

MANUAL DE AGRICULTURA, DE PRECISIÓN



PROCISUR

Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico
Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur

Argentina
Bolivia
Brasil

Chile
Paraguay
Uruguay



MANUAL DE AGRICULTURA, DE PRECISIÓN

Editores:

Evandro Chartuni Mantovani
*Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuaria (EMBRAPA)*

Carlos Magdalena
*Instituto Nacional de Tecnología
Agropecuaria (INTA)*

**Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico
Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur**

Argentina
Bolivia
Brasil

Chile
Paraguay
Uruguay



ese fin. Sin embargo, debido a los errores que presentan este tipo de aparatos, los mapas planialtimétricos que realizan deben utilizarse en forma restringida a decisiones administrativas de la propiedad rural como, por ejemplo, estimar la cantidad de insumos a ser transportados para una determinada área. Para su uso fuera del contexto administrativo de la propiedad rural, se deben utilizar aparatos de mayor precisión que sigan las legislaciones pertinentes de cada país.

- b. Dirección de máquinas agrícolas: Es conocido el uso del GPS para auxilio de la dirección de máquinas agrícolas en el momento de la distribución de insumos en área (dirección con auxilio de barras de luces), o incluso en la completa automatización de esta operación (pilotos automáticos). Estos sistemas han permitido una mayor eficiencia en dicha distribución, ya que pueden evitar superposición o falla de bandas tratadas. Otra ventaja es la posibilidad de trabajar de noche, lo cual aumenta la capacidad operacional de las máquinas y permite realizar aplicaciones de insumos en horas técnicamente más adecuadas.
- c. Georreferenciamiento de parámetros de suelo y planta: Con la disponibilidad del uso del GPS a partir de la década de 1990, se inició una revolución en el manejo de la producción agrícola, comparando la eficiencia del uso de los insumos en las prácticas de manejo por el rendimiento promedio con el manejo por ambiente (sitio-específico). De esta manera, se proponen diversas técnicas donde se realizan intervenciones en la agricultura, basadas en el georreferenciamiento de las propiedades físico-químicas del suelo, de la nutrición de la planta y de ataques de plagas y enfermedades.

1.2. Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola

Elena Charlotte Landau, Daniel Pereira Guimarães y André Hirsch

Elena Charlotte Landau

Embrapa Maíz y Sorgo
charlotte.landau@embrapa.br

Daniel Pereira Guimarães

Embrapa Maíz y Sorgo
daniel.guimaraes@embrapa.br

André Hirsch

Universidad Federal de São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil.
hirsch_andre@ufsj.edu.br

Introducción

Actualmente, las principales herramientas que posibilitan la aplicación de la agricultura de precisión son: los sistemas de navegación global por satélites (GNSS) y los sistemas de información geográfica (SIG) (MAPA, Brasil, 2013).

Como ya fue presentado, los GNSS (popularmente conocidos como GPS) constituyen receptores de señales satelitales que proporcionan al usuario datos sobre su posición geográfica y altitud, además de permitirle planificar mejor la ruta a seguir para efectuar las demostraciones y luego estimar la extensión de trayectos recorridos. Cuando se conecta el receptor a la maquinaria agrícola utilizada para la cosecha o en un lugar definido por el usuario, se puede registrar informa-

ción sobre la localización geográfica de los datos muestreados, facilitando el georreferenciamiento y el posterior mapeo de la información relevada en el campo.

Los SIG son *softwares* compuestos por varios módulos dedicados al almacenamiento y procesamiento de datos con localización geográfica conocida (geoprocesamiento) que posibilita el análisis de patrones, integración y modelos espaciales, monitoreo, simulación de precisiones y presentación de gran cantidad de información en forma de mapas, gráficos, figuras y sistemas multimedia. No hay consenso sobre la definición de un SIG, pero es reconocida su importancia en la organización e integración espacial de informaciones de diferentes naturalezas, tornando posible relacionar con gran practicidad y relativa precisión una inmensa cantidad de datos, realizar cambios de escala y de proyección cartográfica, y relacionar bases de datos multidisciplinarios, lo cual facilita la solución de problemas reales y concretos, así como la gestión adecuada del espacio geográfico (adaptado de Jones, 1997 y Landau, 2003).

