

Delimitación de unidades geomorfológicas mediante la aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes y SIG. Área no irrigada del departamento de Lavalle, Mendoza¹

Delimitation of geomorphological units by applying techniques of digital image processing and GIS. Non-irrigated area: Lavalle, Mendoza.

Lic. Cecilia Rubio, Téc. Darío Soria, Mc. Mario Salomón y Prof. Elena Abraham²

Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en la delimitación, a escala 1:100.000, de las principales unidades morfogénicas y, a un mayor nivel de detalle, de las geoformas dominantes del área no irrigada, departamento de Lavalle. Esto se realiza a partir del análisis geoespacial, que incluye el procesamiento digital de imágenes satelitales y la utilización de Sistemas de Información Geográfica. En constante interacción con las técnicas de geoprocésamiento, se trabaja con información de campo obtenida en el área de estudio. A partir de la aplicación del método de relevamiento integral del paisaje se generan bases de datos temáticas y espaciales que permiten validar los resultados obtenidos en laboratorio para delimitar las formas del relieve. Se definieron las principales unidades morfoestructurales y las geoformas de acuerdo a su morfogénesis. Se toma como base el mapa geomorfológico de Mendoza (Abraham, 2000), ajustado espacialmente y ampliado temáticamente sobre las fuentes cartográficas y temáticas generadas por LaDyOT-IADIZA (2004-2009). El trabajo constituye una contribución metodológica a métodos de procesamiento telemétrico y digital a partir de trabajos de campo y análisis interpretativo de carácter analógico, en tanto los productos obtenidos permiten lograr información geoespacial estructurada en el ámbito de los SIG para diversos fines.

Palabras claves: unidades morfogénicas, geoformas, geoprocésamiento, procesamiento digital de imágenes, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Lavalle.

Abstract

The aim of this work was the definition, scale 1:100000, of the major morphogenetic units, and increased the level of detail, the dominant landforms of the area not irrigated Lavalle Department. This has been based on geospatial analysis, which includes the digital processing of satellite images and the use of Geographic Information Systems. In constant interaction with the application of geo-processing techniques, we worked with the information obtained from field analysis in the study area. Since the method of survey of the landscape were generated thematic databases and space to validate the laboratory results when defining the geoforms. Thus, the main units were defined morphostructural units and landforms according to their morphogenesis. It was derived from the geomorphologic map of the province of Mendoza (Abraham, 2000). The same was adjusted spatially and thematically expanded on the basis of cartographic and thematic sources generated LaDyOT-IADIZA (2004-2009). The work is a methodological contribution to processing methods and digital telemetry from fieldwork and interpretive analysis of a similar nature. While the products obtained can achieve structured geospatial information in the field of GIS for various purposes.

Key words: morphogenetic units, landforms, geoprocessing, digital image processing, Geographic Information Systems (GIS), Lavalle.

¹ Este trabajo es el producto de diversos proyectos llevados a cabo por el LaDyOT a lo largo de más de seis años en el desierto de Lavalle, entre ellos pueden destacarse LADA (FAO) (2004-2010), BID-IICA (2002-2005), PICT 13-15034 (2004-2008), entre otros.

² Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorial (IADIZA) CCT Mendoza, CONICET, Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral. San Martín, 5500, Mendoza, Argentina. LaDyOT@lab.cricyt.edu.ar, www.cricyt.edu.ar/ladyot; Asociación de Inspecciones de Cauces Primera Zona Río Mendoza (ASIC). Ricardo Videla 8325. Lujan de Cuyo. Mendoza. www.asicprimerazona.com.ar ndsoria@lab.cricyt.edu.ar, crubio@lab.cricyt.edu.ar, abraham@lab.cricyt.edu.ar, salomonmario@yahoo.com.ar

Introducción

En el marco de la evaluación y monitoreo constante de la desertificación llevado a cabo por el equipo de trabajo de LaDyOT-IADIZA desde el año 2004, en el departamento de Lavalle, la obtención de esta capa cartográfica con gran nivel de detalle y consistencia temática y espacial, resulta de gran utilidad. Su obtención posibilita relacionarla con otros elementos del sistema y de este modo comprender las dinámicas y los procesos que se desarrollan en el territorio.

El uso de técnicas de procesamiento geoespacial, integrado por el procesamiento digital de imágenes (PDI) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), en conjunto con relevamientos detallados, a partir de la elaboración de una guía de observación de campo consistida, constituyen herramientas imprescindibles al momento de delimitar unidades de relieve. La aplicación de técnicas específicas, como son la realización de modelo digital de elevación (MDE), la definición de curvas de nivel, modelización de la topografía, delimitación de cuencas hidrográficas, la esquematización de la red de drenaje y el procesamiento de imágenes, entre otras, permite una descripción detallada de las formas de relieve.

Área de estudio

El área no irrigada del departamento de Lavalle se extiende íntegramente en el ámbito de la gran llanura aluvial del este de Mendoza. Se caracteriza por una gran homogeneidad de sus ambientes eólicos y fluviales: grandes cadenas de médanos vivos y semifijos por su composición y cobertura vegetal, depresiones intermedanosas, cauces y paleocauces de los grandes ríos alóctonos y un sistema de lagunas y bañados que ocupa los bordes de esta gran cuenca de sedimentación (Abraham, 1983).

El clima de la región es de tipo desértico según la clasificación de Strahler (1984), para todas las regiones con precipitaciones menores de 250 mm. La precipitación media anual en Encón es de 103,7 mm y en El Retamo de 81,2 mm, mientras que la temperatura máxima absoluta es de 48°C y la elevada heliofanía aumenta la temperatura del suelo a más de 60°C. En la estación fría la mínima absoluta es -10°C. (Estrella et al., 1979).

Desde el punto de vista biogeográfico, el área de estudio se inscribe en la "Provincia fitogeográfica del Monte", donde la vegetación está representada por la estepa de arbustos, comunidad climática dominada por Zigofiláceas del género *Larrea*, la estepa

edáfica de halófitas y el estrato arbóreo de tipo edáfico azonal dominado en Mendoza por *Prosopis flexuosa* (Roig, 1972, Abraham et al., 2009). Esta especie forma bosques abiertos, en dependencia con las napas freáticas, por eso se lo denomina “bosque freatófito”. La estepa de arbustos está regida por el tipo árido y semiárido del clima, en cambio el desarrollo del bosque depende de la disponibilidad hídrica subterránea (Morello, 1958).

En el desierto de Lavalle se encuentran suelos de escaso desarrollo o Entisoles, debido a la influencia de clima de tipo árido. Estos son ligeramente salinos, a veces sódicos y pueden tener carbonato de calcio y yeso en la superficie (Regairaz, 2000).

En el momento actual el paisaje es fiel exponente del clima árido. En un pasado cercano constituyó un sistema lagunar de considerable extensión: el sistema de lagunas y bañados de “El Rosario-Guanacache”, alimentadas por los ríos San Juan y Mendoza, y las lagunas y bañados del borde oriental de la cuenca, alimentadas por el río Desaguadero.

Actualmente el sistema sólo recibe el esporádico aporte de los desagües de los ríos San Juan y Mendoza, en el sistema noroccidental y del Desaguadero en el oriental (Abraham y Prieto, 1991).

El área de estudio se encuentra comprendida en el 75% del territorio nacional, afectado fuertemente por procesos de desertificación (Abraham et al., 2003). En este caso particular se señalan como factores determinantes el déficit hídrico y los intensos procesos de salinización y alcalinización; a los que se suman la presión humana en el uso de los recursos, especialmente presión ganadera y uso de madera y leña.

Históricamente, este territorio ha sido afectado por el sobrepastoreo y la tala de los bosques de algarrobos.

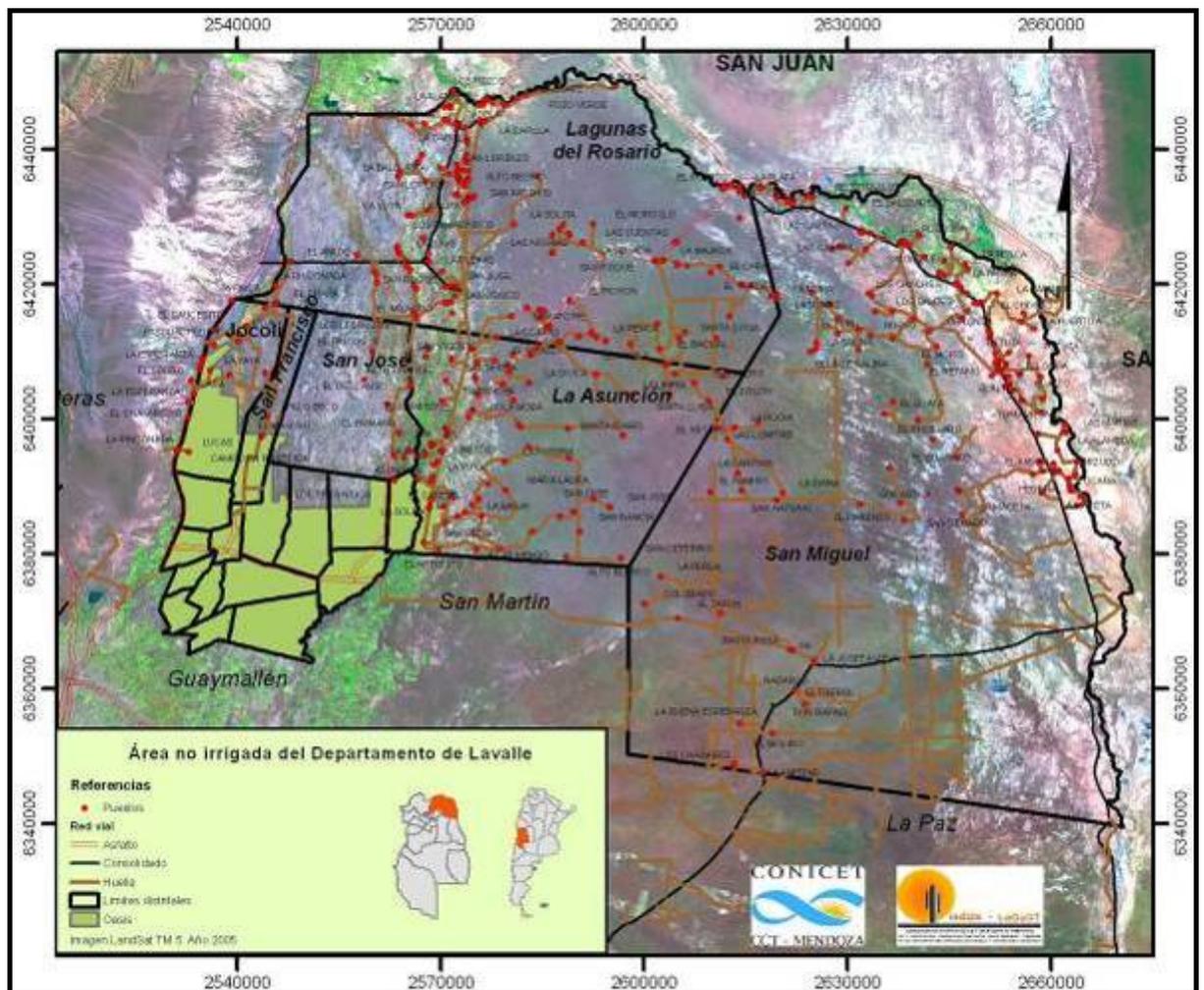
A fines del siglo XIX, comienzos del XX, en el área de estudio aun existían bosques discontinuos de *Prosopis*. A partir de la llegada del ferrocarril, y la explotación de madera para la producción de leña, carbón, y especialmente varas, rodrigones y postes para la conducción del viñedo en el oasis, comenzó el empobrecimiento del bosque primitivo, hasta el punto de conservarse en la actualidad, sólo relictos de su primitiva extensión (Abraham y Prieto, 2000).

