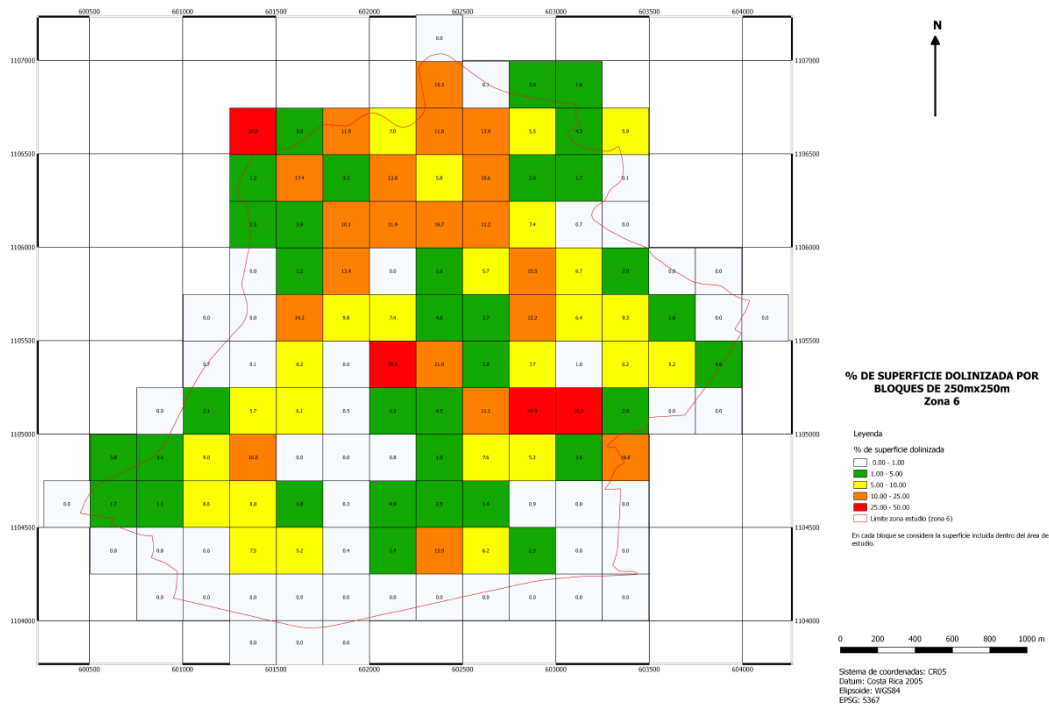


**Figura 28.** Distribución de distancias entre sumideros más próximos.

**Tabla 9.** Estadísticos básicos de distancias entre sumideros más próximos.

N.Datos	438	Mínimo	2.70
Media	43.20	C.Inferior (Q1)	20.75
Desv.típica	36.11	Mediana	34.38
Moda	26.59	C.Superior (Q3)	54.38
		Máximo	306.44

Por último, para analizar la distribución de las dolinas en la zona de estudio se ha procedido a su discretización en elementos con un tamaño de 250m x 250m, totalizando el % total de área afectada en cada caso. El mapa resultante se muestra en la figura 29 poniendo de manifiesto porcentajes máximos de casi el 50% (49.28%).



**Figura 29.** % de superficie dolinizada en bloques de 250mx250m. Valor representado porcentaje de superficie caracterizada como dolina frente a la superficie del bloque considerando los límites de la zona de estudio.

Como se puede observar en la figura anterior, la distribución no es homogénea pudiendo diferenciar de forma clara tres zonas bien diferenciadas, la primera es un zona alargada en la parte superior de la zona de estudio que con una dirección aproximada N110°E en la que abundan % de afectación superior al 5 (colores amarillos) y al 10 (color naranja); la segunda es una zona en el extremo SW de la zona en la que se presenta una distribución de algunos bloques con porcentajes en torno al 5-10% (amarillos) y así como, un bloque 10-25% naranja; y, por último, una zona en la parte SSE con un par de bloques con valores más elevados que el entorno. Asimismo, se puede observar la presencia de diversos bloques no afectados por dolinización.

### 8.5.3.- Análisis de resultados de parámetros individuales de las dolinas

La información recopilada para el estudio de la zona considerada ha sido muy importante, atendiendo a parámetros relacionados tanto con la morfología del terreno en el que se ubica la dolina como a las propias características de forma de la misma. En este apartado se van a intentar poner de manifiesto alguna información que se considera básica al respecto, aunque lógicamente toda la información está incluida en las propias bases de datos suministradas junto con este informe.

Quizá el primer parámetro considerado en cualquier estudio de caracterización de las dolinas hace referencia, a la superficie de los elementos detectados y la distribución espacial de la misma. En cuanto a los valores de superficie global ya se han señalado en el apartado anterior, y en este momento el análisis será en plantear cuál es el tamaño de las dolinas y si se pueden apreciar algún tipo de comportamiento diferencial dentro de la zona de estudio. En cuanto al cálculo de las superficies, se debe hacer mención que se ha realizado el cálculo tanto de la superficie planimétrica (Area2D), es decir, la superficie derivada de la proyección del polígono que delimita la dolina en un plano XY, como el cálculo de la superficie proyectada sobre la superficie del modelo digital de elevaciones (Area3D).

En la figura 30 se muestra el mapa de dolinas indicando su superficie planimétrica (Area2D) recibiendo diferentes colores en función de sus tamaños. Asimismo, en la tabla 10 se adjunta los estadísticos básicos de dichas superficies.

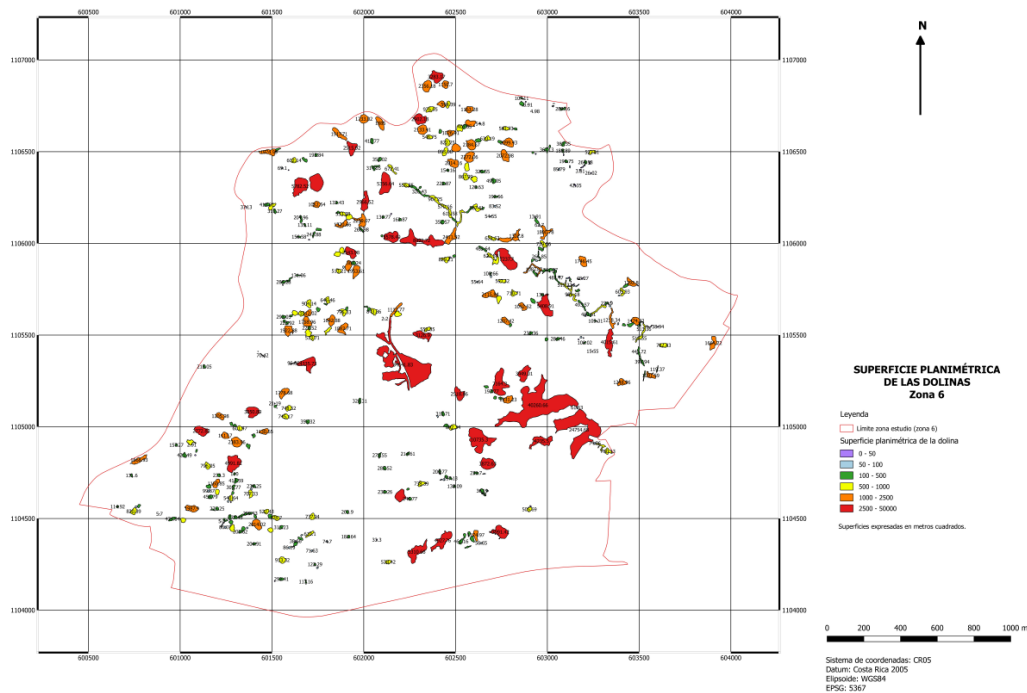


Figura 30. Superficie planimétrica de las dolinas. Valores en m<sup>2</sup>.

Tabla 10. Estadísticos básicos de distancias entre sumideros más próximos.

N.Datos	438	Mínimo	1.02
Media	946.50	C.Inferior (Q1)	97.27
Desv.típica	2990.18	Mediana	292.73
		C.Superior (Q3)	791.87
		Máximo	40260.66



En la figura anterior se puede observar como las dolinas de mayor tamaño se ubican en la zona central del área de estudio, mientras que en la zona N se ubican pequeñas agrupaciones de dolinas (como se comentará más adelante con una morfología marcadamente circular, es decir, factores de elongación en torno a 1), al igual que sucede en la zona W y en la zona SW. Por otro lado, se encuentran un elevado número de pequeñas dolinas ubicadas en torno a la alineación anteriormente comentada de dirección N110°E, muy retocadas en su orientación y morfología con juegos de fracturas perpendiculares (marcadamente elongadas al distribuirse en torno a un cauce, ¿posible fractura?).

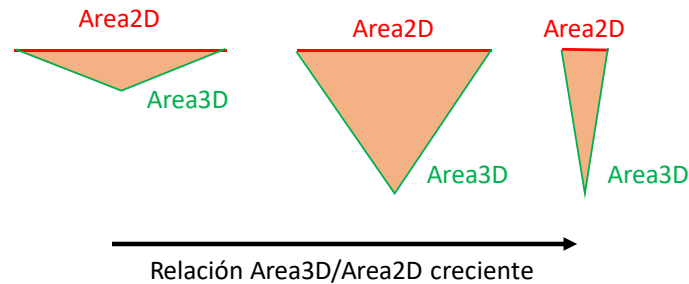
Por otro lado, la relación entre el área 2D y 3D, es uno de los parámetros que permitan definir la propia morfología de la dolina y la irregularidad de su fondo. Tradicionalmente ha sido empleada una clasificación morfológica propuesta por Cvijic' (1893)<sup>21</sup>, que establece 4 tipos de morfologías en función de la relación existente entre el diámetro (D) y la profundidad (H) de las dolinas, planteando una denominación de “plato”, “cuenco”, “embudo” y “pozo” (tabla 11).

**Tabla 11.** Clasificación de morfología de dolinas (Cvijic', 1893).

Relación D/H	Objetos similares	Formas geométricas
$D/H > 5$	Plato	Tronco de cono
$5 > D/H > 2$	Cuenco	Semiesfera
$2 > D/H > 1,5$	Embudo	Cono
$1,5 > D/H$	Pozo	Cilindro

El problema de aplicación de esta metodología es que se basa en dos parámetros que, si bien pueden ser determinados, es evidente que están sometidos a una cierta subjetividad, en especial, el diámetro cuando las morfologías de las dolinas no se asemejan a una forma circular clásica. En morfologías marcadamente irregulares, el parámetro de diámetro deja de ser representativo de la propia estructura, siendo su cálculo complejo. Es, por ello, que se ha planteado una alternativa susceptible de ser aplicada a partir de la información detallada disponible no sólo de tipo planimétrico y altimétrico no sólo de la propia dolina sino de su morfología interior. En este sentido, se puede llegar a la conclusión que la relación entre el área 2D y 3D se puede considerar como un indicador de forma, ya que a mayor diferencia entre ambas superficies –y considerando que la morfología interna en cuanto a la irregularidad en el interior de la dolina no es significativa- se puede concluir en un menor índice D/H, o lo que morfológicamente implicaría una dolina más abrupta (tipo pozo o embudo). El esquema conceptual básico se muestra en la figura 31.

<sup>21</sup> CVIJIC' J. (1893) - Der Karstphänomen. Geographische Abhandlungen, 5, 217-329.



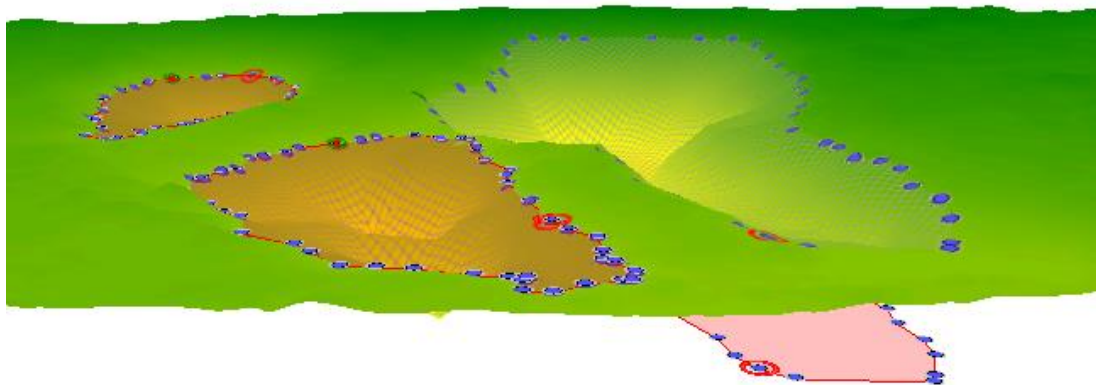
**Figura 31.** Relación  $Area3D/Area2D$  como parámetro indicador de la morfología de la dolina.

Teniendo en cuenta las relaciones entre las áreas 2D y 3D, y la propia clasificación de Cvijic' (1893), se puede establecer la siguiente correspondencia (tabla 12).

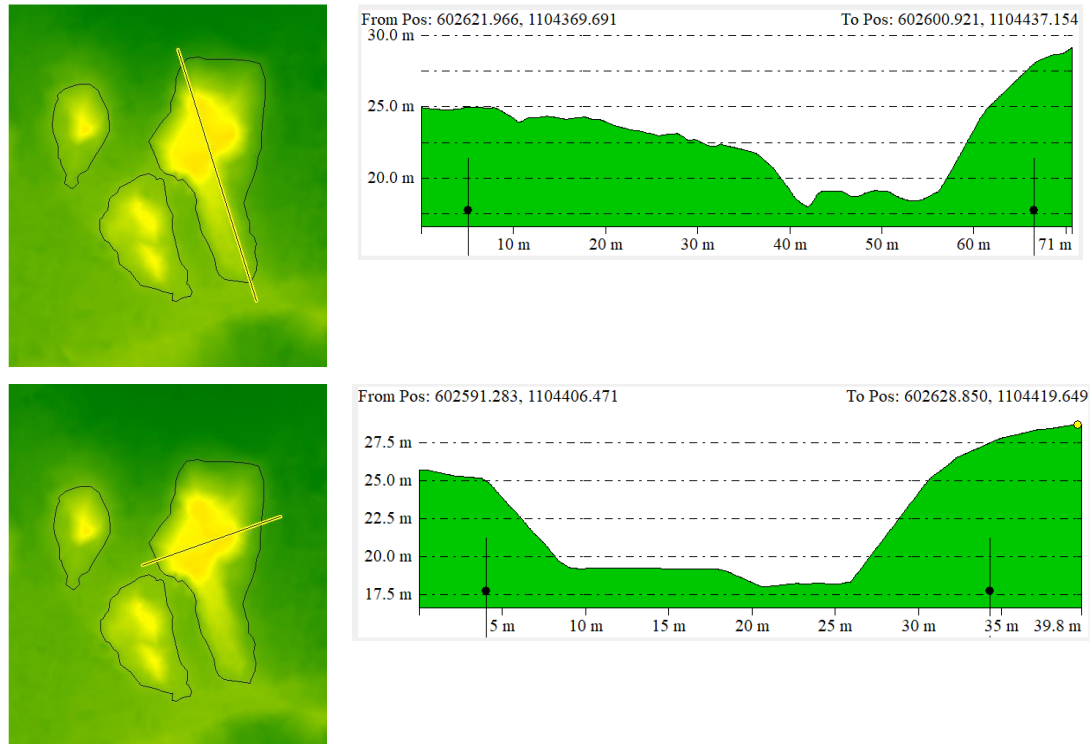
**Tabla 12.** Clasificación propuesta de morfología de las dolinas en función de la relación de áreas 2D y 3D.

Tipo	Relación $Area3D/2D$	Ángulo aproximado de apertura de la dolina ( $^{\circ}$ )
Plato	1-1.25	$>130^{\circ}$
Cuenco	1.25-2	$100^{\circ}$ - $130^{\circ}$
Embudo	2-2.5	$60^{\circ}$ - $100^{\circ}$
Pozo	$>2.5$	$<60^{\circ}$

En las figuras 32 y 33 se muestra un ejemplo de una dolina en cuenco en el que puede observar la relación entre el área 3D y el área 2D proyectada en el plano.



**Figura 32.** Relaciones entre  $Area3D$  y  $Area2D$  en una dolina en cuenco (Dolina000002).



**Figura 33.** Ejemplo de dolina en cuenca (Dolina000002). Perfil longitudinal y transversal.

En la figura 34 se muestra el resultado de la aplicación de dicho parámetro al área de estudio. Como se puede observar en la misma, dentro de la zona existen básicamente dos tipos de dolinas, las dolinas en plato (más abundantes y representadas en color naranja en el mapa) y las dolinas en cuenca (representadas en color verde).

Estos resultados son coherentes con los valores calculados de media dentro de la propia dolina. Las informaciones de pendientes se expresan tanto en grados sexagesimales como en tantos por ciento, y se han calculado para cada una de las dolinas, el primer cuartil, la mediana, el tercer cuartil, la pendiente máxima y la pendiente media y la desviación típica de la pendiente. Hay que tener en cuenta que como una primera aproximación el ángulo de apertura de la dolina será aproximadamente equivalente a 2 veces la propia pendiente (considerando que tiene diferentes orientaciones a uno y otro lado de las vertientes). Las estadísticas de las pendientes medias de las dolinas se muestran en la tabla 13, mientras que en la figura 35 se muestra el mapa correspondiente, pudiéndose observar la correspondencia con el correspondiente a las relaciones entre áreas.