La aplicación de técnicas de geoprocesamiento para el mapeo de la variabilidad espacial de las áreas de producción agrícola representa una herramienta potente para el gerenciamiento de los sistemas de producción, ya que contribuyen a la toma de decisiones para la intervención futura en áreas de baja productividad (como por ejemplo elegir el cultivo que se adapte más, mejorar las condiciones físicas del suelo para reducir su compactación, recomendar determinadas dosis de aplicación de fertilizantes, etc.) (Adaptado de Mantovani et al. 2004).

Otra valiosa fuente de datos al utilizar sistemas de información geográfica está representada por la

adquisición remota (teledetección), que es un conjunto de técnicas para obtener información sobre un objeto, área o fenómeno de la superficie terrestre, sin estar en contacto directo con ellos. A través de la detección, el registro y el análisis del flujo de energía radiante reflejado o emitido por ellos, las técnicas de teledetección permiten la diferenciación de propiedades de los objetivos naturales, posibilitando la identificación de características ambientales como: propiedades del suelo, morfología del terreno, patrones de cobertura vegetal y uso del suelo, etc. A través de los satélites se produce una adquisición continua de datos para todo el mundo, que cubre una misma área periódicamente, en intervalos de tiempo que varían de horas a semanas. Fotografías aéreas, imágenes satelitales e imágenes de radar son productos obtenidos a través de la adquisición remota. Cada una presenta ventajas específicas, comparándose sus escalas originales, los diferentes intervalos del espectro electromagnético de los sensores utilizados y la frecuencia temporal con que las imágenes son obtenidas. La forma como los patrones se encuentran representados en las imágenes puede variar de acuerdo con el sensor, la fecha y el horario de adquisición de la imagen, su resolución, la escala, los parámetros climáticos y las bandas espectrales.

Utilizando las técnicas de geoprocesamiento (procesamiento informatizado de datos referenciados geográficamente), la información sobre cada lugar puede ser georreferenciada, lo que permite representar cartográficamente la variación espacial y/o temporal de las variables conside-

Mayor información sobre el uso de la adquisición remota será abordada en el Capítulo 1.4. Adquisición remota y agricultura de precisión

radas, así como la integración espacial de información georreferenciada proveniente de diversas fuentes como: datos recolectados en el campo con coordenadas geográficas conocidas, mapas temáticos diversos, mapas topográficos, imágenes georreferenciadas obtenidas mediante adquisición remota, modelos espaciales y simulación de escenarios, geoestadística, etc. Datos asociados a diferentes mapas temáticos pueden ser superpuestos espacialmente y comparados o integrados en diferentes secuencias, según los objetivos de cada trabajo.

La representación espacial de datos sobre el área de producción ha contribuido significativamente para la toma de decisiones y esfuerzos para manejar adecuadamente esas áreas, ya que apunta a producir y obtener información que favorezca el gerenciamiento adecuado de insumos y busca la forma de solucionar o mitigar conjuntamente cuestiones de tipo ambiental, social y económico. En este sentido, la aplicación de técnicas de geoprocésamiento utilizando sistemas de información geográfica se ha transformado en una alternativa esencial para la integración espacial de los datos multidisciplinarios a ser considerados.

Organización de datos con Sistemas de Información Geográfica

Una de las principales ventajas de los SIG es poder integrar datos de diversas áreas de conocimiento con diferentes niveles de detalle, lo que permite un enfoque holístico o multidisciplinario en el estudio del área geográfica de interés. Para que esto sea posible, es necesario que toda la información esté organizada en capas o coberturas de información (*layers*), cada capa representada por un conjunto de archivos digitales diferentes, pero

cubriendo todas las capas la misma área geográfica y considerando, preferencialmente, el mismo sistema de proyección cartográfica (Figura 1).

Los mapas constituyen representaciones cartográficas simplificadas de la realidad. Los mapas sobre un determinado tema o aspecto de la realidad son denominados mapas temáticos. En los sistemas de información geográfica, los mapas temáticos pueden estar representados por archivos en formato vectorial (*vector files*) o matricial (*raster files* o *raster datasets*) (Figura 2).