En cuanto la población del área de estudio, se caracteriza por ser típicamente rural, descendiente huarpe, con un patrón de asentamiento disperso y con muy baja densidad

(aproximadamente 2000 habitantes), organizados en 510 puestos según expedientes de inscripción al Programa Arraigo de Puesteros. La actividad económica dominante es la silvo-pastoril, con una explotación ganadera extensiva de vacunos y caprinos y el uso de los recursos del bosque para madera y leña.

La población aprovecha el manto freático para el abastecimiento de agua para uso humano y animal. Como característica sociológica relevante, dicha población se encuentra en situación de exclusión social y presenta NBI -Necesidades Básicas Insatisfechas- (Torres et al., 2003). La zona ha sido sometida desde el siglo pasado a importantes procesos de degradación que han intensificado la desertificación; situación que ha arrojado y arroja a su población a una acentuada condición de exclusión social y pobreza (Fig. Nº 1).

Fig. Nº 1 - Área no irrigada del departamento de Lavalle



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Antecedentes

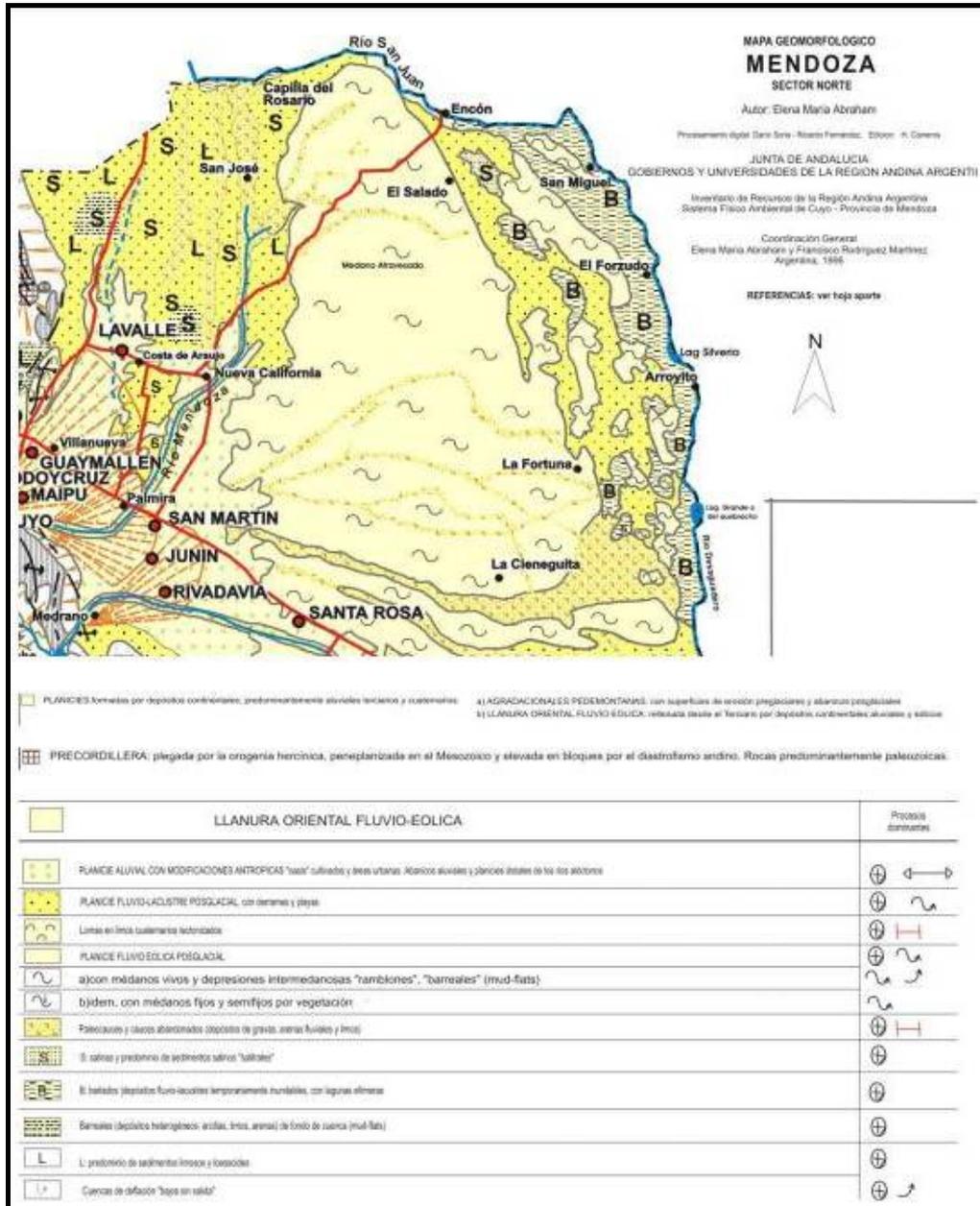
La geomorfología del área no irrigada del departamento de Lavalle ha sido analizada y representada principalmente en el Mapa Geomorfológico de Mendoza (Abraham, 2000), donde se caracteriza al área de estudio como una gran Planicie, denominada Llanura Oriental Fluvio Eólica o “Gran Llanura de la Travesía”. Este mapa, elaborado en escala 1:500.000, pone énfasis en la delimitación de las grandes unidades morfoestructurales que agrupan las distintas geoformas y procesos morfodinámicos a nivel provincial.

La realización de esta carta se hizo sobre la base metodológica de los trabajos de GMK (Comisión Alemana para el Mapeo Geomorfológico Complejo). Esta metodología tiene como propósito organizar el contenido del mapa en “estratos” de información, sistematizando de este modo la representación gráfica.

Se toma como principales fuentes de información a las cartas geológicas publicadas (escala 1:250.000), las imágenes satelitales y fotografías aéreas disponibles y el volcado directo de la información obtenida en el relevamiento y control de campo. Posteriormente, se organiza la representación gráfica en el mapa priorizando las grandes unidades morfoestructurales (color-trama de fondo), las unidades del relieve y subunidades hasta geoformas (morfografía), las informaciones hidrográficas y de infraestructura y toponimia.

Los resultados sobre morfogénesis, morfocronología y procesos dominantes por geoforma se estructuran en una extensa leyenda, donde se relacionan todos los niveles de información del mapa (Abraham, 2000) (Fig. N° 2).