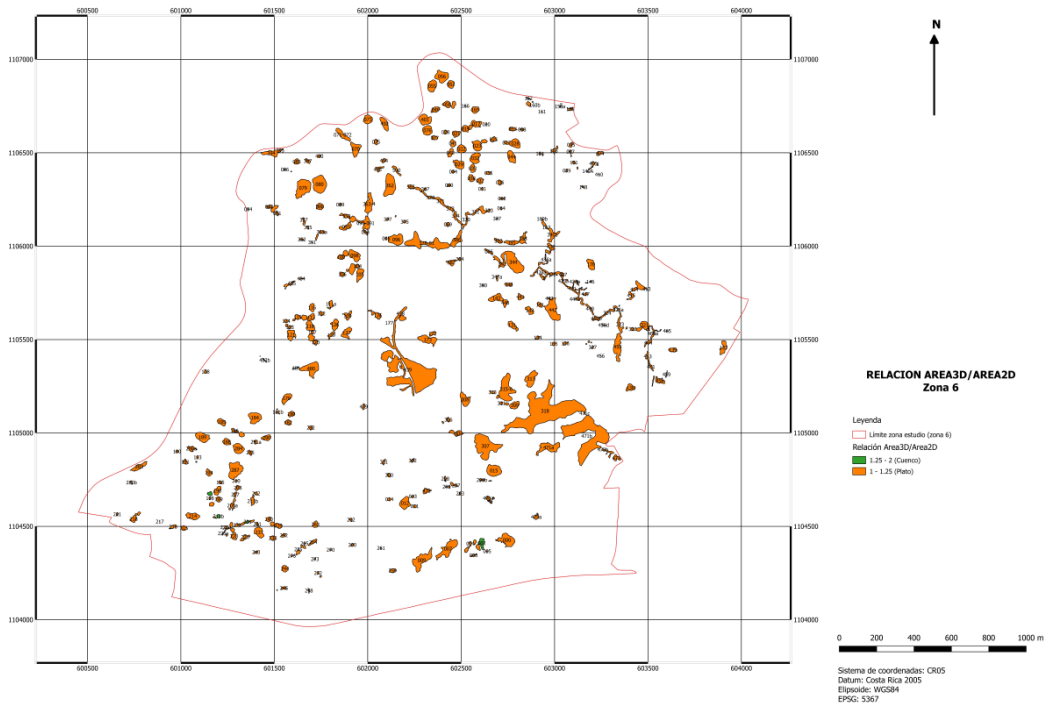


Figura 34. Mapa de relación AREA3D/AREA2D. Clasificación morfológica de dolinas.

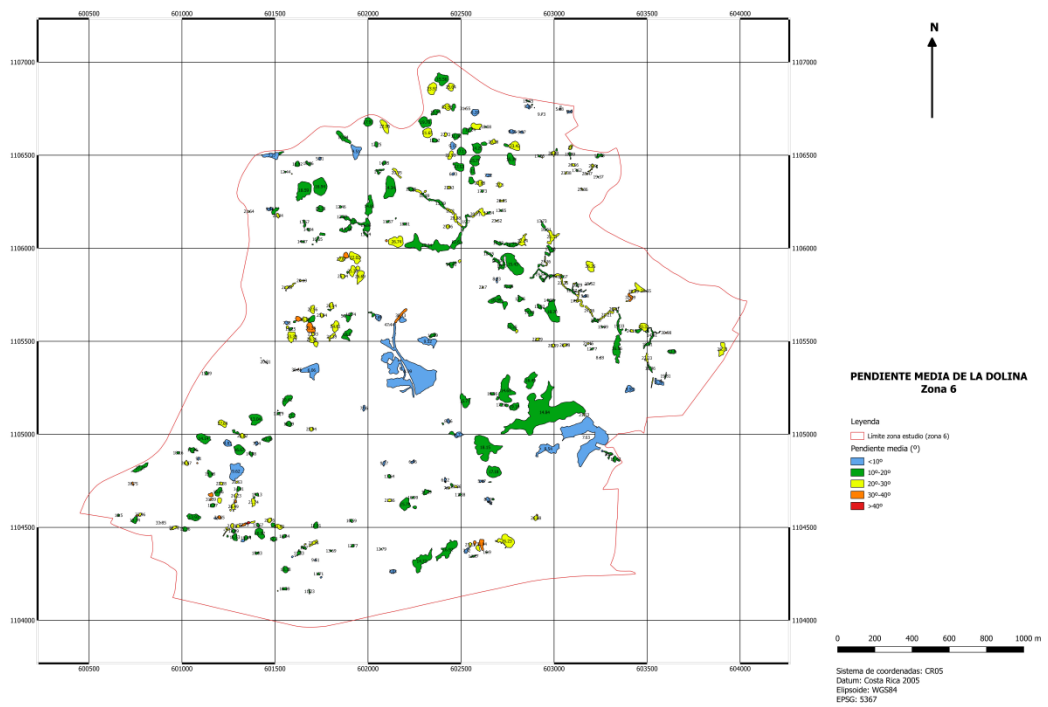


Figura 35. Pendiente media de las dolinas expresadas en grados.



**Tabla 13.** Estadísticos básicos de pendientes medias en dolinas expresadas en grados.

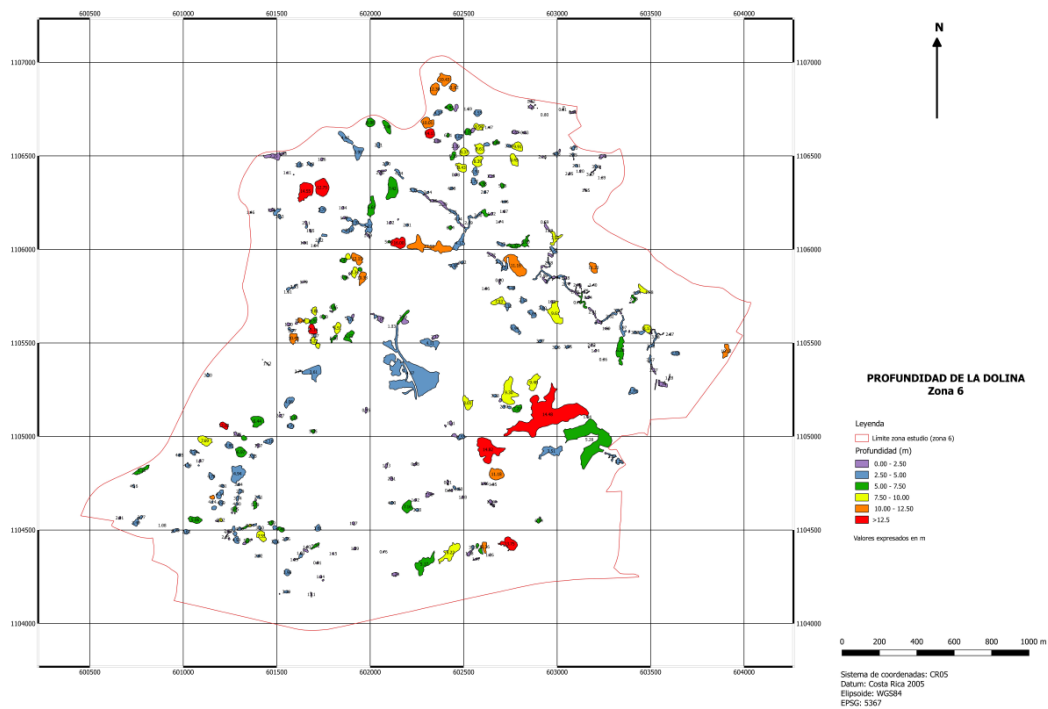
N.Datos	438	Mínimo	5.32
Media	18.03º	C.Inferior (Q1)	12.78
Desv.típica	7.13	Mediana	17.27
		C.Superior (Q3)	21.91
		Máximo	51.00

Dos parámetros muy importantes a tener en cuenta para analizar el propio desarrollo de las dolinas, son en primer lugar, la profundidad y, en segundo lugar, el propio volumen de las dolinas. Ambos parámetros han sido obtenidos a partir de los modelos digitales empleados para la extracción de las propias dolinas. Junto con estos parámetros se han calculado otros dos parámetros de interés, como son la profundidad volumétrica (relación entre el volumen de la dolina y la superficie planimétrica de la misma) y la relación de volumen desarrollado (relación entre el volumen de la dolina y el volumen de un cono con base equivalente al área planimétrica de la dolina y una altura equivalente a su profundidad máxima). Esta relación de volumen desarrollado también es una alternativa a las expresiones clásicas de clasificación morfológica, basadas en el aspecto (plato, cuenco, cónica y pozo) y a las basadas en la relación diámetro/altura que se ajustan mal en el caso de dolinas con morfologías de planta que tengan escasa similitud a un círculo. Este radio es aproximadamente 1 cuando la dolina tiene una morfología cónica, es menor de 1 cuando las pendientes de las dolinas son convexas y mayor de 1 cuando las pendientes de las dolinas son cóncavas.

La profundidad ha sido calculada a partir de las cotas registradas a partir del modelo digital del terreno en el polígono que delimita la dolina, como la diferencia entre la cota máxima y la cota mínima. La valoración inicial en cuanto a la profundidad lleva a indicar que ésta es moderada, así se registra una profundidad media de 3m (con una desviación típica de 3m) y el 75% de las dolinas tiene una profundidad interior a 5m (valor de cuartil superior de 4.78). Estos valores son lógicos teniendo en cuenta las tipologías de dolinas en plano o en cubeta o cuenco que se registran en la zona. No obstante, es necesario tener en cuenta que el desarrollo máximo alcanza los 16m, y que existen un total de 24 dolinas con una profundidad igual o superior a 10m. Las profundidades detectadas en las dolinas presentes en el área de estudio (y como idea preliminar que debería ser contrastada en los correspondientes estudios de campo) podrían corresponderse con dolinas por disolución, de acuerdo con el trabajo publicado por Mihevc (1998)<sup>22</sup>, puesto que otro tipo de dolinas, por ejemplo, colapso suelen implicar mayores profundidades.

<sup>22</sup> Mihevc, A. (1998). Dolines, their morphology and origin. Case Study: Dolines from Kras, West Slovenia (The Skocjan Karst). 4<sup>th</sup> International Conference on Geomorphology, Italy 1997, Karst Geomorphology, Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat. III, T. 4, 69-74.

La distribución de estas dolinas de gran profundidad se distribuye en las tres zonas consideradas dentro del campo de dolinas, con una considerable presencia en el sector noroccidental de la zona de estudio en donde están presentes un total de 4 dolinas con una profundidad superior a 12.5m. El mapa de profundidades se muestra en la figura 36, mientras que los estadísticos básicos correspondientes se presentan en la tabla 14.



**Figura 36.** Mapa de profundidades de las dolinas. Valores expresados en metros.

**Tabla 14.** Estadísticos básicos de profundidad de las dolinas expresadas en metros.

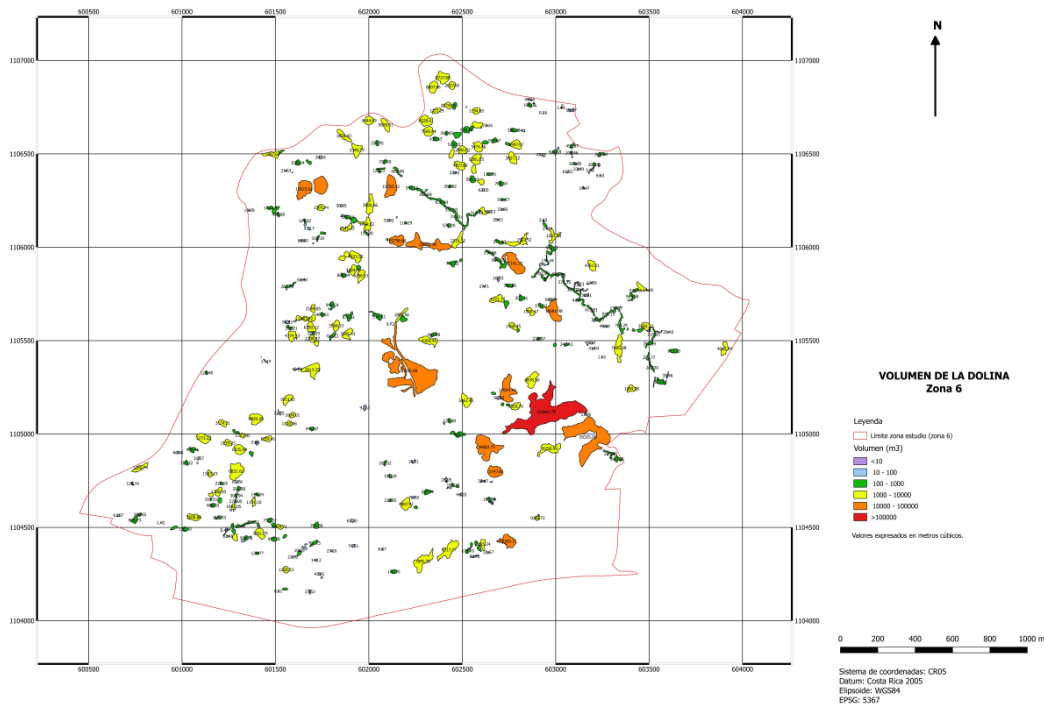
N.Datos	438	Mínimo	0.11
Media	3.70	C.Inferior (Q1)	1.51
Desv.típica	3.00	Mediana	2.79
		C.Superior (Q3)	4.78
		Máximo	16.00

El volumen también es un elemento de interés en el análisis de las dolinas, si bien tradicionalmente su empleo era complicado al requerir derivar cálculos de volúmenes a partir de información como, por ejemplo, los curvados, etc. No obstante, la incorporación de los modelos digitales de elevaciones lleva a que este parámetro sea cada vez más considerado.



De esta forma, y a partir del modelo digital del terreno empleado se ha obtenido el volumen de cada una de las dolinas.

En la figura 37 se muestra el mapa correspondiente de volúmenes y en la tabla 15 se presentan los estadísticos básicos de dicho parámetro. Tal y como se ha comentado con anterioridad, el volumen total de las dolinas de la zona se puede estimar en 828670.44 m<sup>3</sup>. El volumen medio de las dolinas es igual a 1891.94m<sup>3</sup>, si bien hay que tener en cuenta que dicho valor se puede considerar como poco representativo, ya que la desviación típica es muy elevada 8722.72m<sup>3</sup>. De esta forma, si se analizan los estadísticos de dispersión derivados de la serie ordenada (valores mínimos, máximos y cuartiles), se puede observar la gran diferencia existente entre la media (1891.94m<sup>3</sup>) y la mediana (221.56m<sup>3</sup>), el valor de la media está muy influenciado por la presencia de las grandes dolinas existentes en la zona, que se ubican en la zona central de la zona de estudio. Pero un análisis más global indica que el 50% tienen un volumen inferior a 221.56m<sup>3</sup>, y que el 25% tiene un volumen inferior a 33.25m<sup>3</sup>. La existencia de un elevado número de dolinas con un volumen pequeño (comparativamente hablando, aunque hay que tener en cuenta que dolinas con más de 25m<sup>3</sup> ya tienen un fuerte impacto ambiental en la zona, especialmente si las mismas no están protegidas frente a vertido de residuos y, especialmente si están conectadas a redes de flujo subterráneo que conduzcan a puntos de abastecimiento de poblaciones).



**Figura 37.** Mapa de volúmenes estimados de las dolinas detectadas. Valores expresados en metros cúbicos.



**Tabla 15.** Estadísticos básicos de volumen de las dolinas expresadas en metros cúbicos.

N.Datos	438	Mínimo	0.04
Media	1891.94	C.Inferior (Q1)	33.25
Desv.típica	8722.72	Mediana	221.56
		C.Superior (Q3)	926.14
		Máximo	159681.7

En cuanto a la profundidad volumétrica se puede indicar que el cálculo de dicho parámetro está muy influenciado por la propia morfología de las dolinas existentes en el área, muchas de las cuales tienen morfologías muy elongadas y, por tanto, alejadas de lo que se podría considerar como una morfología clásica circular u ovalada, que ajuste sencillo entre el área de la dolina y el área de un círculo equivalente a objeto de a su vez calcular el volumen del cono que se emplea para este parámetro. Por otro lado, la morfología de dolinas en plato o en cuenco, también lleva a ciertos desajustes en las dolinas consideradas. Los valores de profundidad volumétrica registran valores medios en torno a 1m -0.97m- (frente a la profundidad real calculada de 3m), y desviaciones típicas en torno a 0.81m, con valores máximos de profundidad volumétrica de 4.55m.