Formato vectorial (*vector file*): es el formato en el cual la localización geográfica de los aspectos mapeados es almacenada y representada por vértices definidos por un único par de coordenadas geográficas (punto), por varios pares de coordenadas geográficas (línea) o por varios pares de coordenadas geográficas si el último par es coincidente con el primer par (polígono) (Figura 2). Como ejemplos de mapas de puntos cabe citar el mapeo de la localización geográfica de áreas de recolección de muestras en el campo, de bebederos de animales, de estaciones meteorológicas, de registros de crecimiento de una determinada especie, de focos de incendios, de postes de energía eléctrica, entre muchos otros. Los trazos que pueden representarse por líneas son: arroyos, ríos de margen simple, caminos captados vía receptores GNSS, carreteras, autopistas, filas de cultivos agrícolas, canales de riego, líneas de transmisión, desplazamiento de animales o materiales, etc. Características que pueden representarse a través de polígonos son: lagunas, represas, límites municipales, estatales o de países, propiedades rurales, haciendas, parcelas plantadas, subdivisiones de áreas de producción agrícola, etc. Algunas características pueden ser representadas

por más de un trazo, pero esto depende de la escala o del nivel de detalle del mapa. Por ejemplo, en un mapa que abarca todo el estado de Minas Gerais (Brasil), una estancia situada en el Estado podrá ser representada por un punto, indicando la localización geográfica de ésta. En un mapa que muestre informaciones sobre la distribución de trabajos de mejoras y cultivos dentro de ese mismo establecimiento rural, el área del establecimiento será representada por un polígono referente a su contorno.

En la mayoría de los SIG, cada trazo geográfico mapeado tiene asociado, además de un par de coordenadas, un campo o número de indexación o registro y otro campo con el tipo de trazo (punto, línea o polígono). De acuerdo al interés, también pueden crearse campos adicionales, a los cuales pueden asociarse atributos descriptivos espaciales (altitud, longitud, área, perímetro, pendiente) y no espaciales (cultivo, número de matrícula, año de catastro, fecha del cultivo, estado de desarrollo del cultivo, nombre del responsable, link para fotografía digital, observaciones). Los atributos descriptivos pueden estar representados por variables cuantitativas o cualitativas. Todos los atributos son organizados en una tabla de atributos (ATT por su sigla en inglés) o base de datos relacional (DBF por su sigla en inglés) asociada intrínsecamente al archivo digital del mapa. Las consultas a la base de datos relacional asociada al mapa permiten responder cuestiones como: ¿qué existe en un determinado lugar? y ¿cuáles son los lugares que tienen una o más características de interés? Archivos con extensiones SHP (*shapefiles*), DXF (*drawing exchange format*), DGN (*design*) y KML (*keyhole markup language*) son ejemplos de mapas digitales en formato vectorial.

Formato matricial (*raster file* o *raster dataset*): Es aquel formato en el cual el área geográfica es representada por una matriz $M(i,j)$, compuesta por i columnas y j líneas, que definen celdas regulares, cuadradas o rectangulares, denominadas píxeles (*picture elements*) (Figura 2). Cada píxel, además de un par de coordenadas geográficas, tiene asociado un valor referente al atributo representado, como por ejemplo: los valores de reflectancia de una imagen satelital, las clases de cobertura vegetal, los tipos de uso del suelo, la aptitud agrícola para un determinado cultivo, la cantidad de fertilizante utilizada, la productividad por hectárea, entre muchos otros.

Archivos con extensiones GeoTIFF, IMG, JPEG, JPEG2000, MrSID (formato mucho más comprimido leído por diversos programas SIG), DEM y SDTS son ejemplos de archivos digitales en formato matricial⁶.

El píxel es la menor unidad física de representación de la información en una pantalla, en un proyector, o en un televisor digital de pantalla plana, *smartphone* o *tablet*. En cualquier archivo matricial o raster dataset, como imágenes satelitales, fotografías aéreas digitalizadas, mapas escaneados a partir del papel y fotografías digitales comunes a personas, objetos o paisajes, el píxel puede ser considerado la menor celda de direccionamiento de coordenadas geográficas y de un atributo, como los valores de reflectancia de una imagen satelital, las clases de suelo en un mapa temático digital, o los colores de una fotografía digital. El tamaño del píxel define la resolución espacial y la

6 Por siglas en inglés: GeoTIFF (geocoded tagged image file format), IMG (image raster dataset), JPEG (joint photographic experts group), JPEG2000 (joint photographic experts group 2000), MrSID (multi-resolution seamless image database), DEM (digital elevation model) y SDTS (spatial data transfer standard).

escala de mejor visualización de una imagen digital, como por ejemplo, 90 m en un archivo SRTM (escala de 1:340.200), 30 m en una imagen de satélite Landsat (escala de 1:113.400), 10 m en una imagen de satélite SPOT (escala de 1:37.800), o 1 m en una imagen de satélite IKONOS (escala de 1:3.780). Cuanto mayor el tamaño del píxel, menor la resolución espacial o el nivel de nitidez y detalle de la información representada.