Figura Nº 2 - Mapa geomorfológico de Mendoza. Sector Norte



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Materiales y métodos

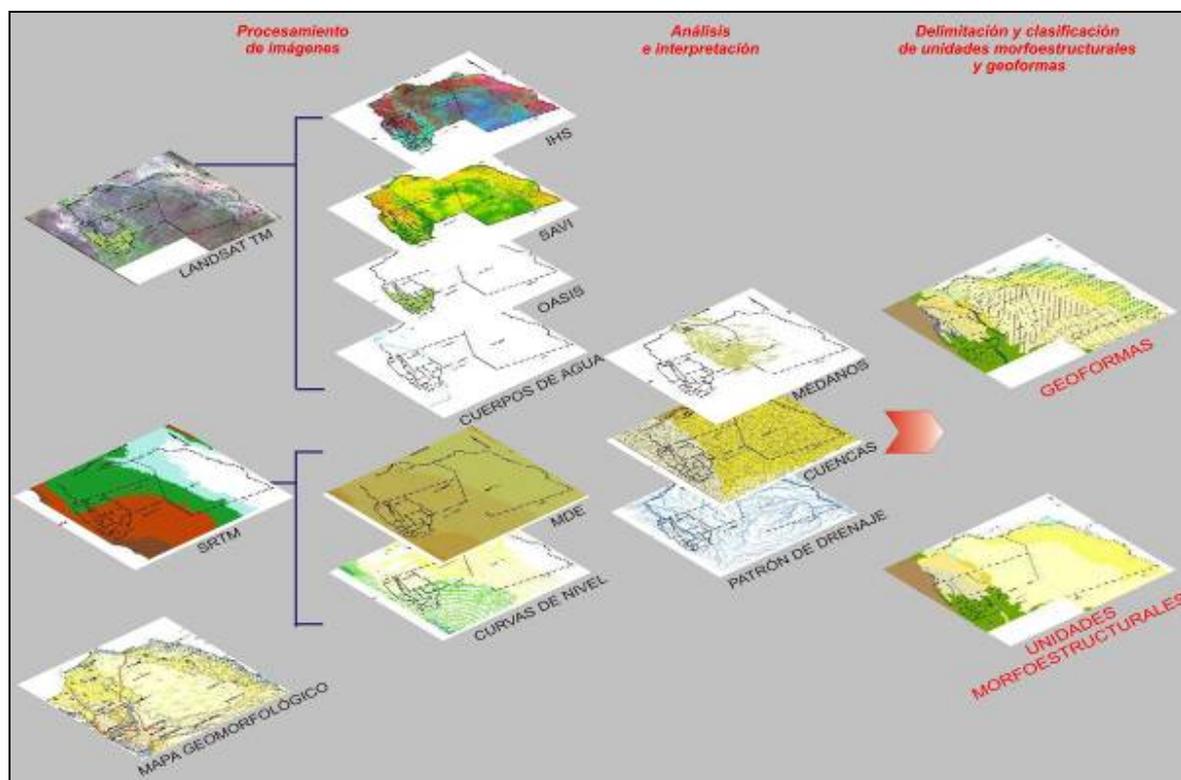
Dada la necesidad de manejar información con un mayor nivel de detalle para el área no irrigada del departamento de Lavalle, en escala 1:100.000, se procede a realizar la identificación de las principales unidades morfoestructurales, morfogenéticas y geoformas, sobre la base del procesamiento digital de imágenes satelitales, el uso de SIG y relevamientos integrales del paisaje.

Para la elaboración de la capa de información se parte de la digitalización de las principales unidades geomorfológicas identificadas sobre diferentes fuentes de datos. Principalmente se trabaja con el procesamiento digital de imágenes y la interpretación de las mismas, complementado con otras capas de información y técnicas de digitalización de las unidades y subunidades identificadas. Al momento de definir las unidades homogéneas, se tuvo en cuenta la información sistemática obtenida en ochenta puntos de muestreo de relevamiento integral del paisaje.

El criterio utilizado para la regionalización fue partir de las unidades definidas por Abraham (2000), para posteriormente ajustarlas y reclasificarlas de acuerdo a la interpretación del Modelo Digital de Elevación (MDE), curvas de nivel, modelo intensity-hue-saturation (IHS), líneas de médanos, cobertura vegetal, segmentación de cuencas hidrográficas, red de avenamiento, mapa de cuerpos de agua superficial, mapa de oasis y datos del relevamiento de campo (Fig. Nº 3).

Las unidades se definieron a partir de criterios hidrogeomorfológicos, clasificándolas de acuerdo al proceso formador que les dio origen.

Figura Nº 3 - Esquema lógico del procedimiento realizado



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Mapa geomorfológico de la provincia de Mendoza, Abraham (2000)

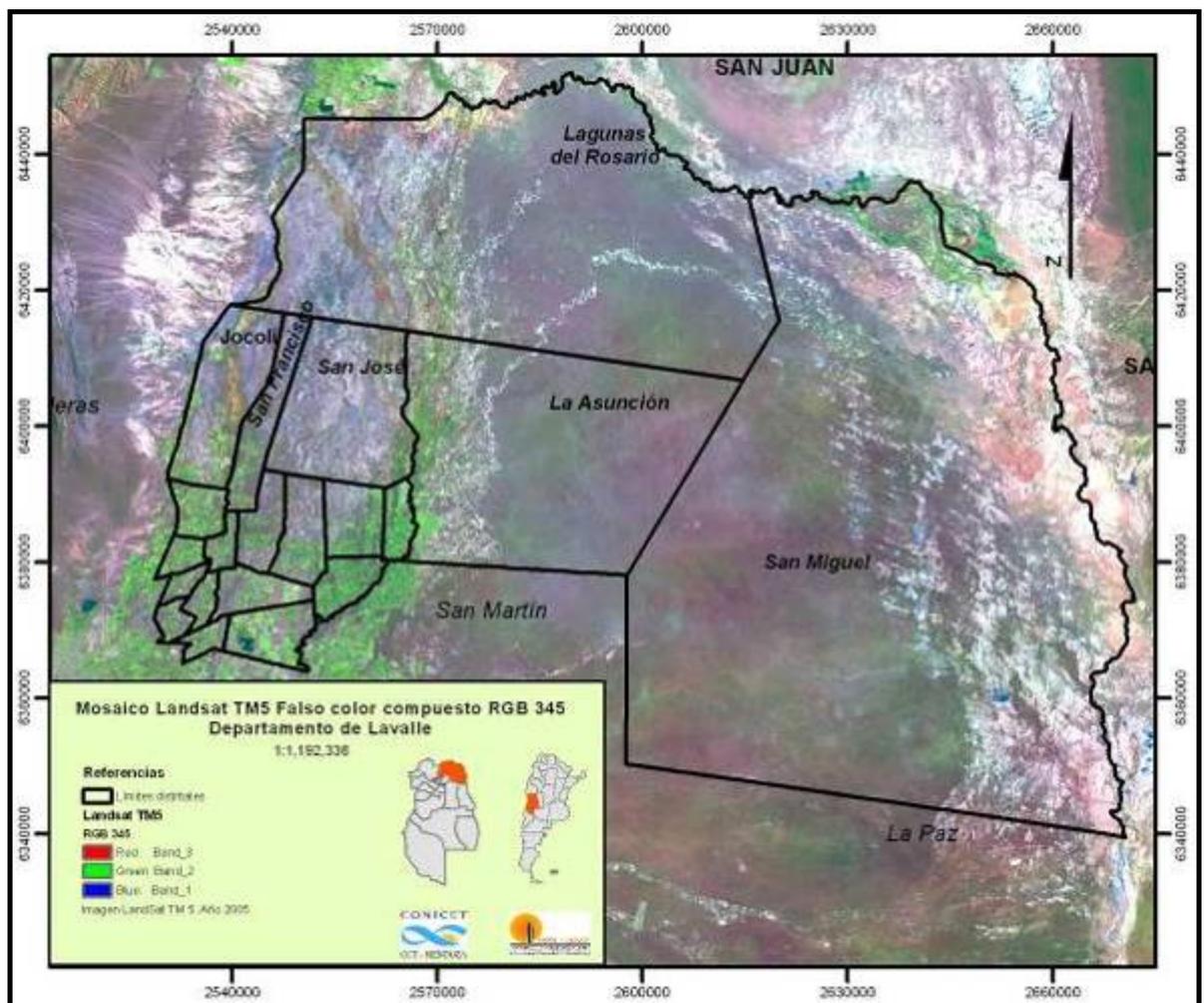
Se toma como fuente de información principal al mapa de Abraham (2000), donde las principales unidades geomorfológicas identificadas fueron corregidas espacialmente y ajustadas a la nueva escala de trabajo (1:100.000).

Mosaico de Imagen satelital LandSat TM5

El mosaico de imágenes LandSat TM5 constituye una de las fuentes de información base para el procesamiento digital y la interpretación de imágenes. Este fue realizado tomando como base imágenes del sensor LandSat TM 5 de los meses de diciembre de 2005 y febrero de 2006.

Se obtuvo un mosaico Red, Green, Blue (RGB) 345 falso color compuesto (Fig. N° 4).

Fig. N° 4 - Mosaico imagen LandSat TM falso color compuesto RGB 345



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Procesamiento digital del modelo IHS

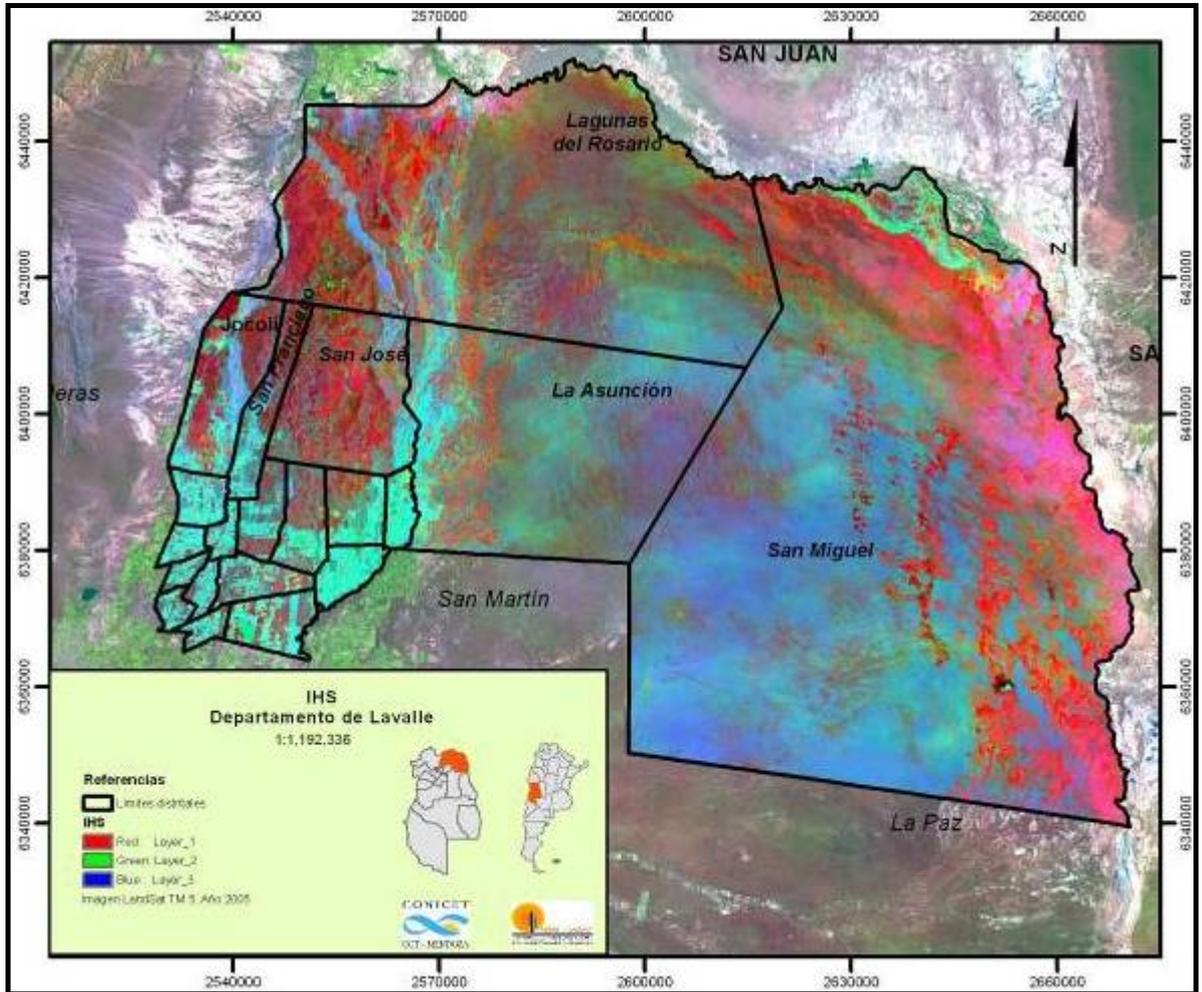
El IHS es un sistema de especificación del color dado por sus coordenadas intensidad-tono-saturación (*intensity-hue-saturation*). En teledetección se conoce con este nombre a la transformación consistente en extraer las tres bandas I, H y S a partir de cualquier composición en color (R-G-B) de la imagen.