Los valores de relación de desarrollo volumétrico presentan una media de 0.78, con una desviación típica de 0.18. Estos valores tienen un rango de 1.06 (entre 0.26 y 1.32), con rangos intercuartílicos de 0.23 (entre 0.67 y 0.90). Al respecto hay que recordar que aquellas dolinas con formas similares a un cono, dan lugar a parámetro de relación de desarrollo volumétrico en torno a 1, valores inferiores a 1 (384 dolinas) ponen de manifiesto dolinas con morfología convexa mientras que las de valores superiores a 1 ponen de manifiesto morfologías cóncavas (54 dolinas). Los mapas correspondientes a estos dos parámetros se muestran en las figuras 39 y 40.

Por último, se analizan los parámetros relacionados con la forma de las dolinas (elongación) y con la propia orientación de las mismas. Estos parámetros son de un indudable interés en este tipo de estudios, ya que en muchos casos ponen de manifiesto la presencia de juegos de fracturas que han podido favorecer la disolución de los materiales y la creación de dichas depresiones. Existen diversos parámetros para la estimación de los coeficientes de forma de las propias dolinas, así, aunque de partida se plantea un esquema basado en la medida de la dimensión máxima, y la dimensión perpendicular a la misma. En este caso, la elongación se establece como la relación entre ambas dimensiones. Si bien, este es un parámetro comúnmente empleado en los estudios de campos de dolinas, y fue incluido en la propia oferta, hay que tener en cuenta que en el caso de dolinas con morfologías muy irregulares su aplicación es compleja llegando a resultados carentes de sentido. Como ejemplo, en la figura 40 se presentan los problemas asociados a este método.

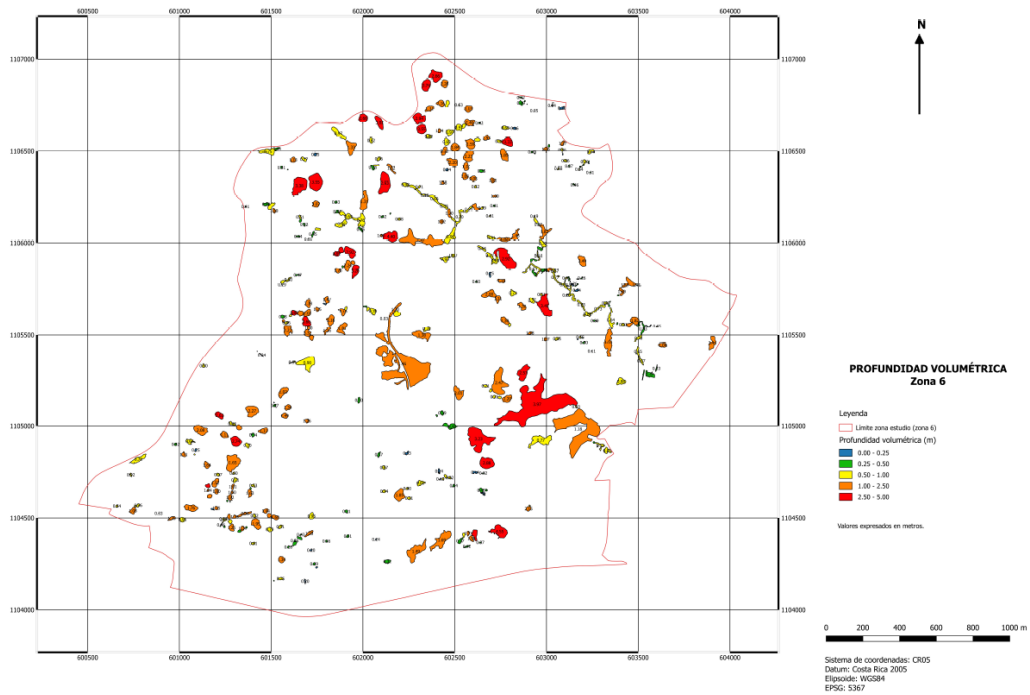


Figura 38. Mapa de profundidad volumétrica de las dolinas. Valores expresados en metros.

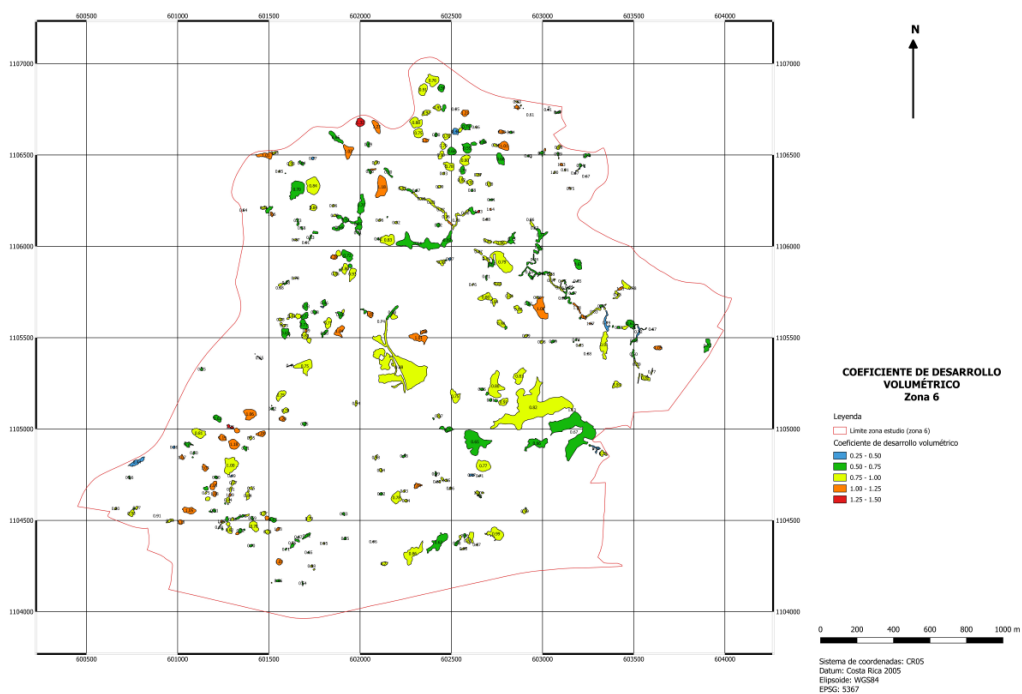
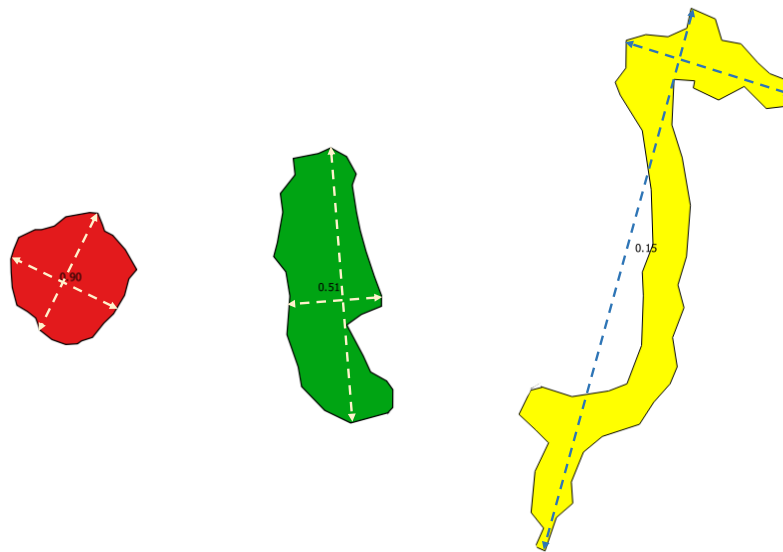


Figura 39. Mapa de desarrollo volumétrico de las dolinas.



**Figura 40.** Problemas en la determinación de los factores de elongación. En el interior de cada polígono se muestra el valor del cociente iso-perimétrico, en el que el valor próximo a 1 indica un polígono que se asemeja a un círculo, y valores que tienden a 0 ponen de manifiesto estructuras marcadamente elongados.

Como alternativa se ha optado por emplear el cociente iso-perimétrico cuyo cálculo ya ha sido comentado en la descripción de los datos incluidos en la base de datos. Como se puede observar en la figura anterior (figura 40) la dolina con una forma aproximadamente circular tiene un valor de parámetro de 0.90 (color rojo), la dolina con morfología ovalada tiene un cociente de 0.51 (color verde), mientras que la dolina con morfología muy compleja (posiblemente por disolución a lo largo de un doble juego de fracturas a 90° presenta un parámetro de 0.15 (color amarillo).

En la figura 41 y tablas 16 y 17 se presentan los mapas correspondientes al cociente iso-perimétrico y los estadísticos básicos correspondientes. En la zona se pone de manifiesto un elevado número de dolinas -129, 29,45%- con formas marcadamente redondeadas (cociente >0.8) y de formas aproximadamente ovaladas con un total de 164 (37.44%). Así se puede comprobar como el valor de la mediana es de 0.7, y el valor de la media de 0.66 con una desviación típica de 0.2. Dichas dolinas se distribuyen en todo el área de estudio, si bien hay que tener en cuenta que existen dos campos de dolinas con morfologías marcadamente circulares en la zona N y en la zona SSW.

Las dolinas con una morfología más elongada se concentran en el pasillo que recorre en dirección N110°E la zona de estudio en la parte más al N de la misma.

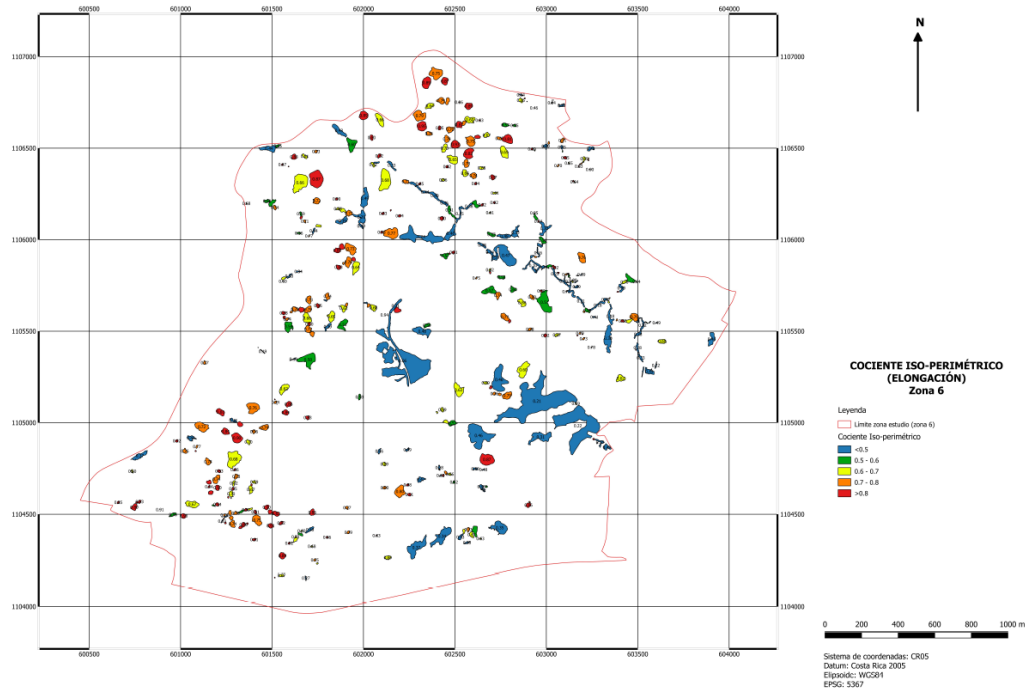


Figura 41. Mapa de cociente iso-perimétrico de las dolinas

Tabla 16. Estadísticos básicos de elongación (cociente iso-perimétrico).

N.Datos	438	Mínimo	0.06
Media	0.66	C.Inferior (Q1)	0.51
Desv.típica	0.20	Mediana	0.70
		C.Superior (Q3)	0.82
		Máximo	0.95

Tabla 17. Distribución de número de dolinas en función del cociente iso-perimétrico.

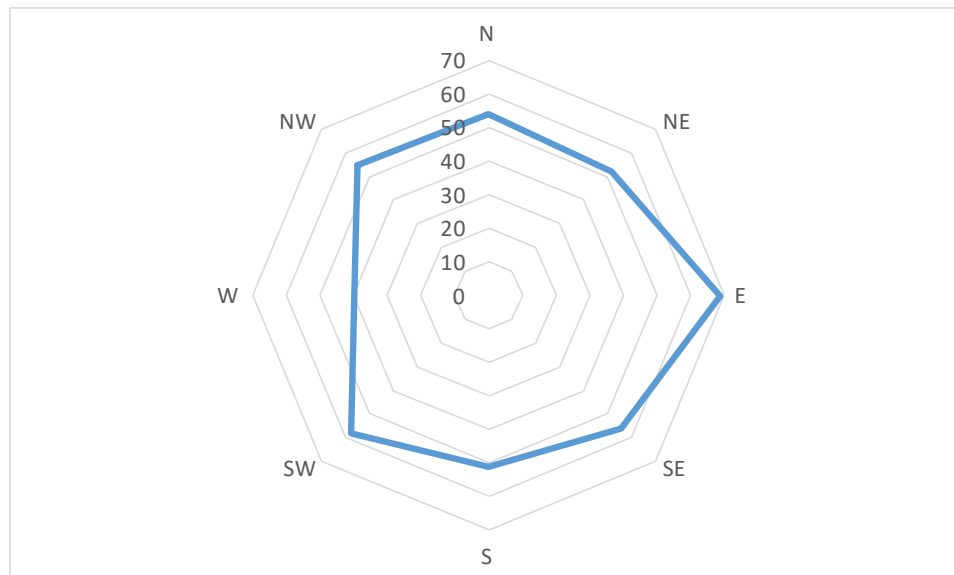
Intervalo	Nºdolinas	% respecto al total
0.0-0.2	15	3.42
0.2-0.4	45	10.27
0.4-0.6	85	19.41
0.6-0.8	164	37.44
0.8-1.0	129	29.45

Otro parámetro básico es la orientación de las dolinas la misma ha sido establecida en función del segmento de mayor longitud que puede ser trazado considerando el perímetro de la misma, y su orientación con respecto al N. En la base de datos se incluye la información relativa con respecto al punto cardinal, así como al propio ángulo de orientación. En la figura



42 se muestra el diagrama de rosas de orientación de las diferentes dolinas, así como los estadísticos básicos de los ángulos correspondientes. En estos cálculos es necesario tener en cuenta que dolinas con un marcado carácter circular, incorporan ruido en los cálculos como consecuencia de no disponer de una orientación bien definida.

La distribución mostrada en la figura 42 pone de manifiesto una distribución bastante homogénea de las orientaciones a nivel global de la zona. Estos resultados globales están muy influenciados por los campos de dolinas redondeadas existentes en la zona N y la zona SSE, a pesar de ello si se puede observar un máximo en la dirección E (SE) que viene a corresponderse con la dirección N110°E que se ha apuntado a lo largo de este informe, y en menor medida, un segundo máximo ligado a las direcciones perpendiculares a la misma con máximos en la dirección SW.



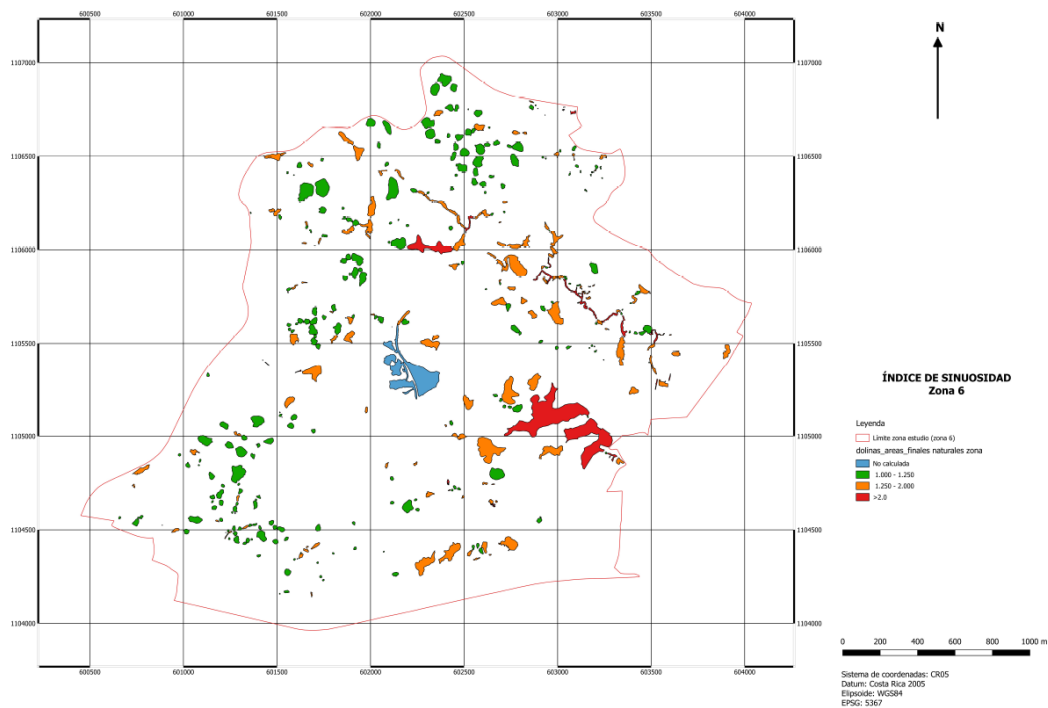
**Figura 42.** Distribución de orientaciones de las dolinas detectadas en el área de estudio.