En términos comparativos, cabe mencionar que cada tipo de formato presenta ventajas y desventajas. En general, los archivos vectoriales son fácilmente manejados por el procesador de las computadoras, principalmente porque ocupan poco espacio en la memoria durante la realización de los cálculos y ocupan poco espacio en el disco duro (HD por su sigla en inglés) para su grabado. Además, la nitidez es independiente del zoom aplicado en el monitor de la computadora, porque al aumentar o disminuir el zoom, un punto siempre continúa siendo un punto y una línea continúa siendo una línea. Por otro lado, los archivos matriciales exigen mayor procesamiento por el hecho de que la representación de la información está asociada a una matriz cuadrada o rectangular de píxeles alrededor del trazo en sí, o sea, incluso píxeles que poseen valor 0 (cero) o valor inexistente (*missing value*) forman parte del archivo y exigen tiempo de procesamiento, ocupan memoria y necesitan espacio en el disco duro. Además, la visualización está comprometida por el zoom aplicado en la pantalla. En el caso de archivos vectoriales con gran cantidad de datos, el tamaño de los archivos y el tiempo de procesamiento pueden exceder significativamente el tiempo necesario para la realización de cálculos, al comparar con el tiempo necesario para realizar

las mismas operaciones si el mapa estuviese en formato matricial.

Los programas de SIG deben ser capaces de convertir archivos de formato vectorial para matricial y viceversa. Siempre es preferible realizar este proceso en el sentido vectorial-matricial y no en el sentido matricial-vectorial, porque en este último caso, generalmente, pueden ocurrir pérdidas de datos ya que en el momento de convertir un punto para un píxel, por menor que sea el tamaño del píxel resultante, se pierde una característica puntual. Lo mismo ocurre con datos anteriormente representados por líneas finas. Considerando como ejemplo un mapa de líneas en que las líneas representan arroyos con un ancho de 3 m; al convertir una línea vectorial para formato matricial con píxel de 5 m de lado, por ejemplo, la línea que re-

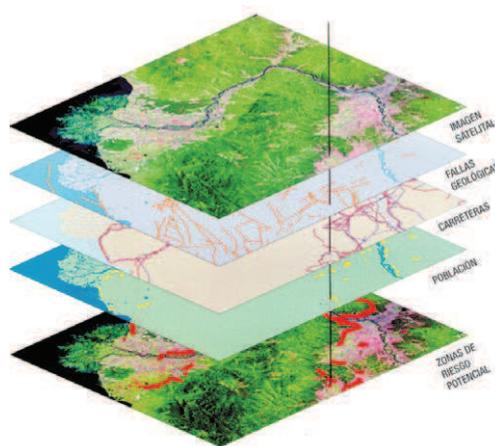


Figura 1. Ejemplo de organización de datos en SIG, que posibilita la integración espacial y/o temporal de información multidisciplinaria representada en mapas temáticos o layers (Fuente: Environmental Systems Research Institute, ESRI)

presenta el arroyo pasará a tener el mismo ancho correspondiente al tamaño del píxel, o sea, 5 m de ancho, lo que no corresponde a la realidad (Figura 2). Diversos programas de SIG trabajan con los dos formatos de archivos.