Las principales aplicaciones del índice IHS son la fusión de imágenes, interpretación de rasgos con marcadas tendencias cromáticas, análisis de color (aplicaciones geológicas) (Pinilla, 1995). Además, esta transformación HSI ha sido utilizada con fines geológicos y en especial para aplicaciones de cartografía de rasgos morfológicos en zona áridas (Chuvieco, 2000).

A partir de la composición falso color compuesta de la imagen LandSat TM5 de Diciembre de 2005 y Febrero de 2006, utilizando las bandas 3, 4 y 5, se transforman las coordenadas de los colores primarios (RGB, Rojo, Verde y Azul) a las propiedades del color (HSI, Tono, Saturación e Intensidad).

De este modo, se obtiene una imagen que resalta los rasgos morfológicos, así como también las diferentes texturas del suelo (Fig. N° 5).

Fig. Nº 5 - IHS. Departamento de Lavalle



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

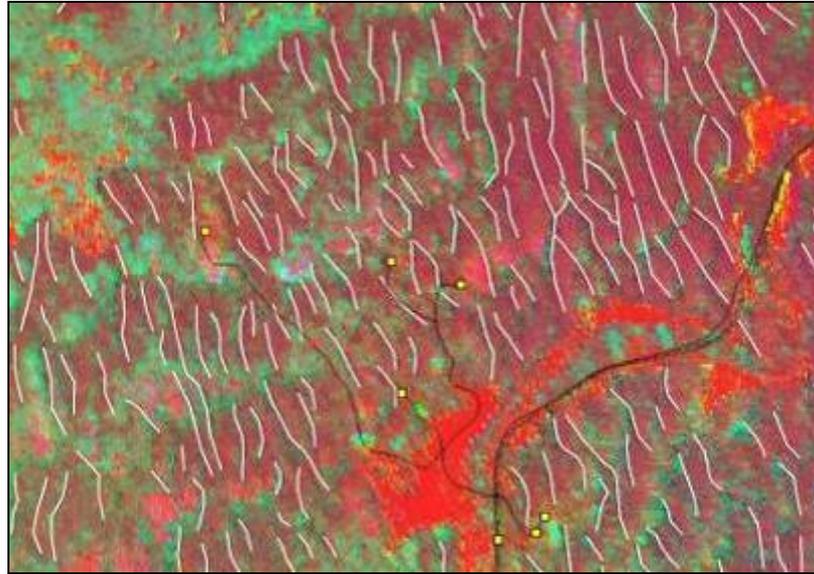
Mapa de líneas de médanos

Sobre la base de la imagen procesada de acuerdo al modelo IHS, se captura visualmente el lineamiento de las formas características de médanos, generando una cobertura temática en Arcview con más de 9450 lineamientos de médanos. De este modo, se obtiene una capa temática de gran nivel de detalle, lo que permite delimitar las zonas medanosas en el área de estudio.

En la Fig. Nº 6 se observa el detalle de la imagen IHS procesada, en la que se destacan en color rojo apagado los suelos arenosos y con una textura particular los lineamientos de médanos, entre otras. Con color rojo intenso los suelos arcillosos y en tonos de verde áreas con diferente cobertura vegetal. A esta imagen se superpone las cobertura de

lineamientos de médanos en color blanco, en negro los caminos y con puntos amarillos la ubicación de puestos.

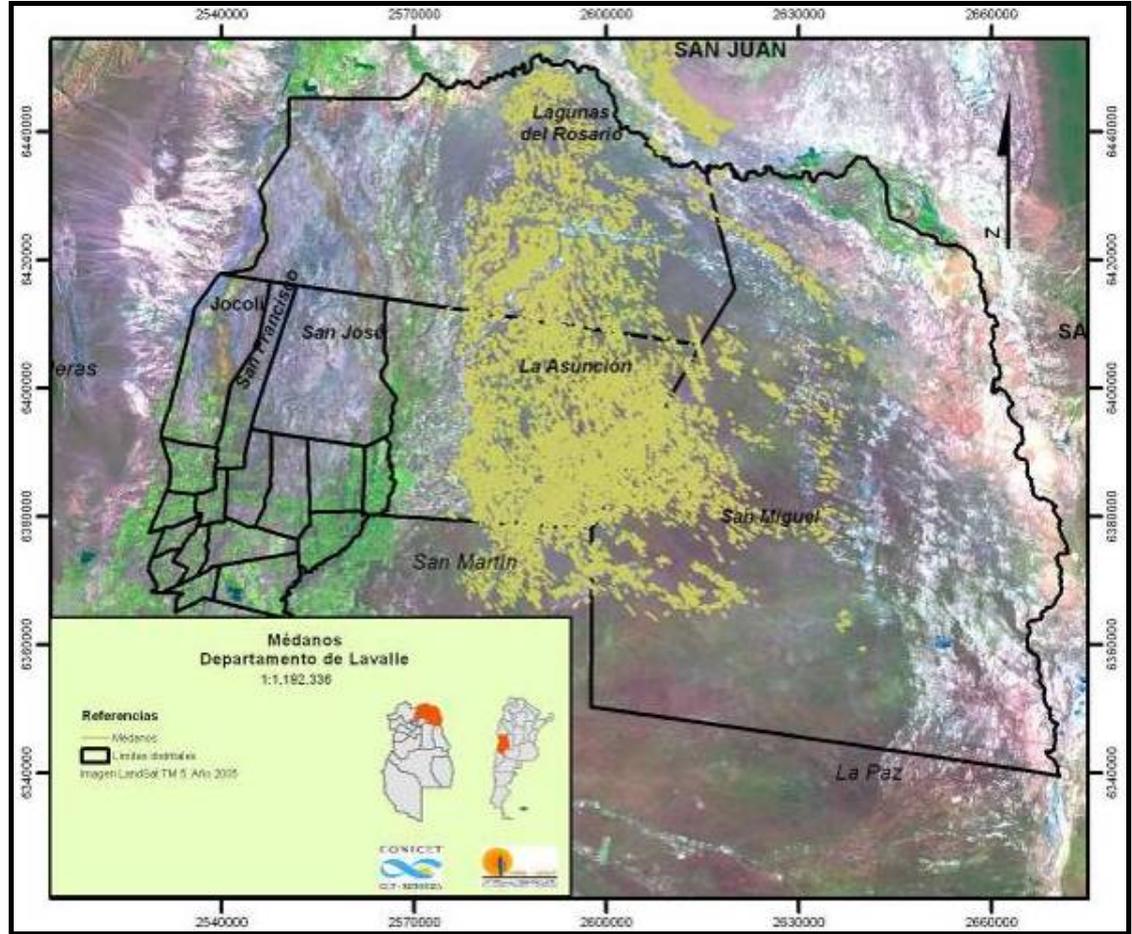
Fig. 6 - Imagen en detalle IHS con líneas de médanos



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Como se observa en la Fig. Nº 7, los médanos se ubican principalmente en el sector centro del área de estudio, con una orientación predominante NO-SE. Se visualiza que los médanos de este sector corresponden a un ambiente continental, en su gran mayoría son médanos de temporalidad fósil y de forma transversal. Esto puede explicarse por la existencia de vientos predominantes de dirección NE, transversal al lineamiento de los cuerpos arenosos.

Fig. Nº 7 - Médanos. Departamento de Lavalle



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Estas formas de acumulación son producto de “diferentes agentes de transporte y sedimentación de los depósitos modernos o recientes, todos holocenos y de textura fina” (Abraham, 2000, p. 41).

En general, los médanos de esta zona frecuentemente son semifijos con vegetación herbácea como el tupe (*Panicum urvilleanum*) y en las zonas de intermédanos se encuentran especies de algarrobo (*Prosopis flexuosa*) (Fig. Nº 8)

Fig. N° 8 - Bosque de *Prosopis flexuosa* en médano. Reserva Provincial Telteca



Fuente: LaDyOT- SIG Deser

Mapa de cobertura de vegetación. Modelo SAVI y calibrado con información del terreno

Se estima la cobertura vegetal en el área no irrigada del departamento de Lavalle. Para la estimación se utiliza el Índice Verde Normalizado (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) derivado de imagen satelital LandSat TM5, de Diciembre de 2005 y Febrero de 2006 (Soria et. al, 2007).