Por último, y como otro parámetro adicional de forma se ha calculado el índice de sinuosidad, definido como la relación entre el perímetro planimétrico de la dolina y la circunferencia de un círculo con área equivalente al área planimétrica de la dolina. Esta relación, que nunca es menor que 1, es un índice que pone de manifiesto la irregularidad de los límites de la dolina, así como su propia elongación. Para el cálculo de este índice ha sido necesario el descartar a la dolina 439, debido a su morfología marcadamente irregular. Los estadísticos básicos calculados y el mapa de índice de sinuosidad correspondiente se muestran en la tabla 18 y en la figura 43, respectivamente.

Una vez más y en dicho mapa se puede observar las zonas ubicadas al NW y SSW de dolinas con morfologías redondeadas y bordes de una escasa sinuosidad, frente a las grandes dolinas ubicadas en la zona central, y las ubicadas en la zona del pasillo N110°E en las que la sinuosidad es elevada.

**Tabla 18.** Estadísticos básicos del índice de sinuosidad.

N.Datos	437	Mínimo	1.02
Media	1.30	C.Inferior (Q1)	1.10
Desv.típica	0.32	Mediana	1.19
		C.Superior (Q3)	1.40
		Máximo	3.24



**Figura 43.** Índice de sinuosidad.

#### 8.5.4.- Caracterización del área de dolinas.

Uno de los objetivos de este proyecto era la caracterización del área de dolinas existente. Al respecto es evidente que si bien los procedimientos para la clasificación de las dolinas pueden ser muy diversos dependiendo de la información disponible. En este caso, la información se limita a parámetros puramente morfológicos, por lo que la propuesta aquí planteada se considera que debe ser considerada de forma exclusiva como un punto de partida, que debe ser combinada con otro tipo de información, como, por ejemplo, información genética de las dolinas, información litológica y estructural de las diferentes formaciones e incluso, información de la conexión subterránea de las mismas mediante la realización de los ensayos correspondientes de trazabilidad, aspecto fundamental en un sistema de estas características. Asimismo, también se considera fundamental el incorporar otra información de tipo ambiental, como, por ejemplo, la potencialidad de riesgo para la contaminación de acuíferos, etc. todo orientado a la toma de decisiones y la adopción de medidas para la protección medioambiental.



Esta característica de información preliminar y punto de partida para un estudio más profundo de la zona, llevan a no aconsejar el empleo de metodologías estadísticas para la clasificación como, podría ser mediante procedimientos de clustering o de regresión múltiple. Por otro lado, la complejidad de la propia zona plantea como un método más aconsejable el agrupamiento de las diferentes dolinas en zonas atendiendo a los comportamientos que han sido analizados en cada uno de los diferentes parámetros calculados.

El mapa de zonalización de las dolinas se muestra en la figura 44. En la misma se puede observar cómo se han diferenciado 5 zonas, cuyas características básicas se indican a continuación:

- a) Zona 1. Ubicada en un polígono delimitado por los núcleos urbanos de Portete, Barrio Cangrejo y Villas Cacao. Se caracteriza por dolinas de pequeño tamaño (superficie inferior a 3000m<sup>2</sup>) y de una forma aproximadamente circular (parámetro de elongación en torno a 0.7-0.9) y bastante agrupadas. Su profundidad es variable aunque en la mayor parte de los casos varía entre los 2 y los 10 m (si bien existen algunas con profundidades hasta 15m). Su coeficiente de áreas (Area2D/Area3D) está muy próxima a 1 (1.10). Representada en el mapa con color sombreado en tono morado.
- b) Zona 2. Se trata de una zona muy característica en esta zona de estudio, siendo una banda que atraviesa la zona de estudio desde las Lomas de Recope hasta Las Brisas. Se caracteriza por dolinas muy elongadas (parámetro de elongación en torno a 0.3-0.5) y con una orientación principal en torno a N110°-120°E, retocada por algunas estructuras con una estructura perpendicular a dicha dirección. Se trata de estructuras que suelen tener una profundidad pequeña (inferior a 3m). En esta zona se observan estructuras de varios episodios, es decir, que sobre una dolina de grandes dimensiones se han producido nuevas disoluciones que llevan a dolinas discontinuidas a lo largo del anterior valle. Representada en el mapa con un color sombreado en tono azulado.
- c) Zona 3. Se trata de una zona central en el área de estudio que comprende a grandes estructuras con morfologías irregulares. Son dolinas de grandes dimensiones (en varios casos con volúmenes superiores a 25000m<sup>3</sup>) y algunas con profundidades considerables (en torno a 15m). Representada en el mapa con color sombreado en tono amarillo.
- d) Zona 4. Se trata de una zona de grandes dimensiones que discurre de N a S en el extremo occidental del área de estudio, desde la Loma de Moín al N hasta Villa Mar II al S. Se caracteriza por dolinas de pequeñas dimensiones y de una morfología aproximadamente circular (en algunos casos ovaladas). Presenta ciertas similitudes morfológicas con las dolinas de la zona 1, si bien está separada de la misma por la zona 2 y en este caso la profundidad de las dolinas es menor (inferior a 10m). Representada en el mapa con color sombreado verde.
- e) Zona 5. Se trata de una zona ubicada en las proximidades del núcleo urbano de Barrio Juan Pablo II. Se trata de estructuras elongadas (lo que las diferencia de la zona 1) y de tamaño medio (lo que las diferencia de la zona 3). Algunas tienen un importante desarrollo vertical con profundidades entre 8 y 14 m. Representada en el mapa con color sombreado rojo.

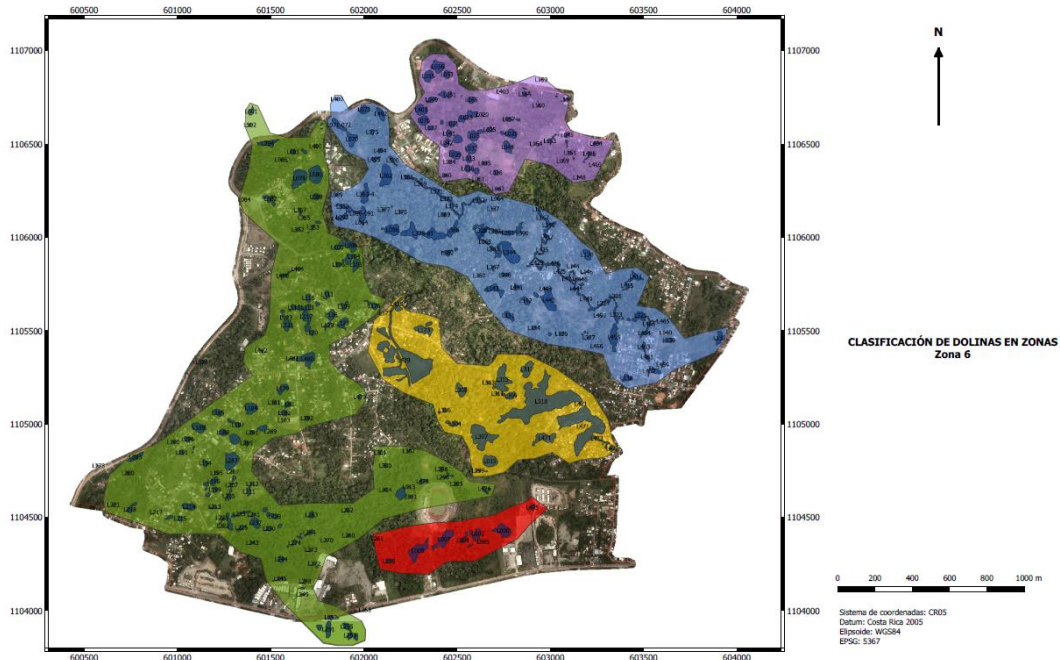


Figura 44. Mapa de distribución de zonas de dolinas de acuerdo con criterios morfológicos.

## 8.6.- Conclusiones

En este proyecto se ha puesto de manifiesto la potencialidad del empleo de sensores de última generación (concretamente, cámaras digitales fotogramétricas y sensores LiDAR) para la obtención de información de alta calidad (elevada exactitud posicional y un alto nivel de detalle) orientada al estudio de una zona marcadamente dolinizada.

El empleo de este tipo de metodologías de captura de datos, apoyada en el tratamiento y posterior análisis de la información extraída permite una caracterización de los fenómenos que se producen en la misma, dicha caracterización constituye un buen punto de partida a completar con otros tipos de estudios. Todo ello en una zona con una complejidad importante, en el sentido, de ser una zona con una importante presencia de vegetación. Al respecto, se puede indicar que de las 438 dolinas detectadas en el interior de la zona 6, un total de 414 estaban completa o parcialmente cubiertas por árboles, dificultando su localización y caracterización mediante metodologías clásicas basadas en métodos topográficos de campo o incluso mediante imágenes aéreas.



## 9.- CAPACITACIÓN

Este proyecto se ha completado con una jornada de formación que se considera que fue de un extraordinario interés, a fin de trasladar la metodología empleada en este proyecto, los resultados que se han podido derivar del mismo, así como otros ejemplos de aplicación de este tipo de técnicas en otros ámbitos de interés para la propia AyA. La jornada se desarrolló en la mañana del día 18 de enero de 2018, en las propias instalaciones de la AyA.

Dentro del programa se incluyeron presentaciones relativas a la presentación general del proyecto en el que se encuadra este trabajo, así como, por parte de la empresa Stereocarto de sus principales líneas de actividad y experiencia en el sector. Tras dichas presentaciones se realizó la específica relativa a este trabajo, incorporando una introducción sobre los sistemas empleados y productos a general y resultados básicos del mismo. Dicha presentación fue realizada por el Prof. Dr. Jorge Delgado García, de la Universidad de Jaén que ha sido el investigador responsable de la ejecución de las tareas de extracción de las dolinas. El número total de personas asistentes a dicha jornada de capacitación fue de 22, cuyos datos y entidad de origen se muestran en la tabla adjunta (tabla 19).

**Tabla 19.** Personal asistente a la jornada de capacitación (ordenado alfabéticamente).

Apellidos y nombre	Entidad
Rojas Barrantes, Adrián	Estudios Básicos
Gómez Molina, Alfonso	StereoCarto
Murcia Salazar, Carlos	PVAAM
Ramírez Vallina, Carlos	AYA PVAAM
Corrales Días, Christian	RAC
Delgado S, Christian	Hidrografía Densa
González Ramírez, Esteban	UEN Programación y Control
Delgado García, Jorge	Universidad de Jaén (España)
Madrigal Garcia, Jorge	RHC
Matarrita Cortés, José	RAC
Masis Nuñez, Kendall	AF Cuencas Hidrográficas
Rojas Quirós, Luis A.	AF Control Ambiental
Solis Duncan, Marcelo	StereoCarto
Aguilar Valverde, María José	UEN Programación y Control
Vega Alvarado, Maylinth	Gestión y Control ambiental
Bondada , Moisés	AYA
Jiménez Jaén, Oscar	AF Acueducto Hidrográfico
Alfaro Trejos, Sandra	AF Cuencas Hidrográficas
Morera Guillen, Sigifredo	Unidad Funcional EB
Colino Jiménez, Soraya	StereoCarto
Oviedo Sánchez, Tatiana	Estudios Básicos
Ramos S, Vivian	AYA Gestión Ambiental



Servicios para el levantamiento, identificación y sistematización de información técnica como un mecanismo de integración de la información bajo el concepto de cuenca, aplicación mediante un estudio fotogramétrico y LiDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón





Presentación y capacitación sobre el estudio fotogramétrico y LIDAR en un sector del Acuífero de Moín, Limón  
 2017FTS-00113-PR1

18 de enero del 2018

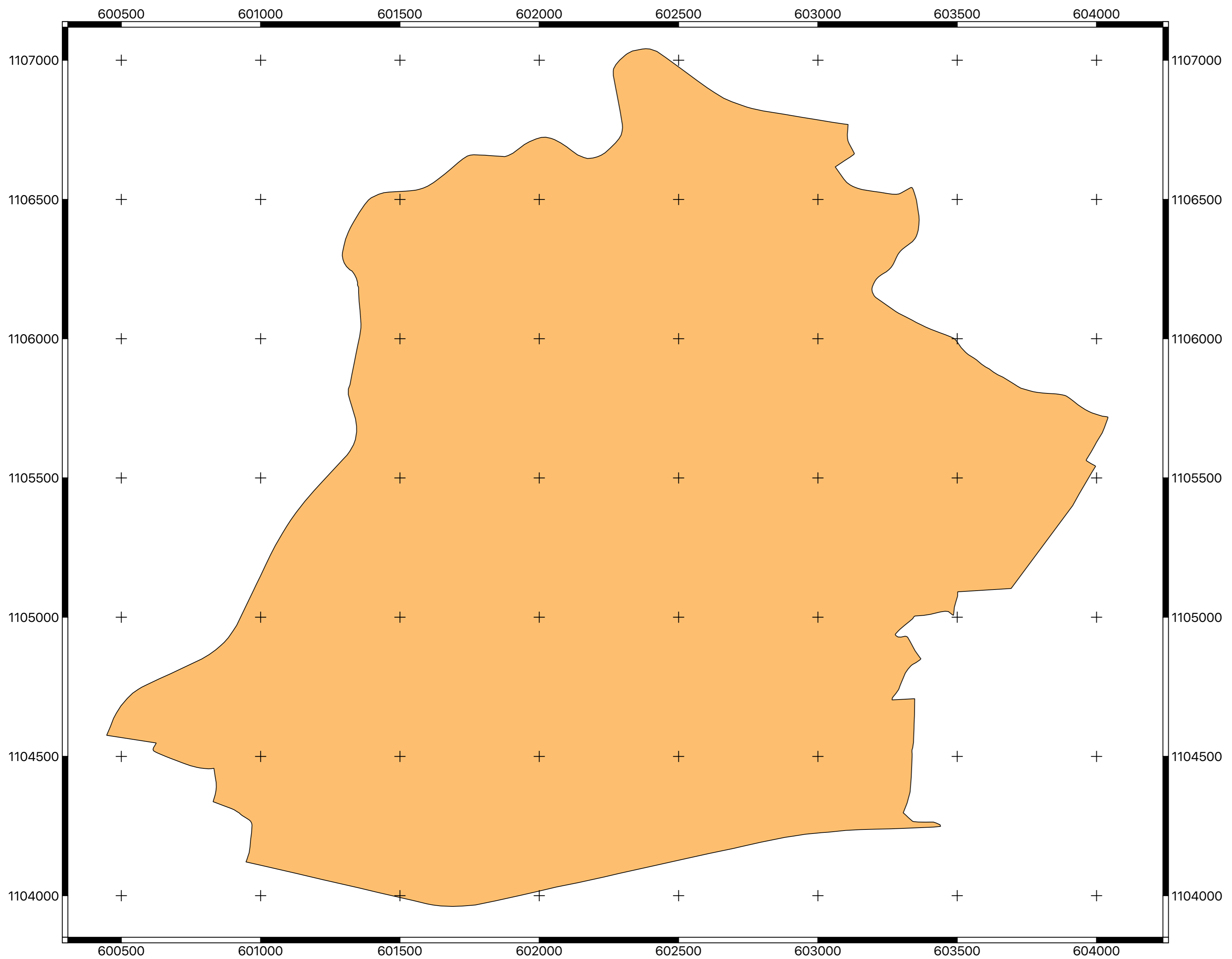
Sala de reuniones UEN Gestión Ambiental

REGISTRO DE ASISTENTES

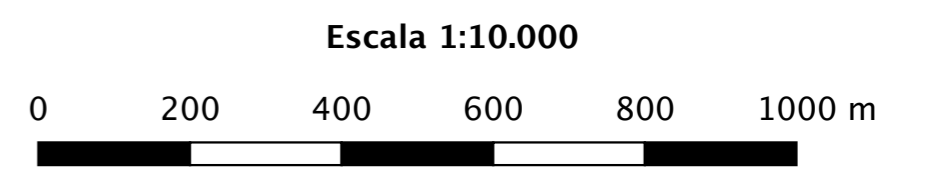
N°	NOMBRE	DEPENDENCIA	CORREO ELECTRÓNICO	FIRMA
1	Sandra Alfaro Trejos	AF Cuencas Hidrográficas	salfaro@aya.go.cr	Sank
2	Luis A. Rojas Quirós	AF Control Ambiental	lrojas@aya.go.cr	Luis Rojas Q.
3	Marilyth Vega Alvarado	Gestión y Control Ambiental	mvega@aya.go.cr	Marilyth Vega
4	Oscar Jiménez Jara	AF Cuencas Hidrográficas	ojimenez@aya.go.cr	Oscar Jiménez
5	Sigifredo Morera Guillén	Unidad Funcional ER	smorera@aya.go.cr	Sigifredo Morera
6	Tatiana Ouedo Sánchez	Estudios Básicos	tatiouedo@aya.go.cr	Tatiana Ouedo
7	Esteban González Ramírez	UEN Programación y Control	egonzalez@aya.go.cr	Esteban González
8	Adrián Rojas Bracamonte	Estudios Básicos	adrojas@aya.go.cr	Adrián Rojas
9	Hugo José Aguilar Valverde	UEN Programación y Control	haguilar@aya.go.cr	Hugo José Aguilar
10	Renechil Moya Moya	Cuencas Hidrográficas	rmoya@aya.go.cr	Renechil Moya