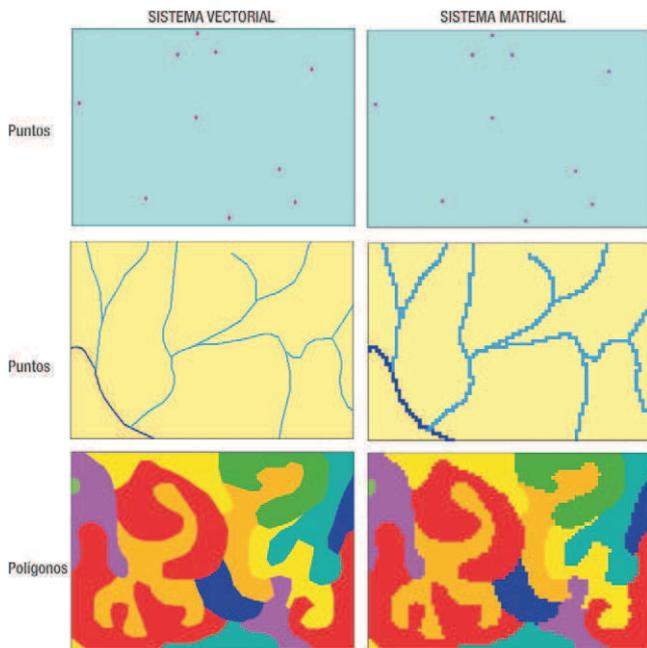


Figura 2. Ejemplos de trazos puntuales, lineales y poligonales representados en los sistemas vectoriales (izquierda) y matricial (derecha)

Escala geográfica de mapeo

En cartografía, la escala de mapeo indica la relación matemática existente entre las dimensiones de los elementos representados en un mapa, una carta, un plano, una imagen satelital o una fotografía aérea y sus dimensiones reales en el terreno, o sea, en cuántas veces el tamaño real fue dividido o reducido en el mapa. Por ejemplo, 1:100.000, se lee “escala de uno a 100 000”, y significa que la superficie terrestre representada en el mapa fue reducida 100 mil veces.

La escala constituye uno de los elementos esenciales de un mapa, juntamente con la leyenda, la orientación con relación al Norte, la localización geográfica del área representada y la fuente de la base cartográfica. Cuanto mayor sea la escala geográfica, menor será el área abarcada por el mapa y, consecuentemente, mayor la cantidad de detalles presentados en el mapa. En un producto cartográfico pueden aparecer dos tipos de escala:

Escala métrica o numérica: Es representada por una proporción en la cual el numerador indica la distancia en el mapa (d) y el denominador, la distancia correspondiente en el terreno (D), como “ $d : N$ ” o “ $1 : N$ ”.

Escala gráfica: Esta escala representa las distancias en el terreno sobre una regla graduada. Normalmente, la parte de la izquierda está dividida en décimos, facilitando la medición de distancias con mayor precisión. La escala gráfica debe aparecer obligatoriamente en el mapa generado, para mantener la relación entre el layout del mapa presentado y el tamaño real. Esto garantiza que la escala será mantenida en el caso de ampliaciones para proyecciones utilizando multimedia o reducciones para ajuste al tamaño de la página de algún trabajo en que los mapas sean presentados.

Además de la escala de representación del mapa, es importante especificar la escala de la(s) fuente(s) cartográfica(s) considerada(s), lo cual permite que no se representen cartográficamente datos en una escala mayor que la relacionada con la resolución espacial de los datos presentados.

Proyecciones cartográficas

Aunque la Tierra no sea una esfera perfecta, se considera que un globo geográfico representa aproximadamente su formato. Pero la representación cartográfica de una superficie curva en un plano de dos dimensiones (hoja de papel, pantalla), teniendo que mantener ángulos rectos en el cruzamiento entre meridianos y paralelos, requiere la adopción de proyecciones cartográficas. Así, la importancia de las proyecciones cartográficas deriva de la necesidad de proyectar una superficie esférica y tridimensional (la Tierra) en una superficie plana bidimensional, manteniendo ángulos rectos en el cruzamiento de los meridianos con los paralelos, lo cual es imposible sin hacer extensiones y/o contracciones.

Las proyecciones cartográficas posibilitan la representación del globo terrestre, continentes o áreas geográficas de menor tamaño en una superficie plana, generalmente en una hoja de papel o pantalla, permitiendo su trazado en forma de mapas, cartas y planos que representan proporcionalmente su dimensión, forma y ángulos de la manera más próxima posible de la realidad. Existen centenas de proyecciones cartográficas, cada una adecuada para representar todo el mundo, determinado continente, país o región geográfica.

Tomando como referencia la superficie de proyección, las proyecciones cartográficas se clasifican en tres grandes grupos (Figura 3):

- **Proyecciones planas o acimutales:** la superficie de proyección es un plano, por ejemplo: proyección plana polar.
- **Proyecciones cónicas:** la superficie de proyección es un cono, como por ejemplo la proyección cónica de Albers.
- **Proyecciones cilíndricas:** la superficie de proyección es un cilindro, por ejemplo: proyección de Mercator, proyección cilíndrica de Peters.