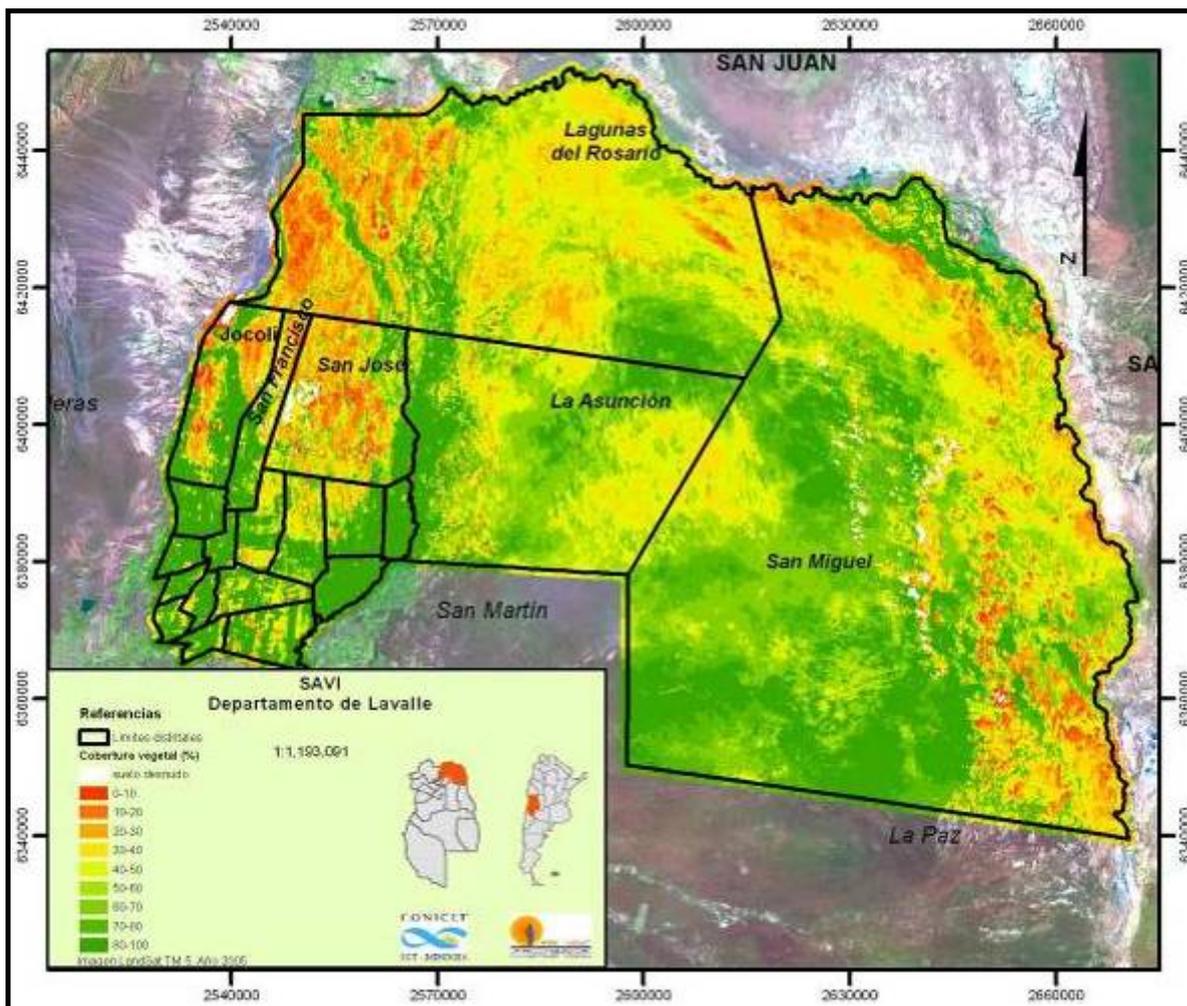
Se realizan relevamientos de campo en sitios muestrales, cuantificándose la cobertura vegetal mediante la aplicación de métodos Point Quadrat y Braun Blanquet. Para el procesamiento digital de imágenes (PDI) se utilizan cuatro escenas completas del sensor LandSat TM5 de fecha contemporánea a las observaciones en el terreno, coincidente con el ciclo vegetativo de la flora natural y que corresponden a la temporada estival 2005-2006.

Se calibran los resultados de dichos índices y los datos de observación de campo sobre la cubierta vegetal mediante análisis estadístico. El ajuste estadístico, siguiendo el modelo recíproco de Y [$Y=1/(a+b*X)$], entre las observaciones de campo y los índices aplicados dio como resultado un coeficiente de correlación del $r= -0,861$ con una bondad de ajuste del $r^2= 74.2\%$ y un $N=50$.

Esta evaluación realizada en un área de aproximadamente 1.000.000 ha, permite contar con información base de tierras sometidas a procesos de desertificación. Para la delimitación de las unidades morfoestructurales y georformas, el contar con la cobertura

vegetal permite confrontar esta información con las unidades identificadas. A tal efecto, la vegetación se constituye como un potente indicador de las condiciones morfedológicas, edáficas y geomorfológicas, siendo estas, después del clima, los factores condicionantes más importantes de la vegetación (Fig. N° 9).

Fig. N° 9 - SAVI. Departamento de Lavalle



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

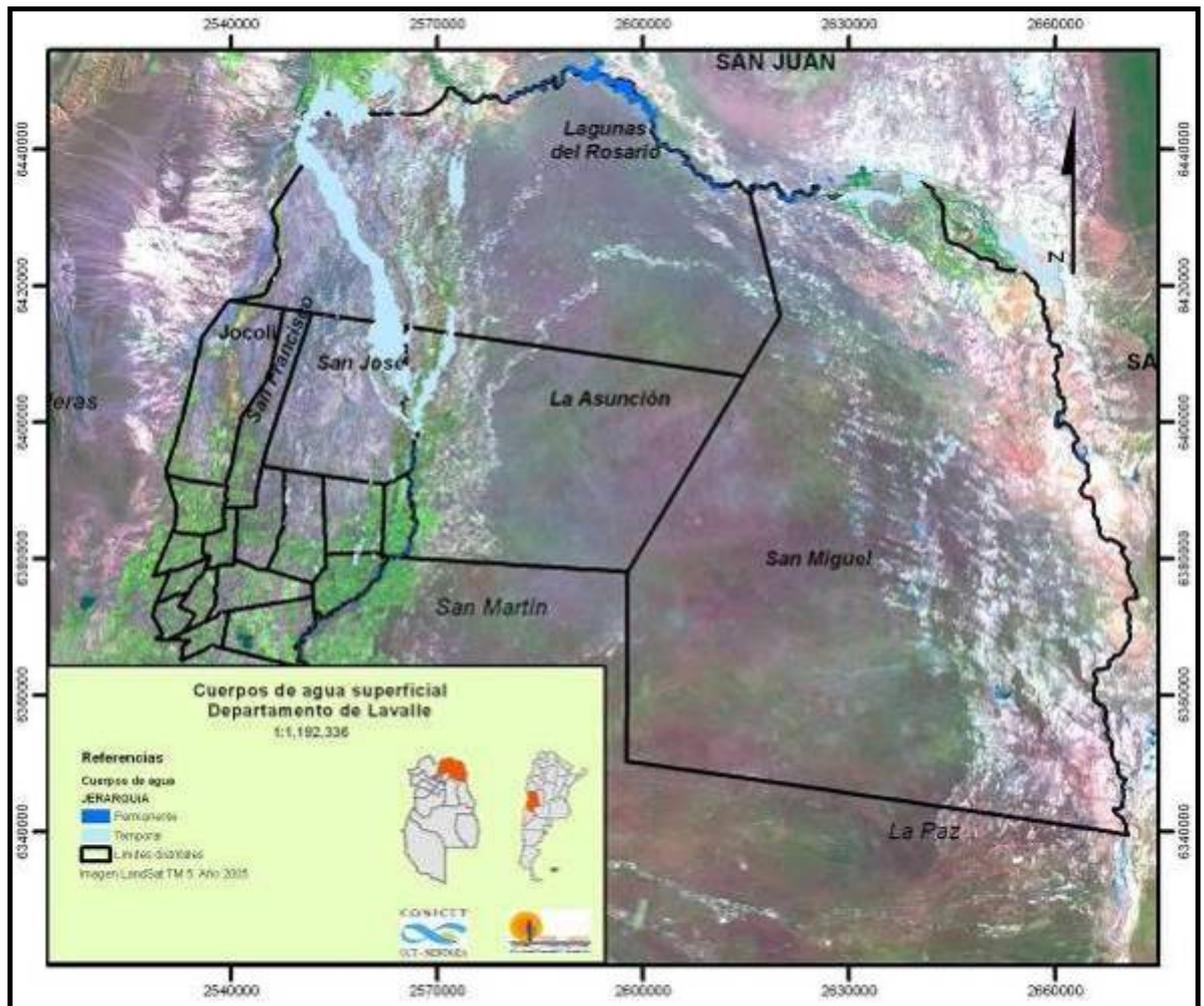
Mapa de cuerpos de agua superficial, 1987

Se realiza el inventario de los cuerpos de agua a través del análisis visual y digital de imágenes satelitales de diferentes épocas.

Se utilizan imágenes satelitales compuestas por diferentes bandas espectrales del sensor LandSat TM 5, bandas 3, 4 y 5, falso color compuesto de Febrero de 1987 e imagen satelital LandSat TM 7, bandas 7, 4 y 2, falso color compuesto de Diciembre de 2001.