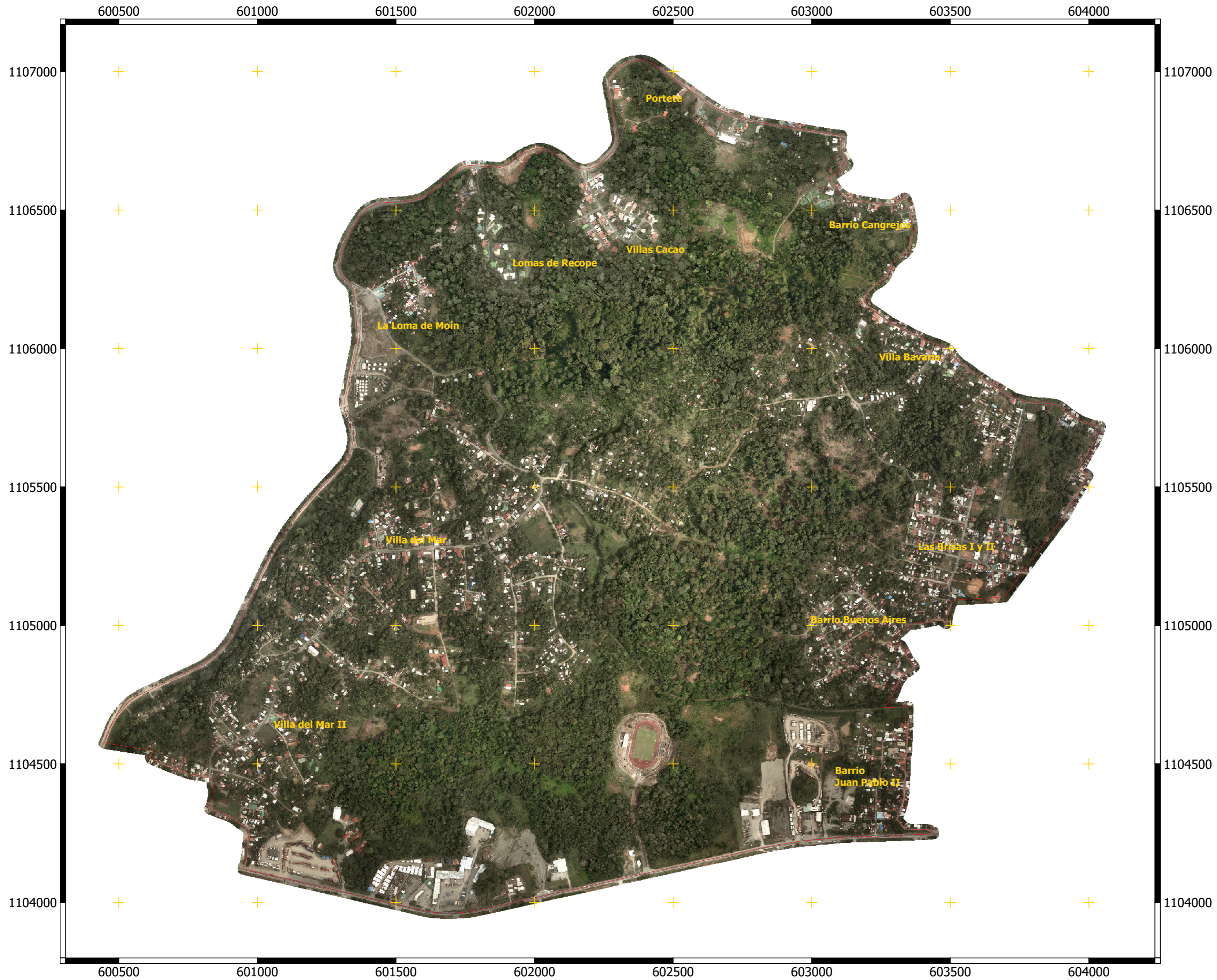
Nº	NOMBRE	ORGANIZACIÓN	TELEFONO	FIRMA
11	Jorge Ait. Madrigal Garcia	R.H.C.	2758-5519	
12	José Madroño Cortés	R.H.C.	2758-1332	
13	Christian Covales Oros	Area Hidrología	2543 3653	
14	Christian Delgado S.	Hidrología - DENSA	3713	
15	Carlos Murcia Salazar	PVAM - G.A. A.H.	8310-5019	
16	Scary Chino	<del>STRECARTO</del> STRECARTO	8468 0631	
17	Roberto Pover-	STRECARTO	+34 601508492	
18	Marcelo Solís Duran	STRECARTO	8813-9617	
19	Jorge Delgado	Universidades de Teaén (España)	+34 633025577	
20	Moisés Benilda Jure	AyA - Cuencas	88373163	
21	Carlos Ramírez Vallina	AyA - PVAM (GA)	10162378	
22	Diviana Perras S	AyA Gestión Amb	8355-4394	
23				
24				



**ÁREA DE ESTUDIO  
Zona 6**

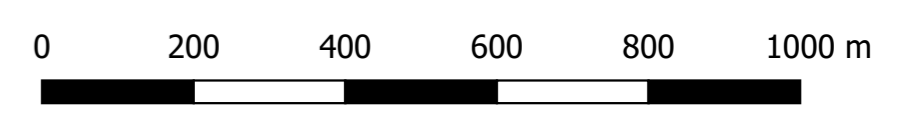


Sistema de coordenadas: CR05  
Datum: Costa Rica 2005  
Elipsoide: WGS84  
EPSG: 5367

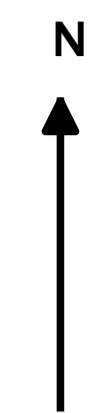
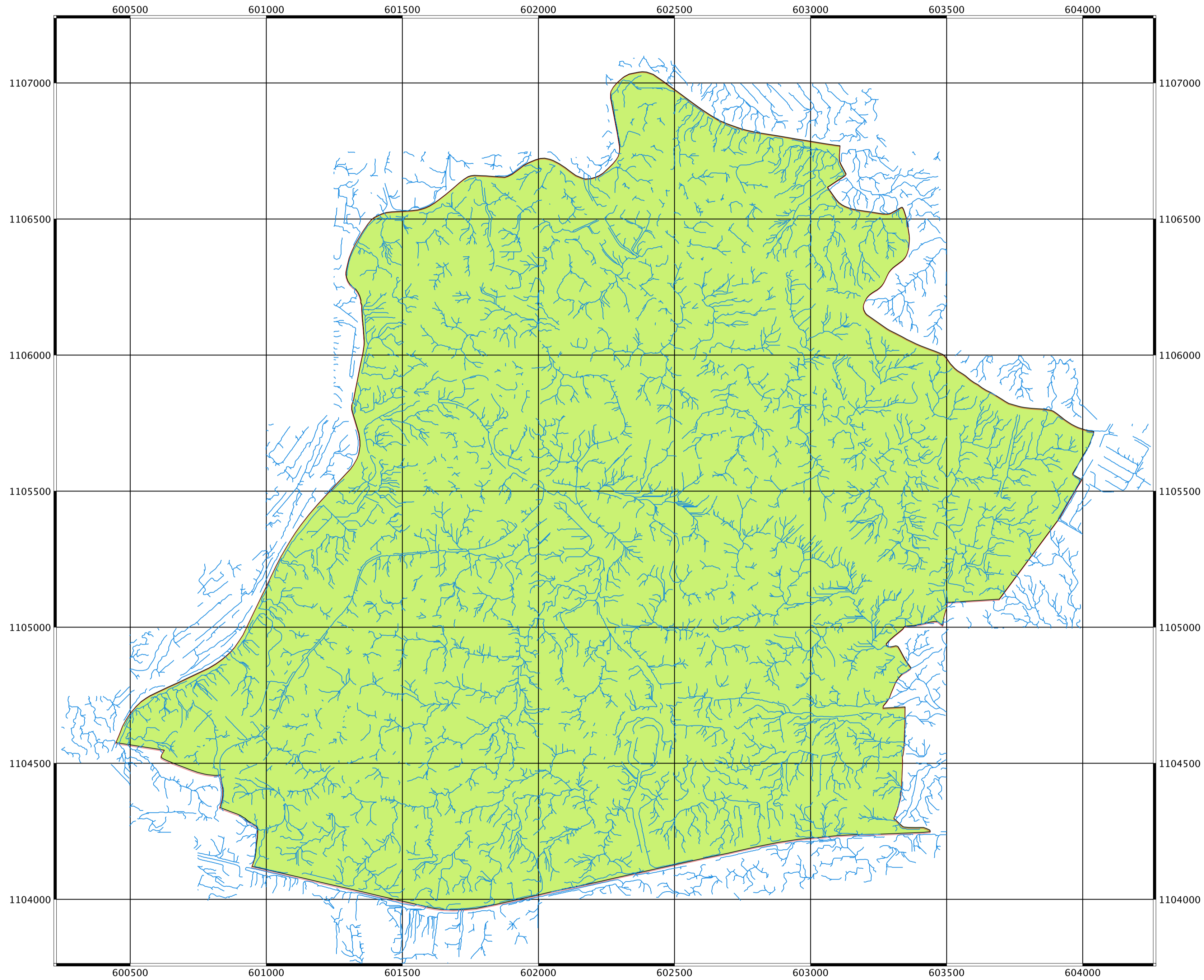


**MAPA DE LOCALIZACIÓN  
AREA DE ESTUDIO  
Zona 6**

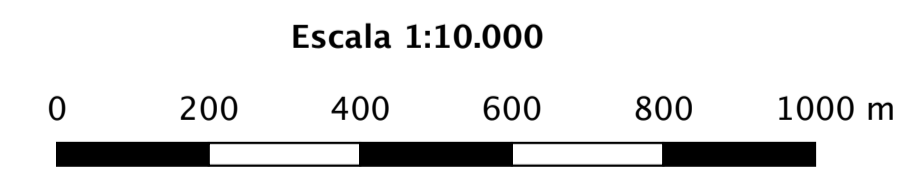
**Escala 1:10.000**



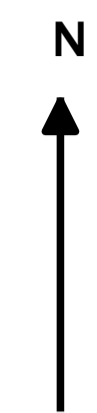
Sistema de coordenadas: CR05  
Datum: Costa Rica 2005  
Elipsoide: WGS84  
EPSG: 5367



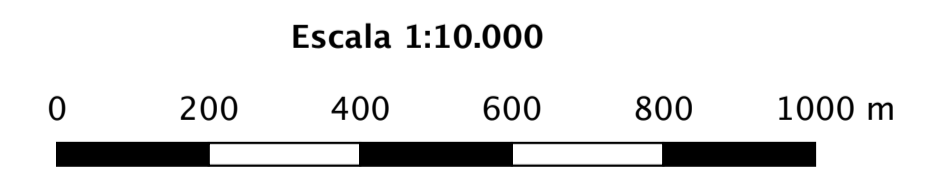
**REDES DE FLUJO  
Zona 6**



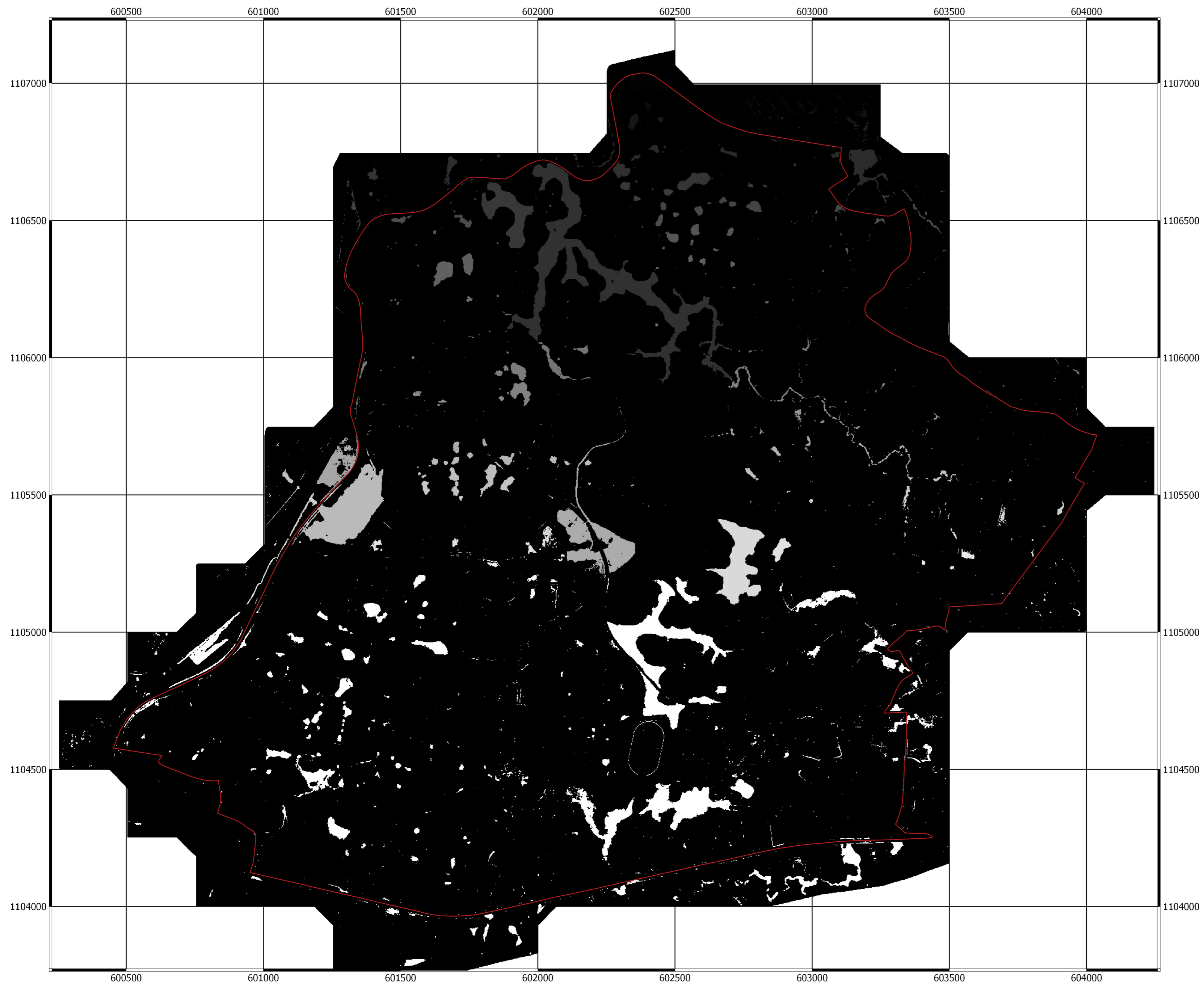
Sistema de coordenadas: CR05  
Datum: Costa Rica 2005  
Elipsoide: WGS84  
EPSG: 5367



**CUENCAS DELIMITADAS  
Zona 6**



Sistema de coordenadas: CR05  
Datum: Costa Rica 2005  
Elipsoide: WGS84  
EPSG: 5367



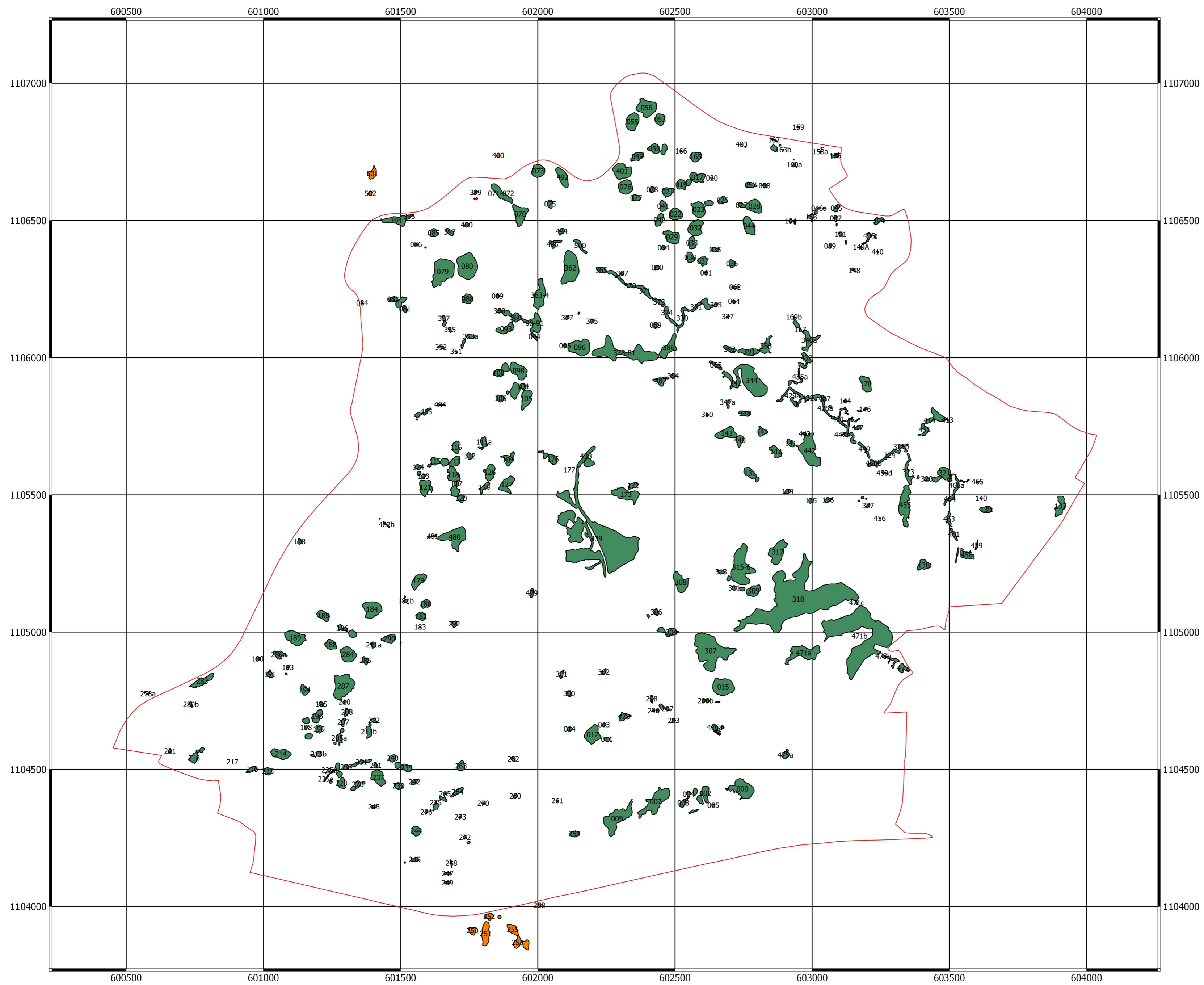
### CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE SINK Zona 6

El tono de color hace referencia a "sink" más definidos de acuerdo con la clasificación automática

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
Datum: Costa Rica 2005  
Elipsoide: WGS84  
EPSG: 5367



**LOCALIZACIÓN DE DEPRESIONES LOCALIZADAS Zona 6**

Se hace referencia al código identificador de cada dolina identificada.