Todas las proyecciones cartográficas presentan distorsiones, mayores o menores, en función de tres variables: área, distancia y/o dirección (Figura 3). Considerando propiedades relacionadas con la deformación de la superficie terrestre en cuanto a las áreas, las distancias y las direcciones (o ángulos), las proyecciones cartográficas son además clasificadas en tres grandes grupos:

- **Proyecciones conformes:** También conocidas como ortomórficas, pues poseen la propiedad de no deformar los ángulos. En estas proyecciones, los paralelos y meridianos se cruzan en ángulos rectos y la escala alrededor de un punto se mantiene para cualquier dirección. Son por ejemplo: la Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y la Proyección Cónica Conforme de Lambert; ambas utilizadas en el mapeo sistemático de Brasil.
- **Proyecciones equidistantes:** Son las proyecciones que no presentan deformaciones lineales, o sea, las distancias son representadas en una escala uniforme. Sin embargo, esta condición solo se alcanza en determinada dirección, y puede ser

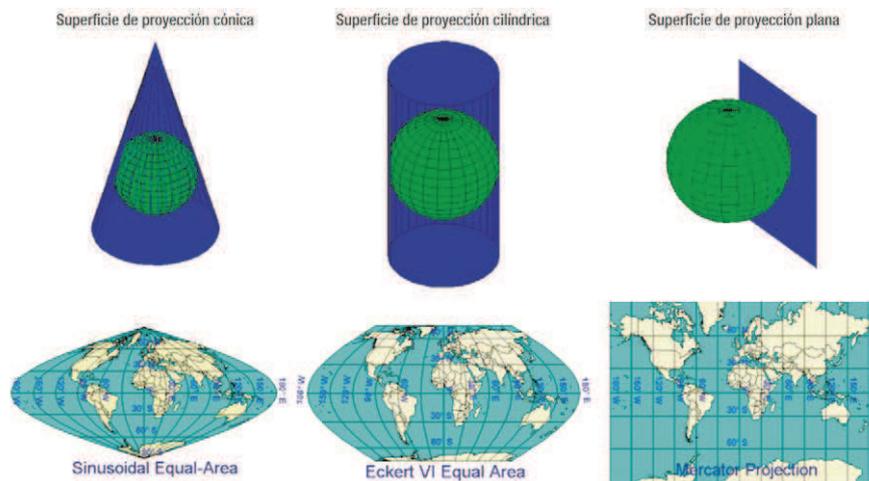


Figura 3. Tipos de proyecciones cartográficas adoptados para el mapeo de datos geográficos en dos dimensiones (hoja de papel, pantalla de computadora) (Fuente: Peter H. Dana, 20/set/1994)

clasificada además en: meridiana, transversal y azimutal u ortodrómica. Es menos utilizada que las proyecciones conformes o equivalentes porque raramente se precisa un mapa con distancias medidas considerando una única dirección. Por ejemplo: proyección equidistante cónica.

- Proyecciones equivalentes: Estas proyecciones no deforman áreas y conservan una relación constante con la superficie terrestre, en términos de área. Debido a sus deformaciones no son adecuadas para la cartografía básica, pero son de mucho interés para la cartografía temática. Ejemplo: proyección de Miller, proyección de Berhmann, proyección de Albers.

La proyección universal transversa de Mercator (UTM) es frecuentemente utilizada para el mapeo de áreas con poca extensión en el sentido este-oeste,

iguales o menores de 6° de longitud. En Brasil, los mapas en escalas de 1:250.000 y mayores, elaborados por el Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE) y la Dirección de Servicio Geográfico (DSG), se encuentran en la proyección UTM.

Además de la proyección cartográfica, asociado a cada mapa también deben ser especificados el "Datum" y el sistema de coordenadas geográficas considerados (ya presentados en el apartado anterior 1.1. Uso del Sistema de Posicionamiento Global en la caracterización de áreas agrícolas. Los sistemas de información geográfica permiten fácilmente realizar conversiones entre proyecciones cartográficas, "Data" y/o sistemas de coordenadas, posibilitando la estandarización e integración de información multidisciplinaria, subsidiando la toma de decisiones.