Se verifica una marcada variabilidad entre las dos fechas analizadas. Se observa una mayor presencia de cuerpos de agua en la imagen con fecha Febrero de 1987 y de menor presencia para la imagen de Diciembre de 2001. Debido a lo anterior, se selecciona la imagen del año 1987 y se realiza una extracción de las áreas de cobertura de los cuerpos de agua, generando un mapa digital con los cuerpos de agua superficial resultante. Se establece para la captura semiautomática que la superficie mínima sería igual o superior a los 3.600 metros cuadrados (4 pixel del sensor LandSat TM 5) y cuya respuesta radiométrica para la banda 4 presentara valores bajos del Nivel Digital (ND) inferiores o igual a 50 (Soria, et. al, 2005a). De esta forma, se genera un mapa de cuerpos de agua de 1987, el cual se clasifica de acuerdo al sistema de cuencas al que pertenece y de este modo se establece como base de la distribución del agua superficial en el área de estudio (Fig. N° 10).

Fig. N° 10. Cuerpos de agua superficial

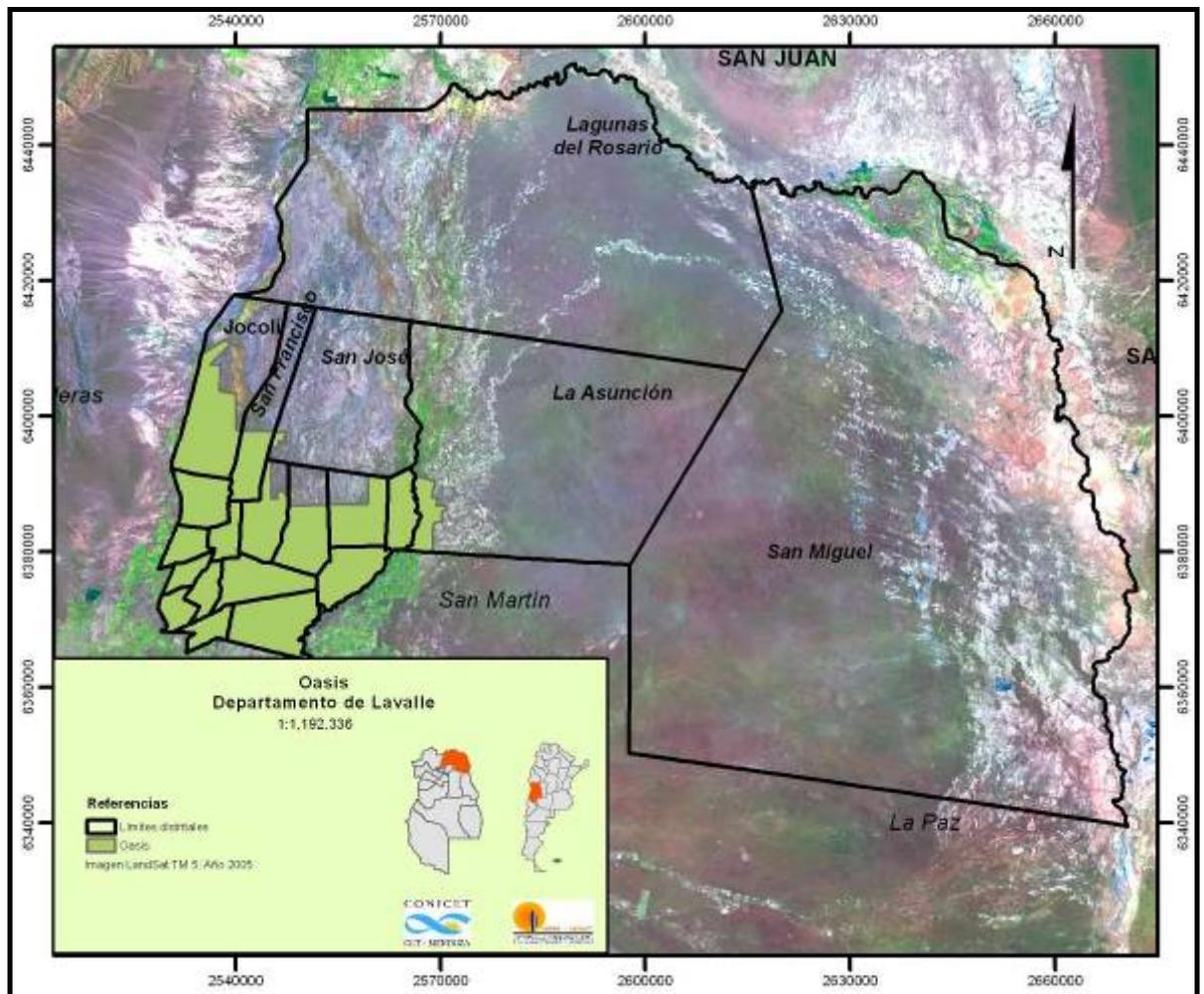


Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Mapa del Oasis agrícola de Lavalle. Derivado del procesamiento visual - digital de la imagen satelital Landsat TM5.

A fin de definir el área de oasis agrícola y el área no irrigada del departamento de Lavalle, se procede a realizar un análisis visual del mosaico de imágenes satelitales Landsat TM5 de diciembre de 2005 y de Febrero de 2006. Posteriormente, en el entorno de los SIG, se digitaliza el área irrigada, obteniendo una nueva capa de información. De este modo se determina que el área irrigada posee una superficie de 89805 ha, mientras que en la zona de desierto la superficie es de 927405 ha (Fig. N° 11).

Fig. N° 11 - Oasis. Departamento de Lavalle



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Modelo digital de elevación derivado de la imagen global de la misión Shuttle Radar Topography Misión (SRTM). Resolución 90 metros.

Se utiliza como información base las mediciones topográficas realizadas por la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) en conjunto con la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

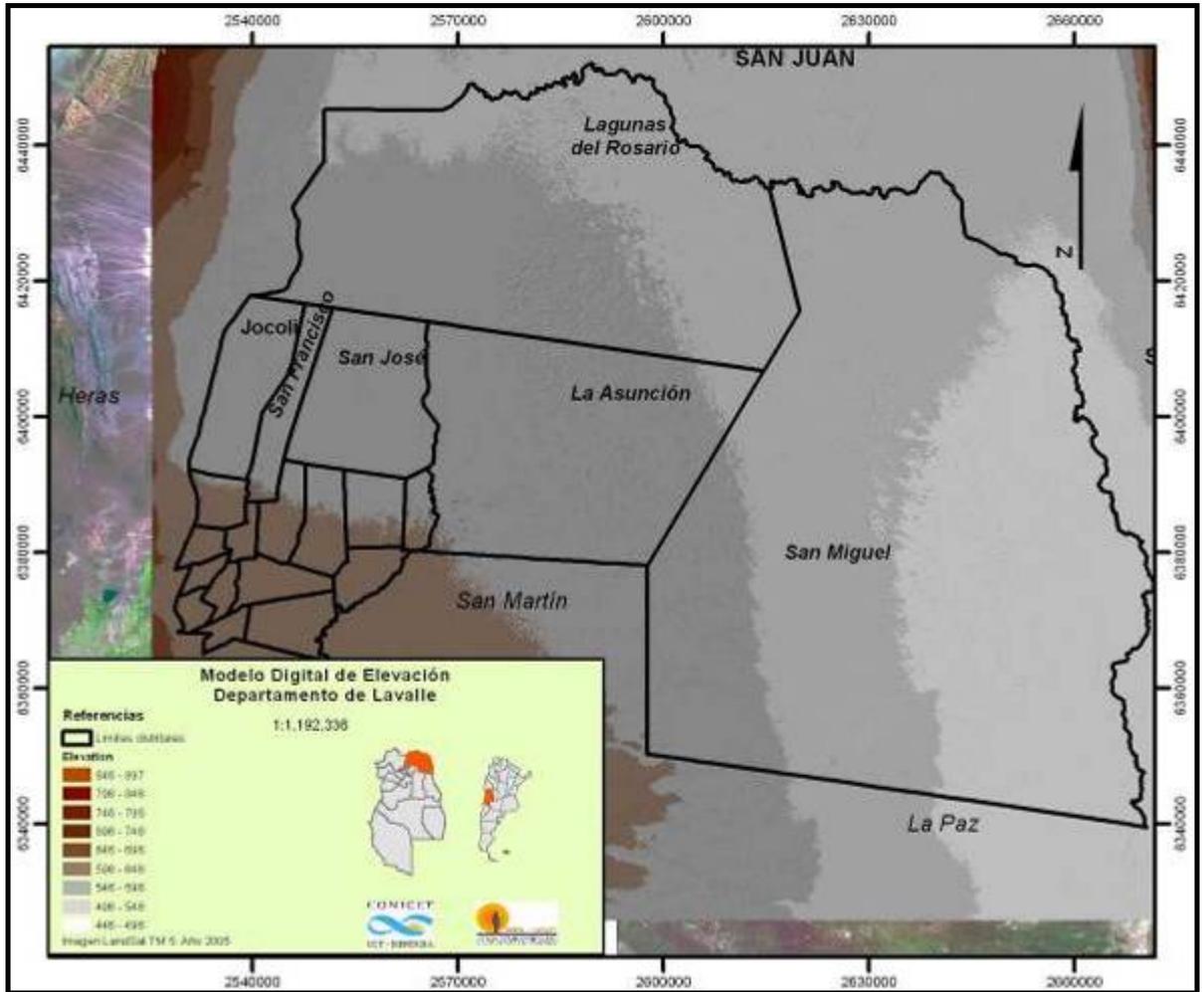
El objetivo de este proyecto es producir datos topográficos del 80% de la superficie de la tierra entre las latitudes de 60° norte y 56° grados sur. Estos datos topográficos tienen una frecuencia espacial de un arco de 3 segundos de grado y que representa 90 metros aproximadamente en un grillado de lado en el terreno. El valor de precisión vertical del dato ronda los 16 metros con un 90% de confianza.