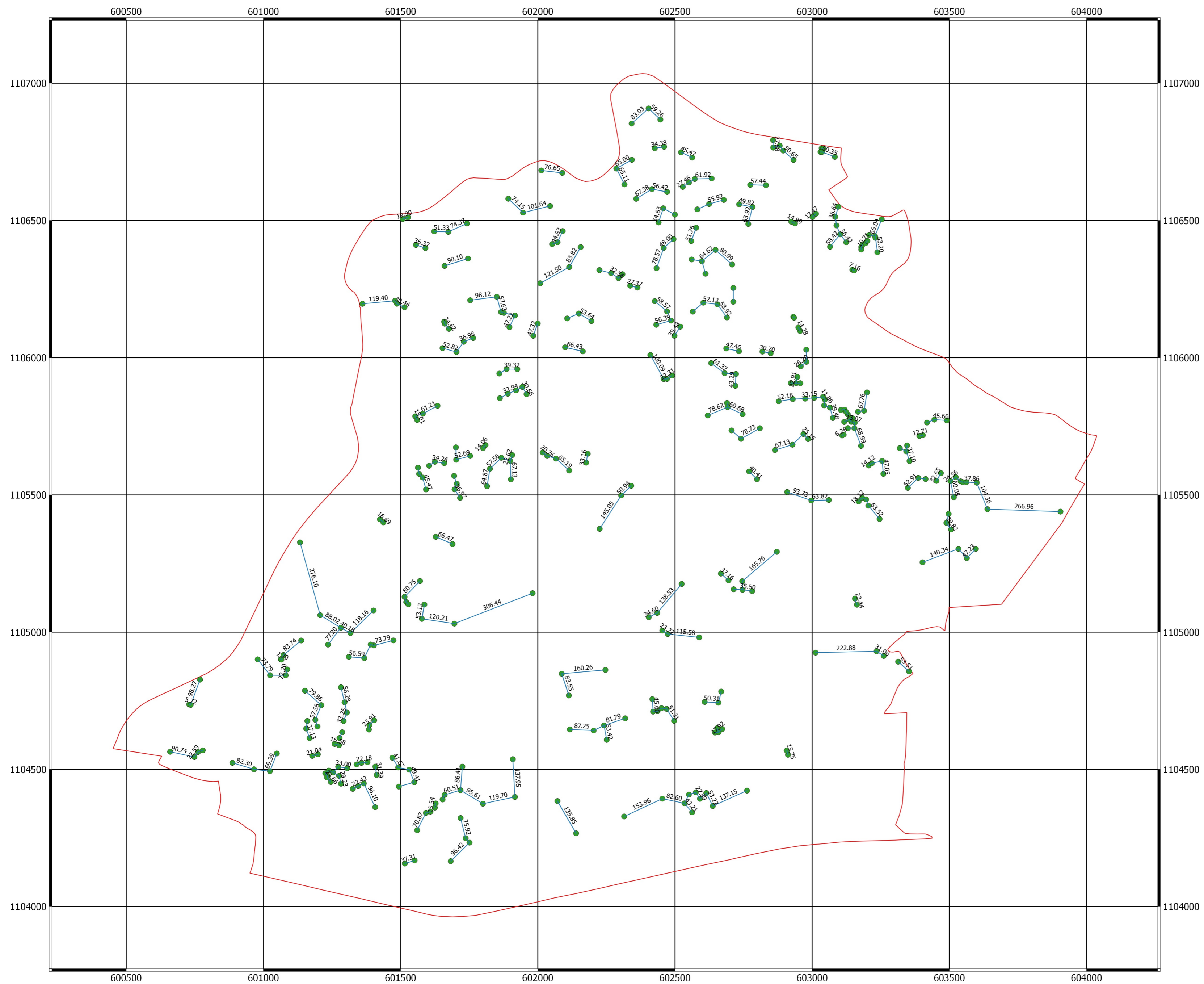
**Leyenda**

- Dolinas
- Dolinas fuera de la zona 6
- Otras depresiones artificiales
- Límite zona estudio (zona 6)

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367

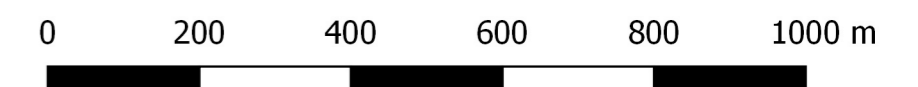


**CONEXIONES A LOS SUMIDEROS DE  
LOS VECINOS MÁS PRÓXIMOS  
Zona 6**

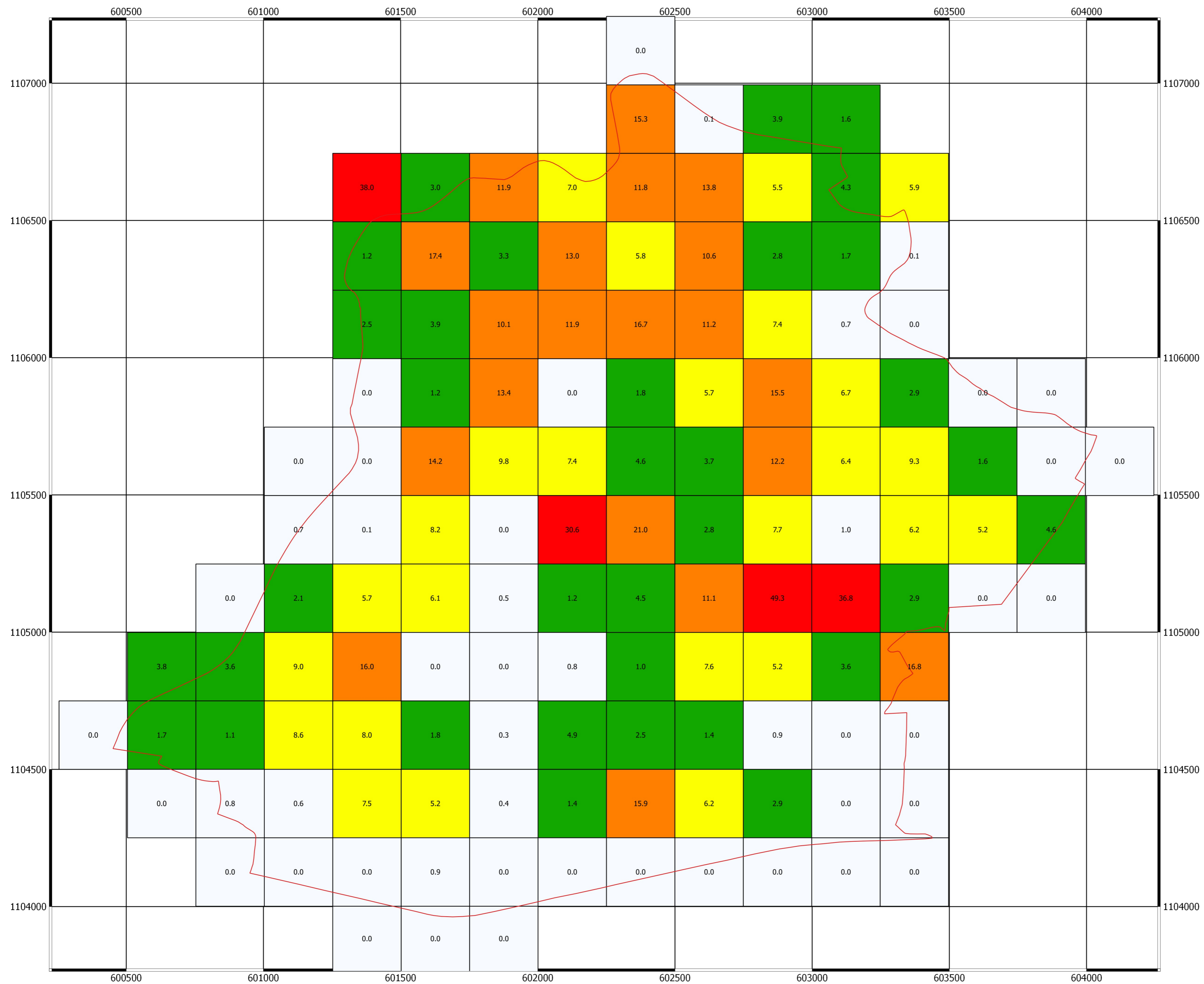
**Legenda**

- Línea de conexión vecino más próximo (distancia)
- sumideros
- Límite zona estudio (zona 6)

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367

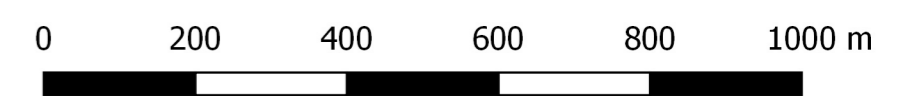


**% DE SUPERFICIE DOLINIZADA POR BLOQUES DE 250mx250m Zona 6**

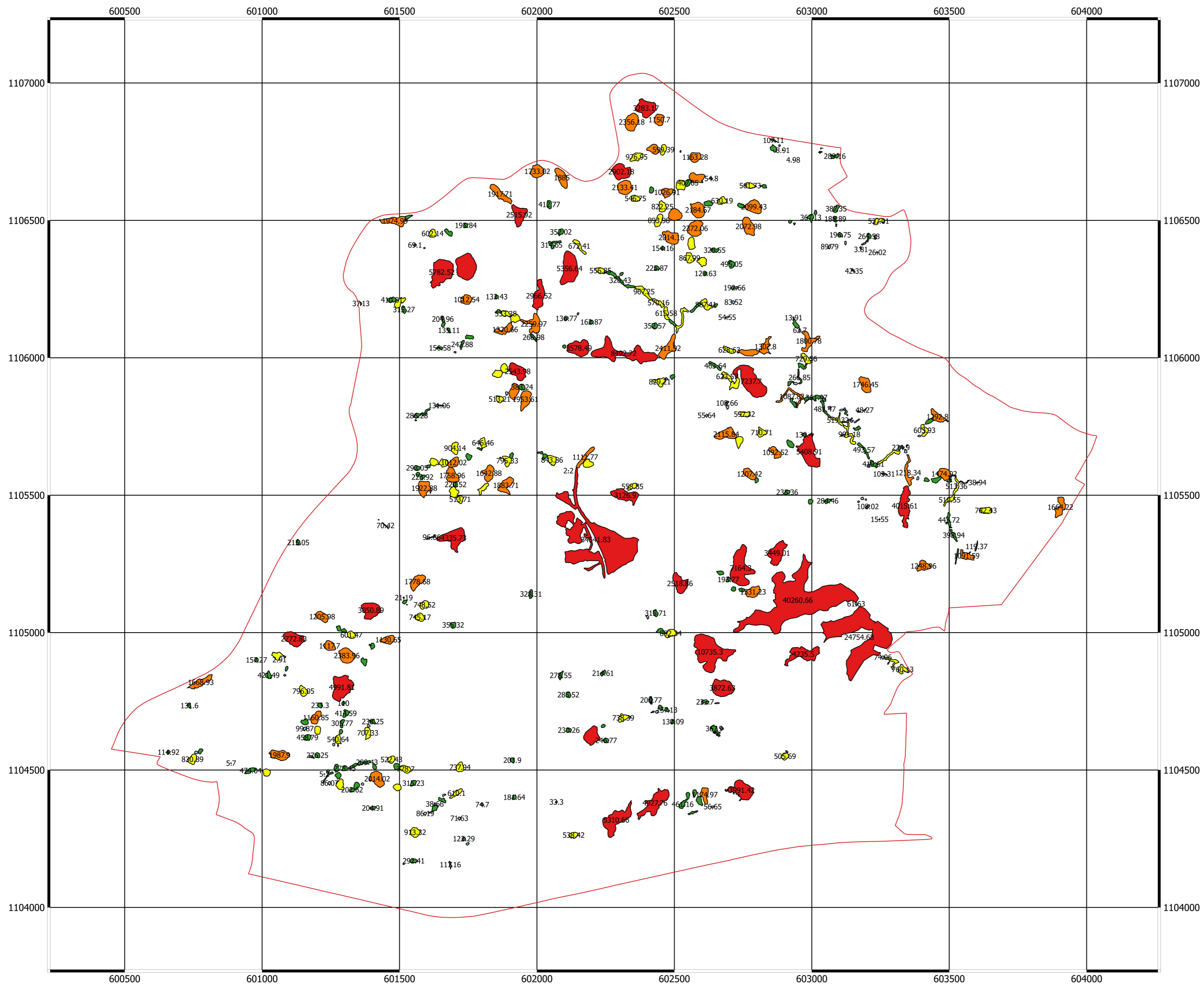
- Leyenda
- 0.00 - 1.00
  - 1.00 - 5.00
  - 5.00 - 10.00
  - 10.00 - 25.00
  - 25.00 - 50.00
  - Limite zona estudio (zona 6)

En cada bloque se considera la superficie incluida dentro del área de estudio.

**Escala 1:10.000**



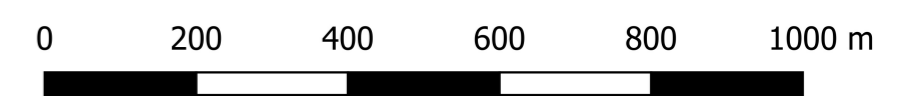
Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367



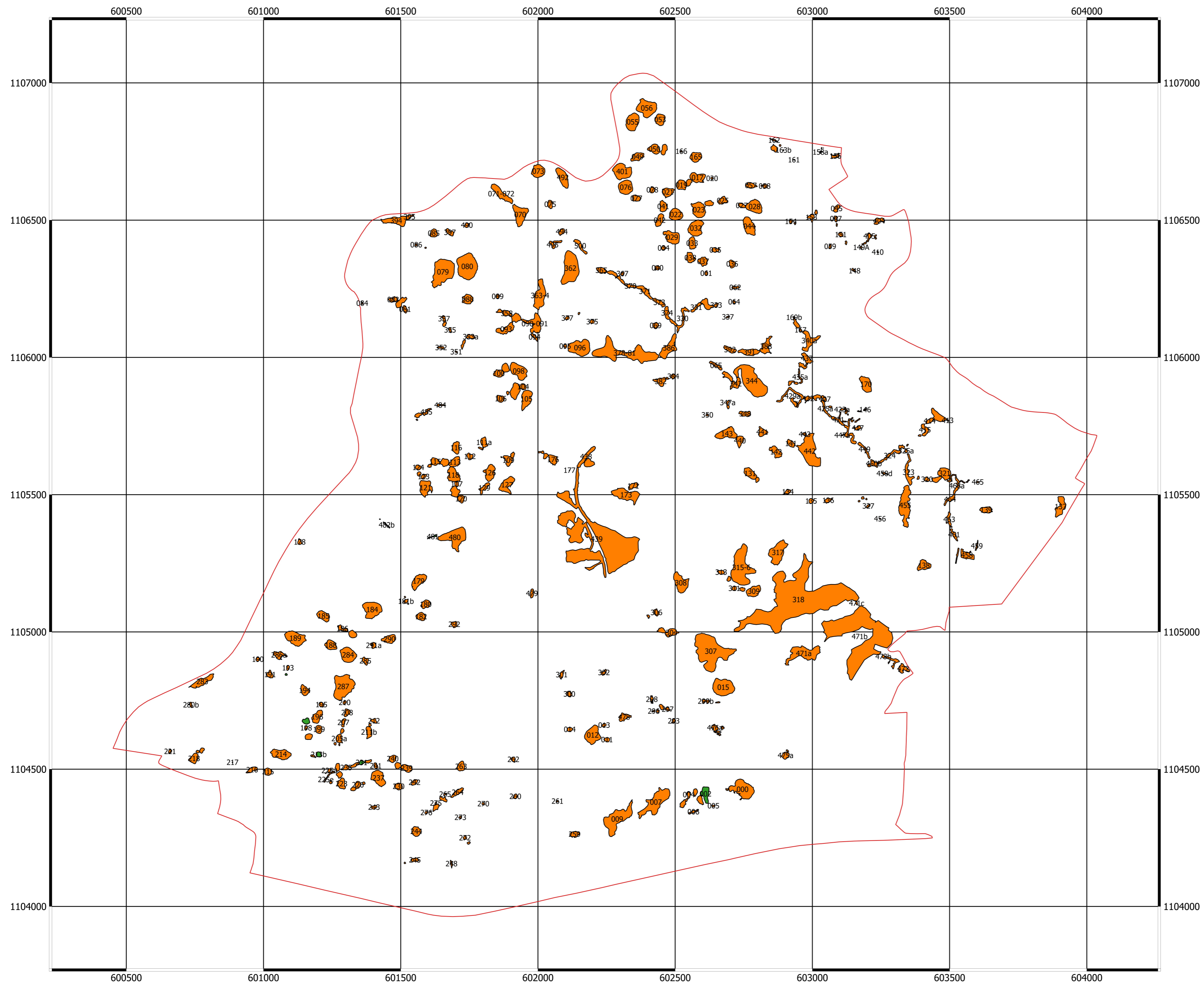
**SUPERFICIE PLANIMÉTRICA  
DE LAS DOLINAS  
Zona 6**

- Leyenda**
- Límite zona estudio (zona 6)
  - Superficie planimétrica de la dolina
  - 0 - 50
  - 50 - 100
  - 100 - 500
  - 500 - 1000
  - 1000 - 2500
  - 2500 - 50000
- Superficies expresadas en metros cuadrados.

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367

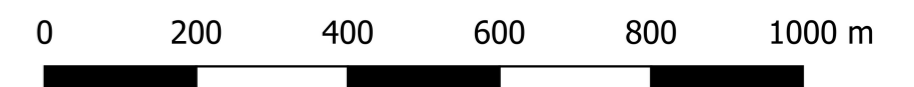


**RELACION AREA3D/AREA2D  
Zona 6**

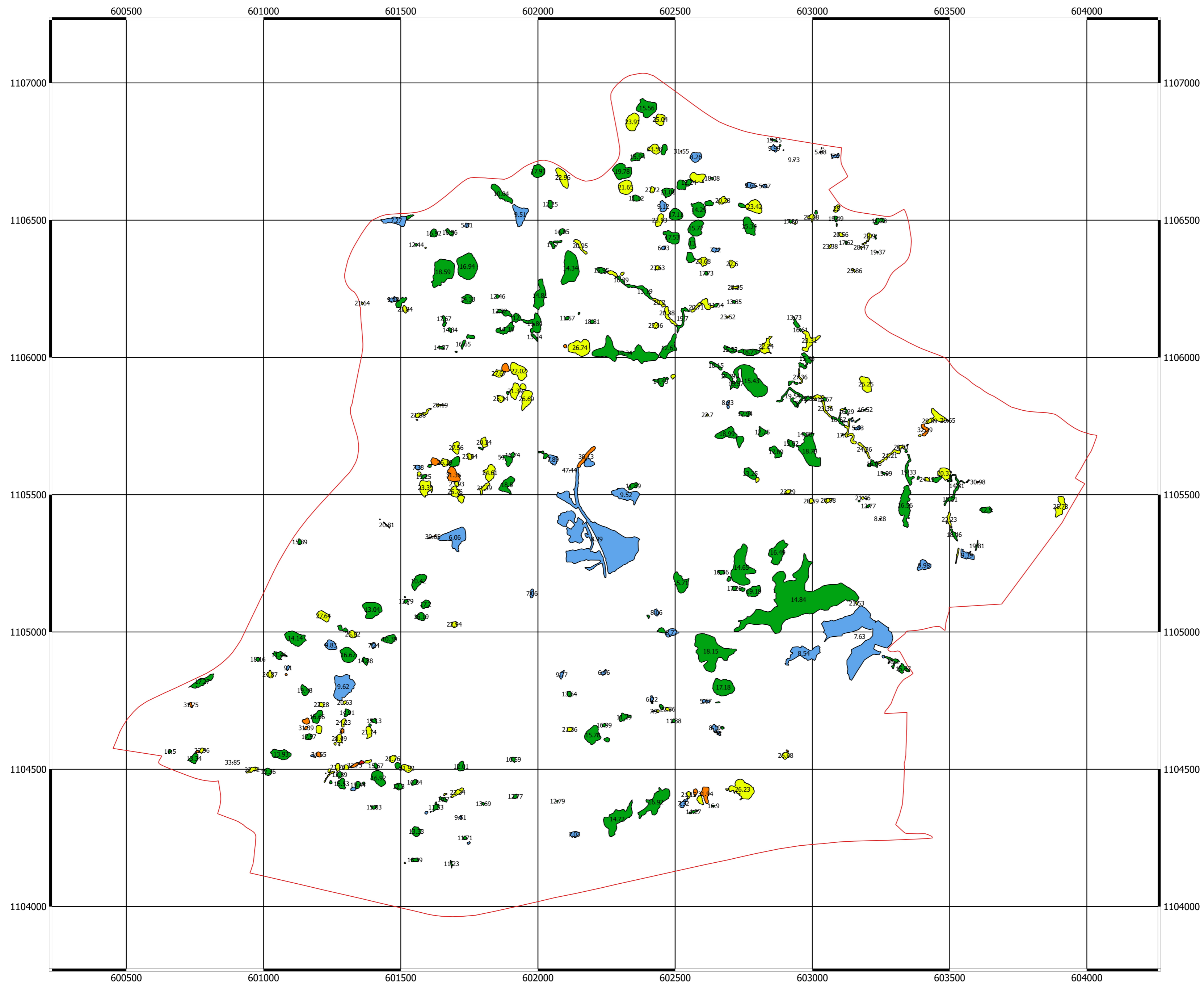
Leyenda

- Límite zona estudio (zona 6)
- Relación Area3D/Area2D
- 1.25 - 2 (Cuenco)
- 1 - 1.25 (Plato)

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367

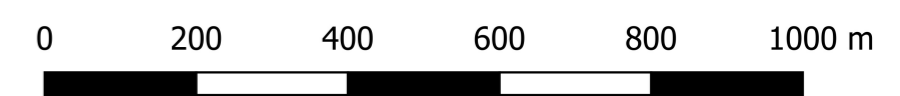


**PENDIENTE MEDIA DE LA DOLINA  
Zona 6**

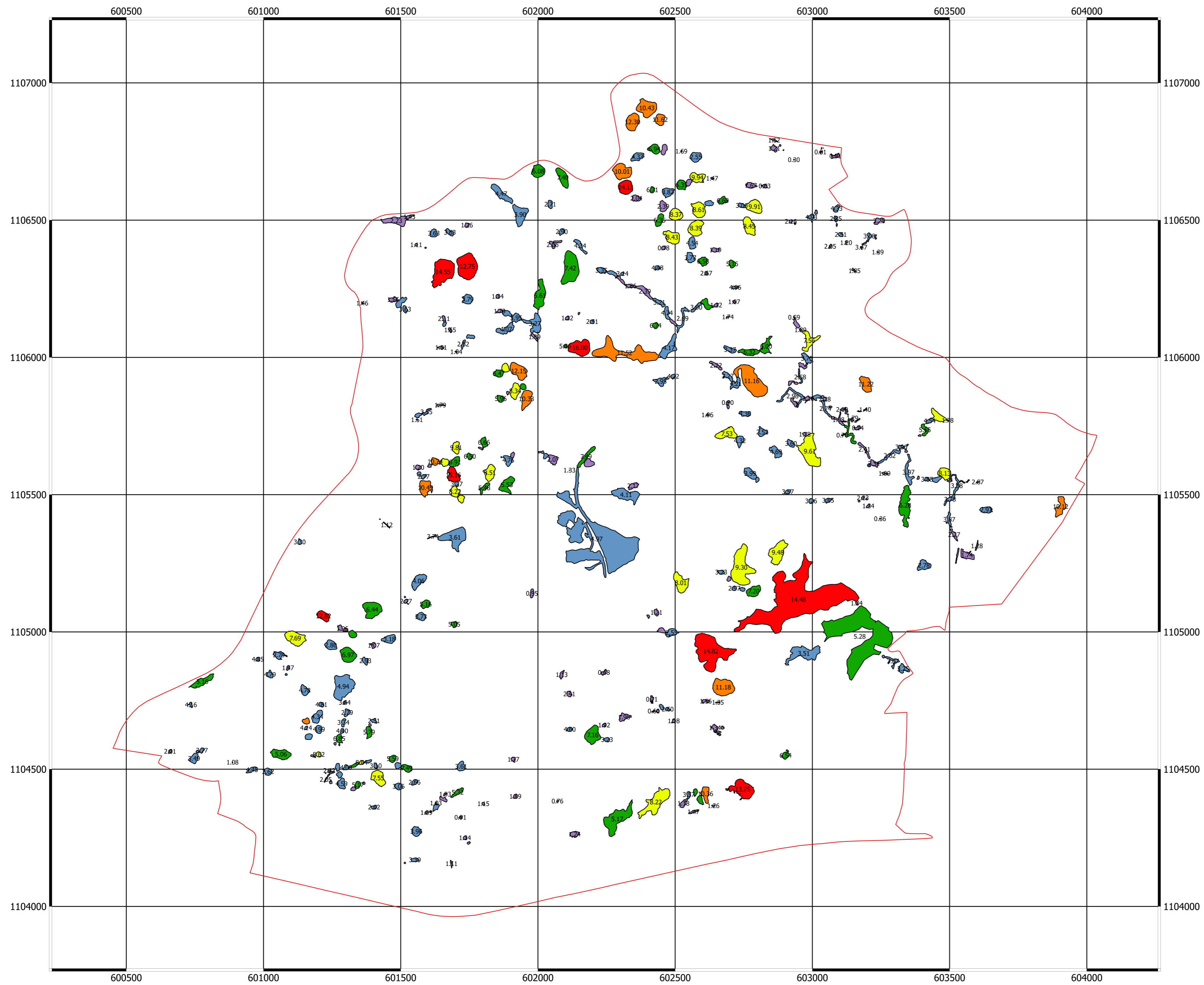
Leyenda

- Límite zona estudio (zona 6)
- Pendiente media (°)
- <10°
- 10°-20°
- 20°-30°
- 30°-40°
- >40°

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367

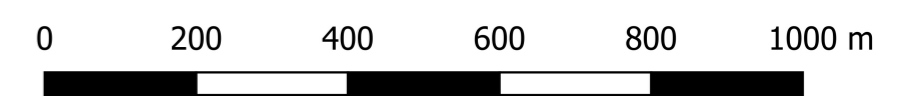


**PROFUNDIDAD DE LA DOLINA  
Zona 6**

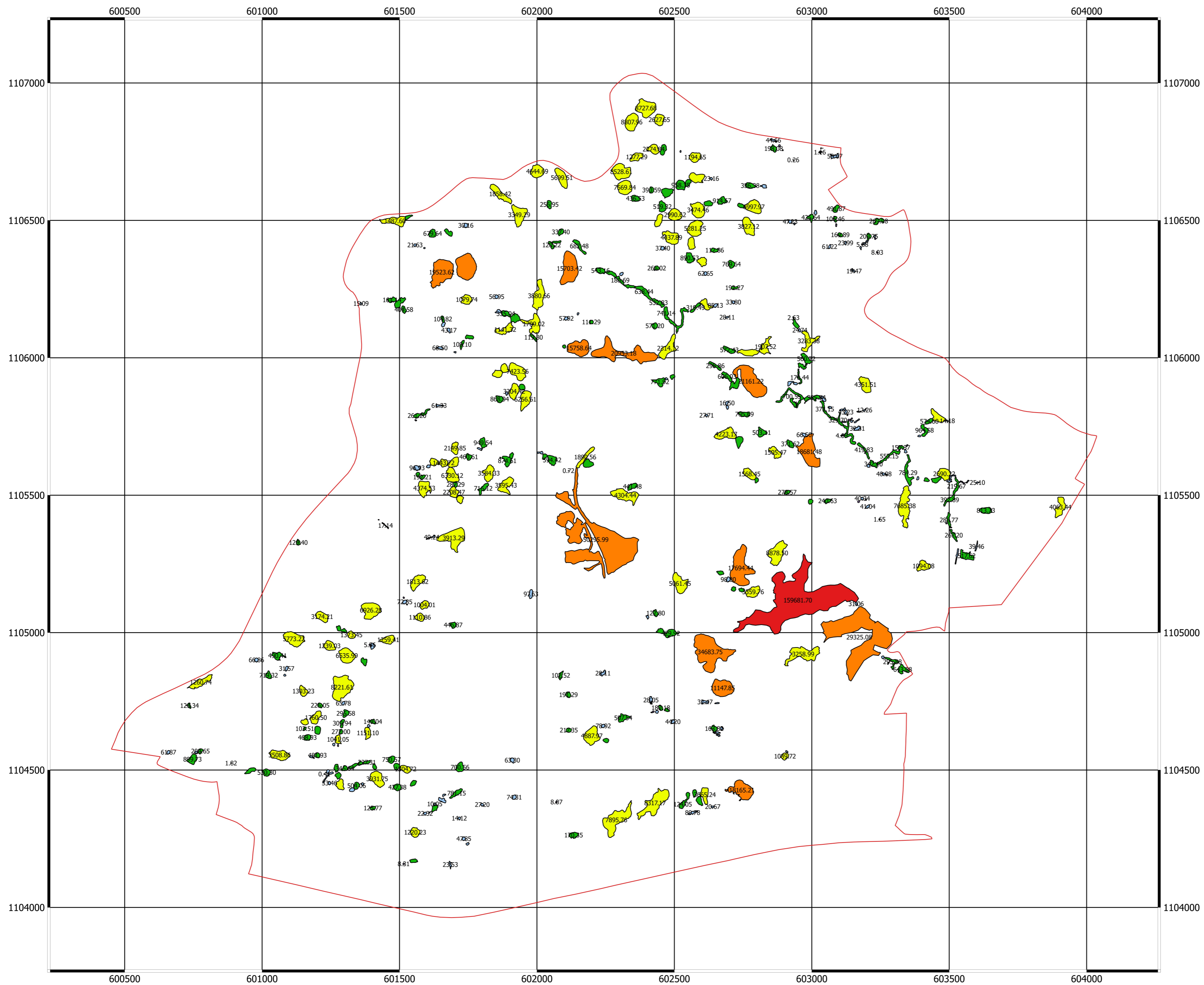
Leyenda

- Límite zona estudio (zona 6)
  - Profundidad (m)
  - 0.00 - 2.50
  - 2.50 - 5.00
  - 5.00 - 7.50
  - 7.50 - 10.00
  - 10.00 - 12.50
  - >12.5
- Valores expresados en m

**Escala 1:10.000**



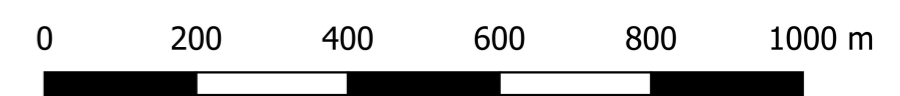
Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367