Disponiendo de los datos topográficos ya señalados, se realizan las conversiones y ajustes espaciales necesarios para componer el territorio departamental de Lavalle. Esta tarea produjo un mapa de puntos acotados distribuidos cada 90 metros. Se realizan algunos modelos del relieve departamental y que permiten derivar información como pendientes, exposición solar y aspecto del relieve.

Cabe señalar que un Modelo Digital de Elevación (MDE) es un fichero o archivo de datos de una superficie topográfica dispuesto como un conjunto de coordenadas X, Y, Z regularmente espaciadas y que fue la fuente de datos para el modelado topográfico.

Sobre este archivo de puntos se realiza un análisis estadístico descriptivo como el cálculo del modelo digital elevación (MDE), el cual permite modelar la superficie terrestre a partir de datos altitudinales. En el área de estudio se observan alturas que oscilan entre los 580 msnm a los 470 msnm (Fig. N°12).

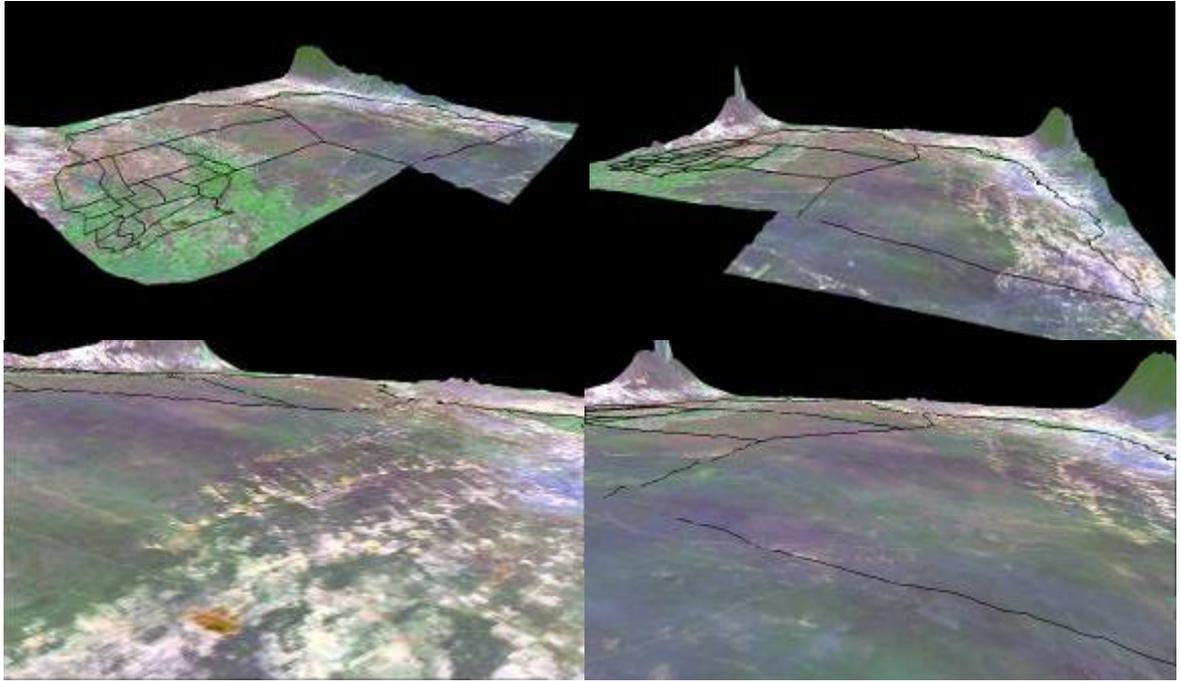
Fig. N° 12 - Modelo Digital de Elevación



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Por otra parte, el Modelo Digital del Terreno (MDT) es una representación cuantitativa en forma digital de la superficie terrestre, que contiene información acerca de la posición (x,y) y la altitud Z de los elementos de la superficie y que permite derivar datos de pendiente, la exposición, entre otros. En la Figura N° 13, se muestra el MDT en 3D con la imagen LandSat TM superpuesta.

Fig. N° 13 - Modelo Digital del Terreno con Imagen LandSat TM.
Factor de exageración vertical 18



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Mapa topográfico, curvas de nivel, derivado de la imagen global de la misión Shuttle Radar Topography Misión (SRTM). Resolución 90 metros.

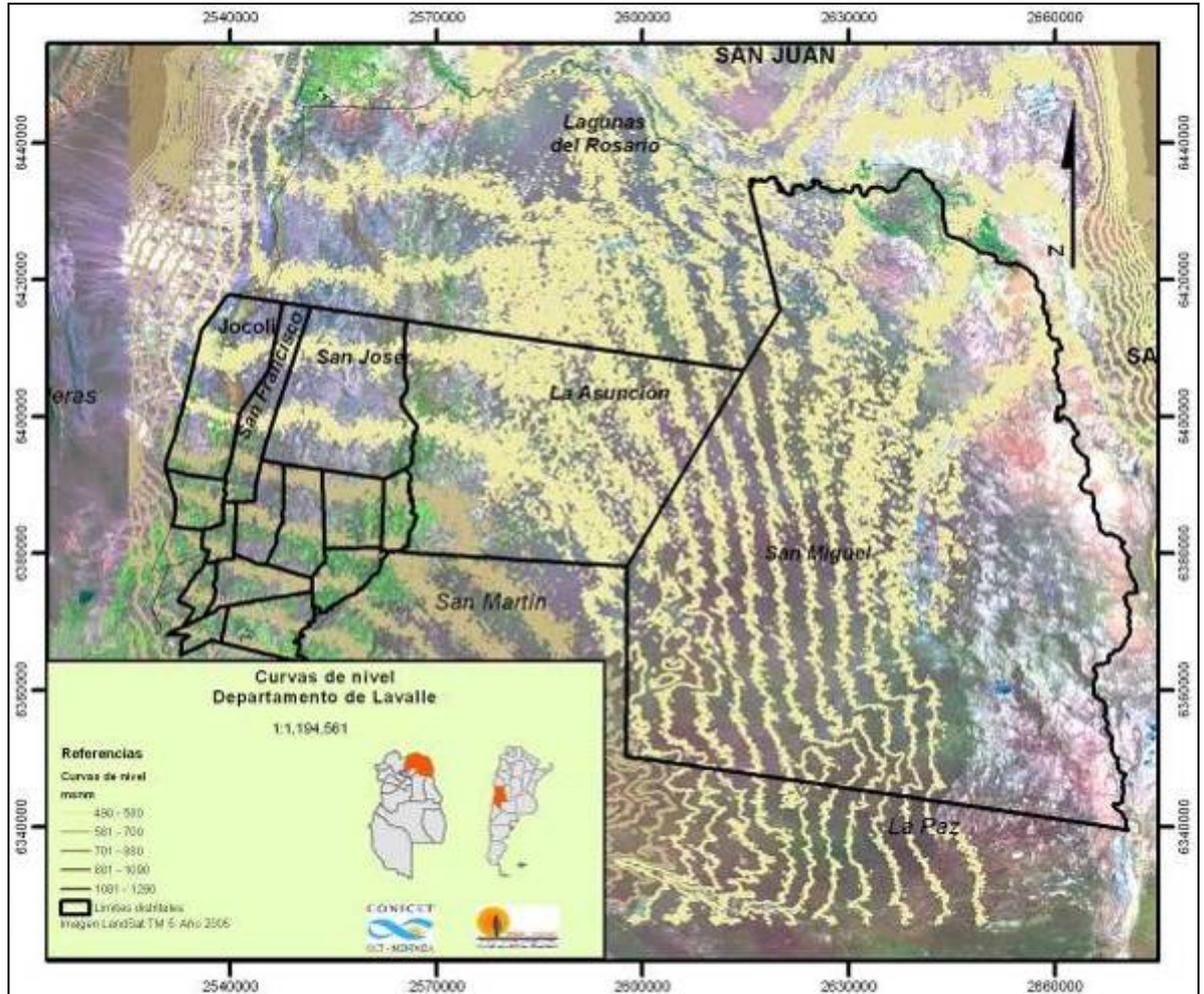
El mayor problema para realizar relevamientos de detalle en esta región es la carencia de cartografía de base con curvas de nivel con una equidistancia suficiente para diferenciar las condiciones ambientales en un sitio de gran homogeneidad. Sólo se dispone de las cartas IGM 1:250.000, relevadas en la década del '40, absolutamente insuficientes para volcar información de detalle.

La primera tarea consiste en generar la información cartográfica a una escala que permitiera volcar los datos obtenidos en el relevamiento de campo y el procesamiento digital. A partir de los base de datos de puntos acotados para el área seleccionada, fue posible realizar una densificación del dato topográfico e interpolar isolíneas que unen puntos situados a la misma altitud, por debajo o por encima del nivel de referencia.

Su representación cartográfica se genera por la intersección de un plano de nivel con el terreno.

Mediante herramientas específicas de ArcGis, se realizó una interpolación de los datos altimétricos, obteniendo curvas de nivel con una equidistancia vertical de 10 metros (Fig. N° 14).