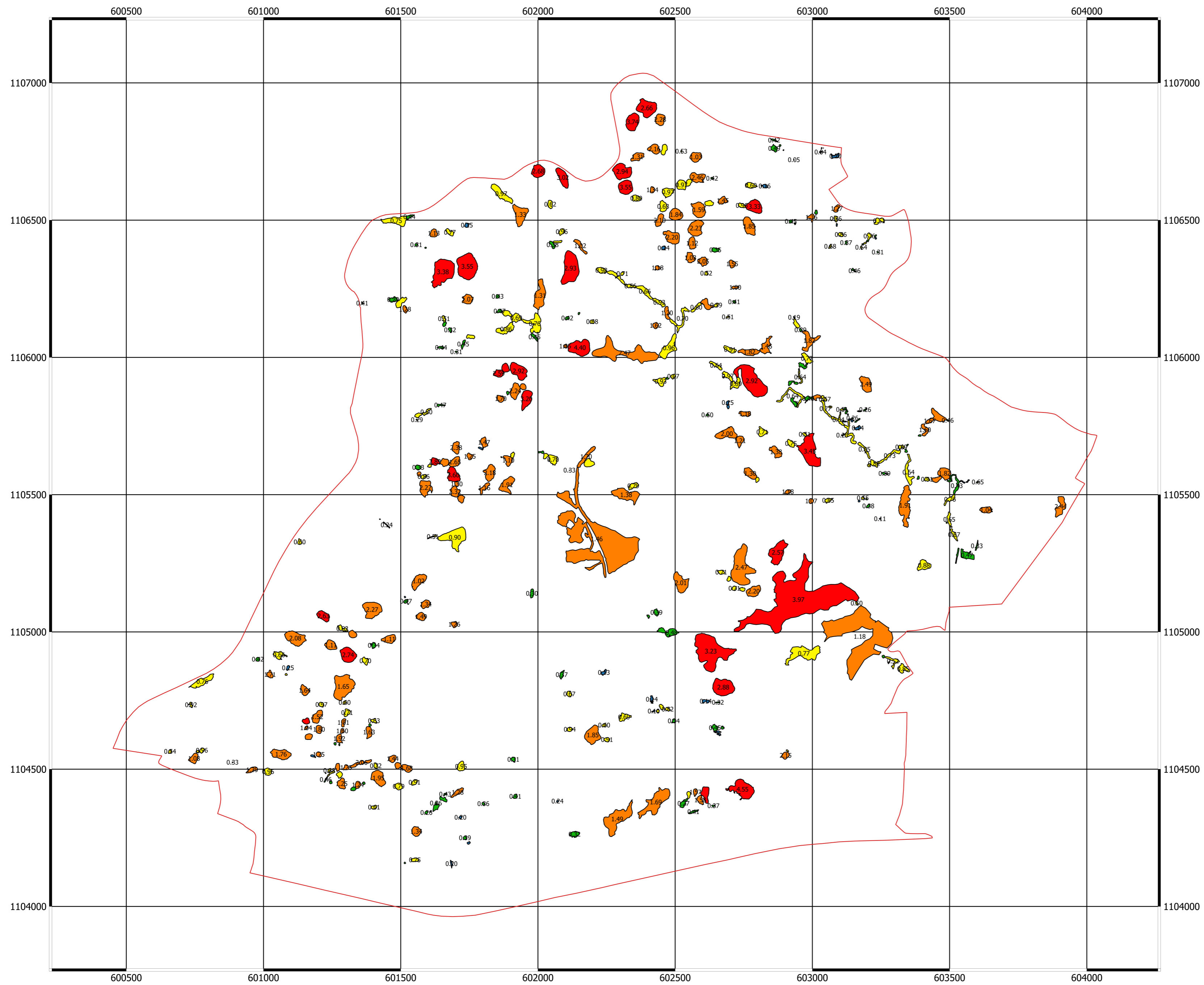
**VOLUMEN DE LA DOLINA  
Zona 6**

- Leyenda**
- Límite zona estudio (zona 6)
  - Volumen (m<sup>3</sup>)**
  - <10
  - 10 - 100
  - 100 - 1000
  - 1000 - 10000
  - 10000 - 100000
  - >100000
- Valores expresados en metros cúbicos.

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367



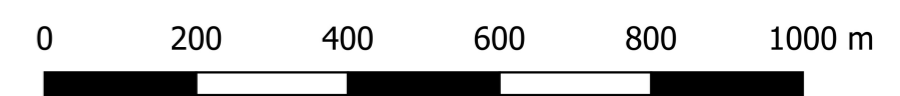
**PROFUNDIDAD VOLUMÉTRICA  
Zona 6**

Leyenda

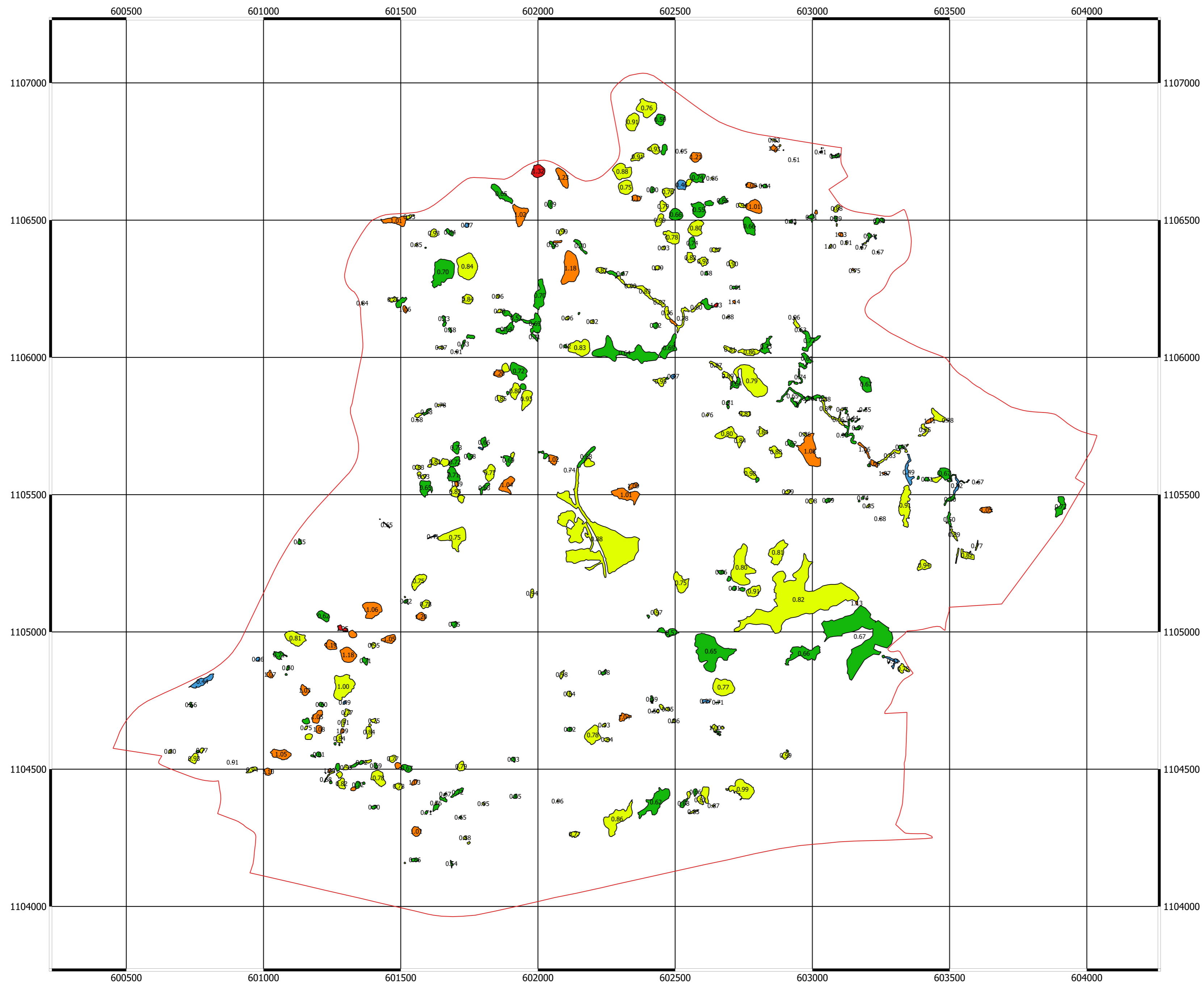
- Límite zona estudio (zona 6)
- Profundidad volumétrica (m)
- 0.00 - 0.25
- 0.25 - 0.50
- 0.50 - 1.00
- 1.00 - 2.50
- 2.50 - 5.00

Valores expresados en metros.

**Escala 1:10.000**



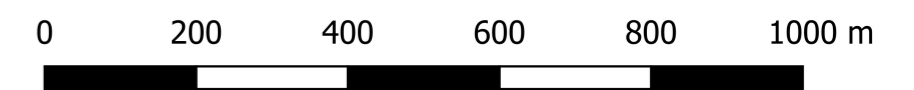
Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367



**COEFICIENTE DE DESARROLLO VOLUMÉTRICO Zona 6**

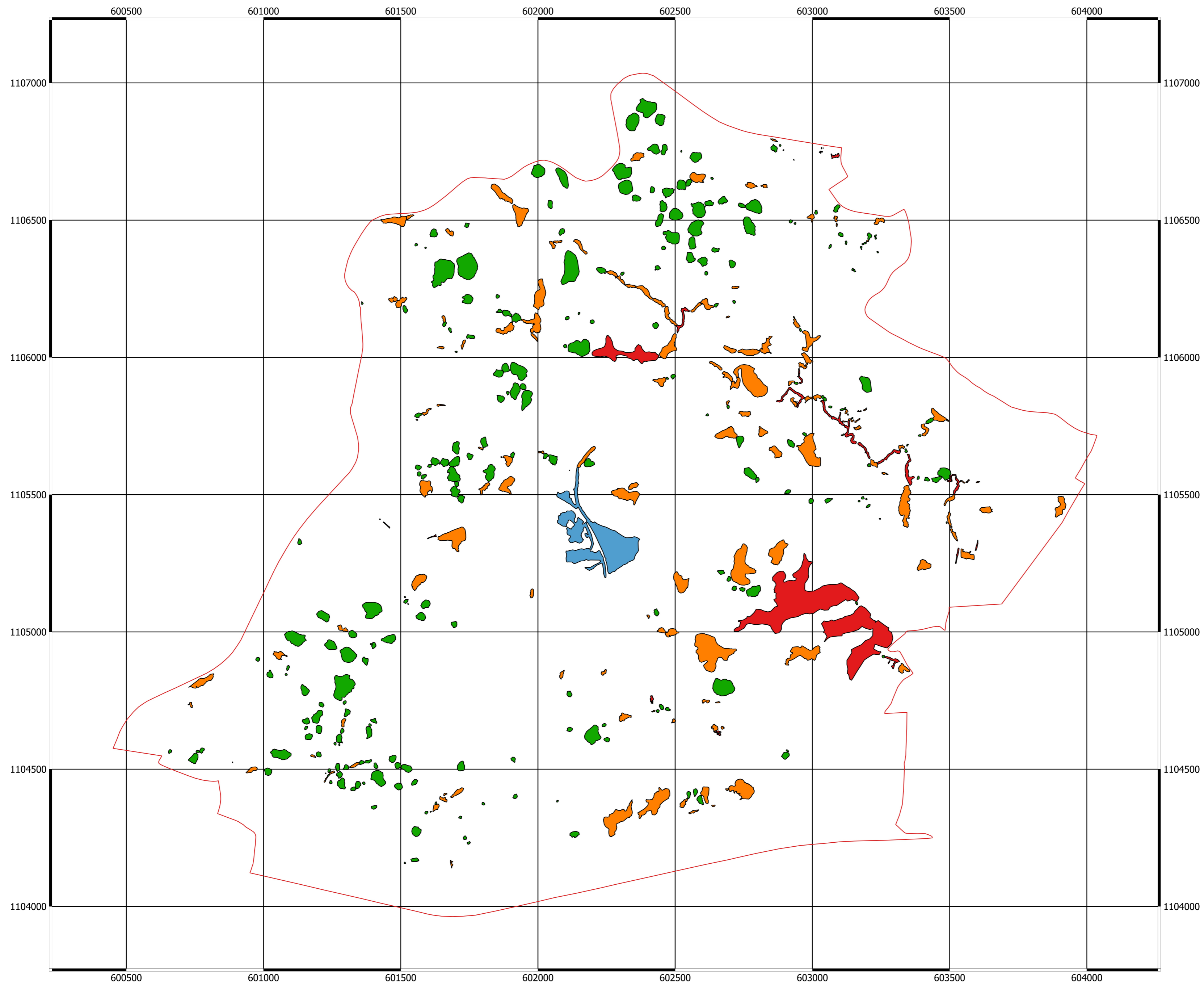
- Leyenda
- Límite zona estudio (zona 6)
  - Coefficiente de desarrollo volumétrico
  - 0.25 - 0.50
  - 0.50 - 0.75
  - 0.75 - 1.00
  - 1.00 - 1.25
  - 1.25 - 1.50

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367



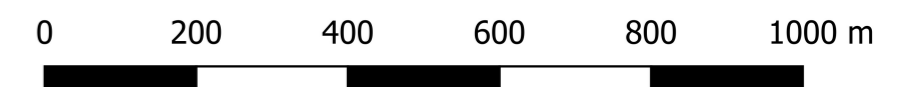


**ÍNDICE DE SINUOSIDAD  
Zona 6**

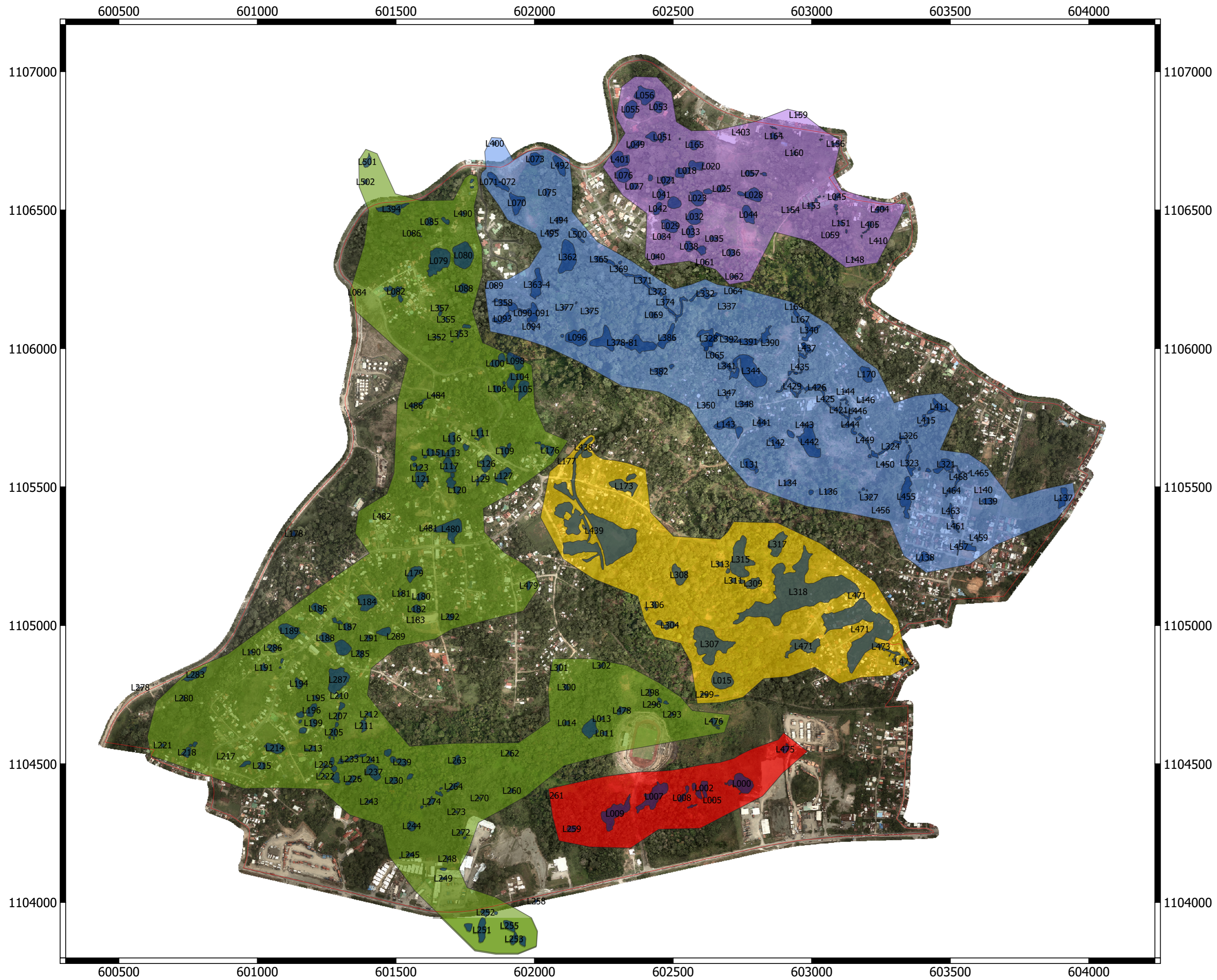
Leyenda

- Límite zona estudio (zona 6)
- dolinas\_areas\_finales naturales zona
- No calculada
- 1.000 - 1.250
- 1.250 - 2.000
- >2.0

**Escala 1:10.000**

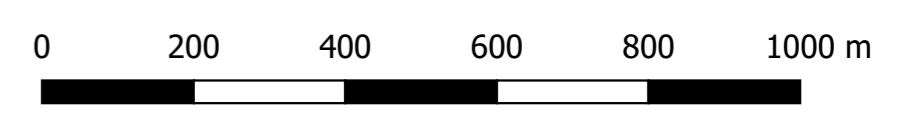


Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367



**CLASIFICACIÓN DE DOLINAS EN ZONAS  
Zona 6**

**Escala 1:10.000**



Sistema de coordenadas: CR05  
 Datum: Costa Rica 2005  
 Elipsoide: WGS84  
 EPSG: 5367