Fig. N° 14 - Curvas de nivel



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

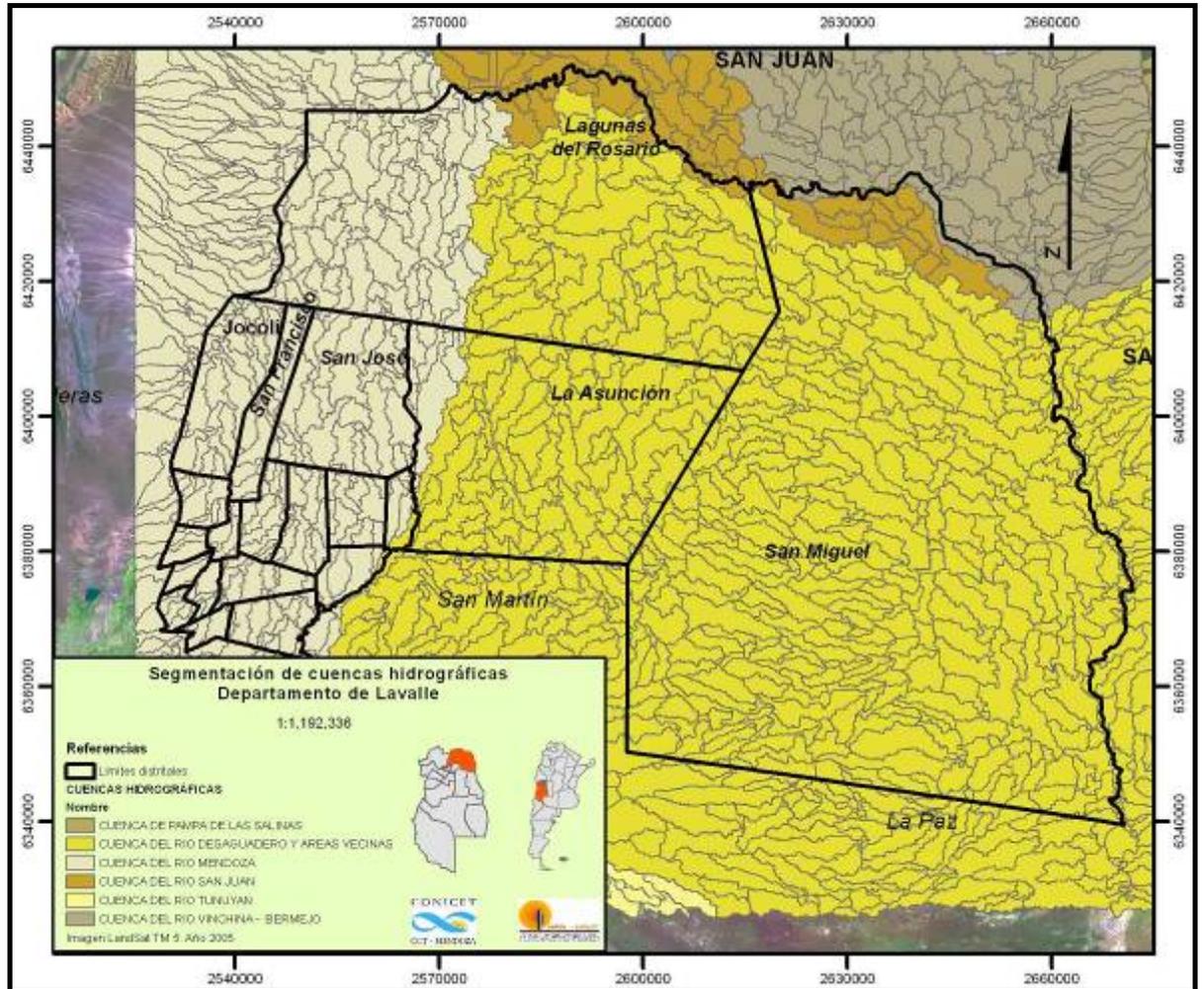
Mapa de segmentación de cuencas hidrográficas. Resultado del procesamiento del Modelo digital de elevación

Para el estudio y modelado hidrológico de cuencas hidrográficas, se trabaja con programas específicos, como GeoHMS, HEC-HMS entre otros. Con la aplicación de estas herramientas en el ambiente SIG, se puede delimitar las cuencas hidrográficas para una zona tan extensa como es el área de trabajo, sobre la que no se disponía de información.

Estas herramientas utilizan como dato de entrada el modelado MDE ya elaborado. A partir de este modelo, se inicia el procesamiento, recodificando el modelo de terreno,

calculando direcciones de flujo y acumulación, delimitación y poligonización y agregación de cuencas entre otros. Finalmente, se obtiene la cobertura digital de segmentación de cuencas hidrográficas, la cual fue reclasificada según el sistema de cuencas y subcuencas hidrográficas atendiendo a la clasificación nacional (Figura N° 15).

Fig. N° 15 - Segmentación de cuencas hidrográficas



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Red hidrográfica de avenamiento derivado del Modelo digital de elevación y modelo de orientación de vertientes

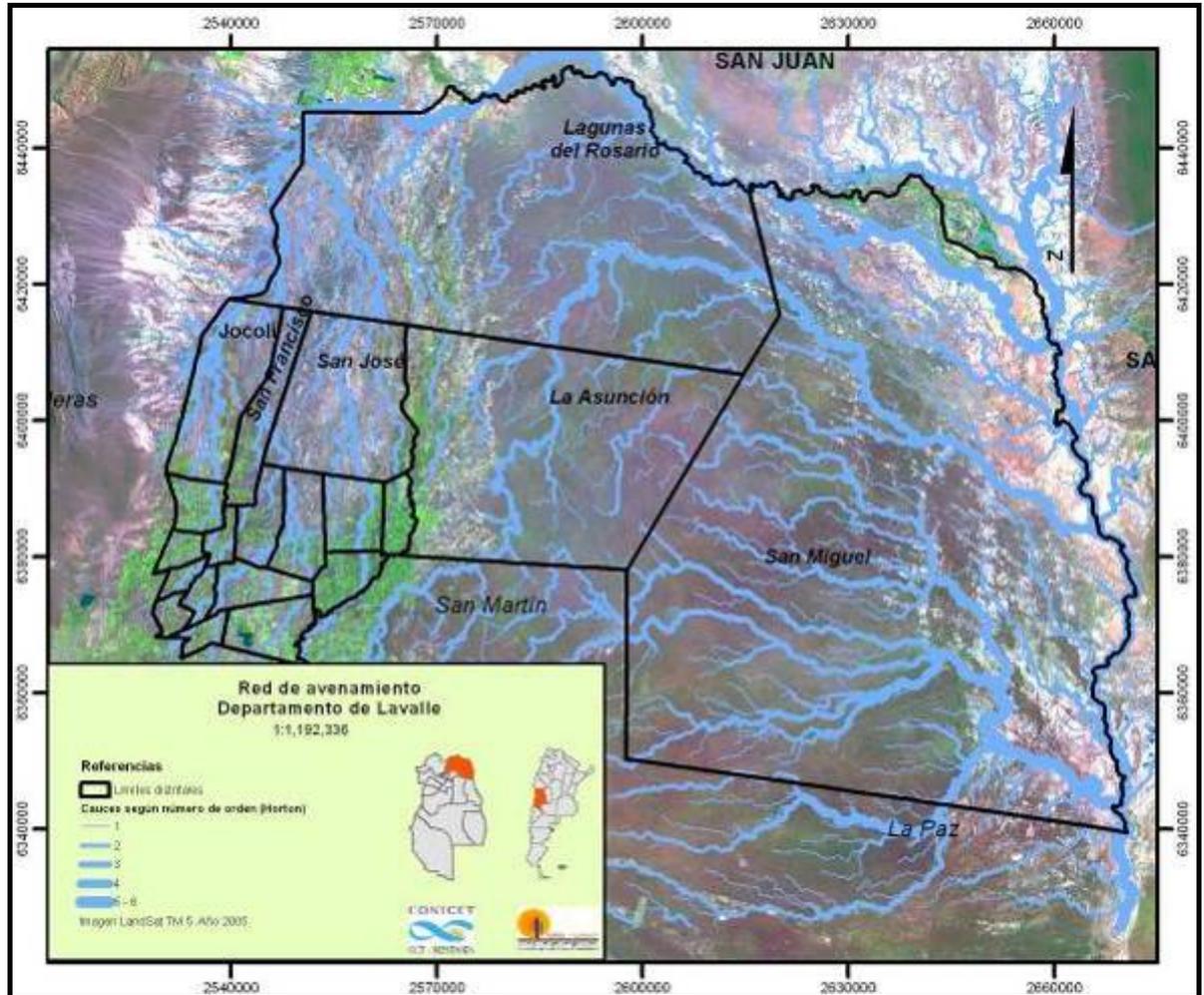
Sobre la base de la segmentación de cuencas, se puede obtener un esquema de simulación de la hidrografía del área de estudio.

Siguiendo el principio de ordenamiento de cauces de Horton (1945), el programa GeoHMS identifica y define segmentación las corrientes de escurrimiento o cursos. Para el análisis se adoptan los puntos de vuelco al Río Colorado a partir de los cuales se determinan los cauces principales y su jerarquización analítica. El análisis se realiza únicamente en la margen norte del Río Colorado, centrada en el área de estudio.

Con este procedimiento, se define la red de avenamiento superficial, calculando datos de longitud de las corrientes y clasificando la red por número de orden según Horton.

Mediante la aplicación de este procedimiento, se obtiene la cobertura digital de la red de avenamiento superficial para el área de estudio (Fig. N° 16).

Fig. N° 16 - Red hidrográfica de avenamiento



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Relevamiento integral del paisaje en 80 puntos de muestreo distribuidos en el área de estudio (LaDyOT, 2005-2009).

El levantamiento integral del paisaje consistió en relevar los principales aspectos relacionados a la vegetación, suelo, geomorfología, agua, procesos y usos del suelo, en 80 puntos de muestreo distribuidos en aproximadamente 1.000.000 de ha, para lo que se aplicaron metodologías específicas.

Considerando las características fisiográficas y de uso del suelo, el rasgo que los caracteriza es la homogeneidad, lo que por una parte simplifica y por otra complica el muestreo. A través de un exhaustivo análisis de los rasgos del soporte físico-biológico y de los distintos procesos de ocupación, se ha logrado diferenciar unidades homogéneas

representativas, las que se denominan “Unidades Ambientales de Referencia” (UAR) planteadas por Abraham (2003) y Abraham et al. (2006). En función de esta subdivisión del paisaje, se seleccionaron puntos de relevamiento en áreas representativas de las distintas UAR (Soria, et. al, 2005b) (Fig. N° 17).

Fig. N° 17 - Relevamiento integral del paisaje



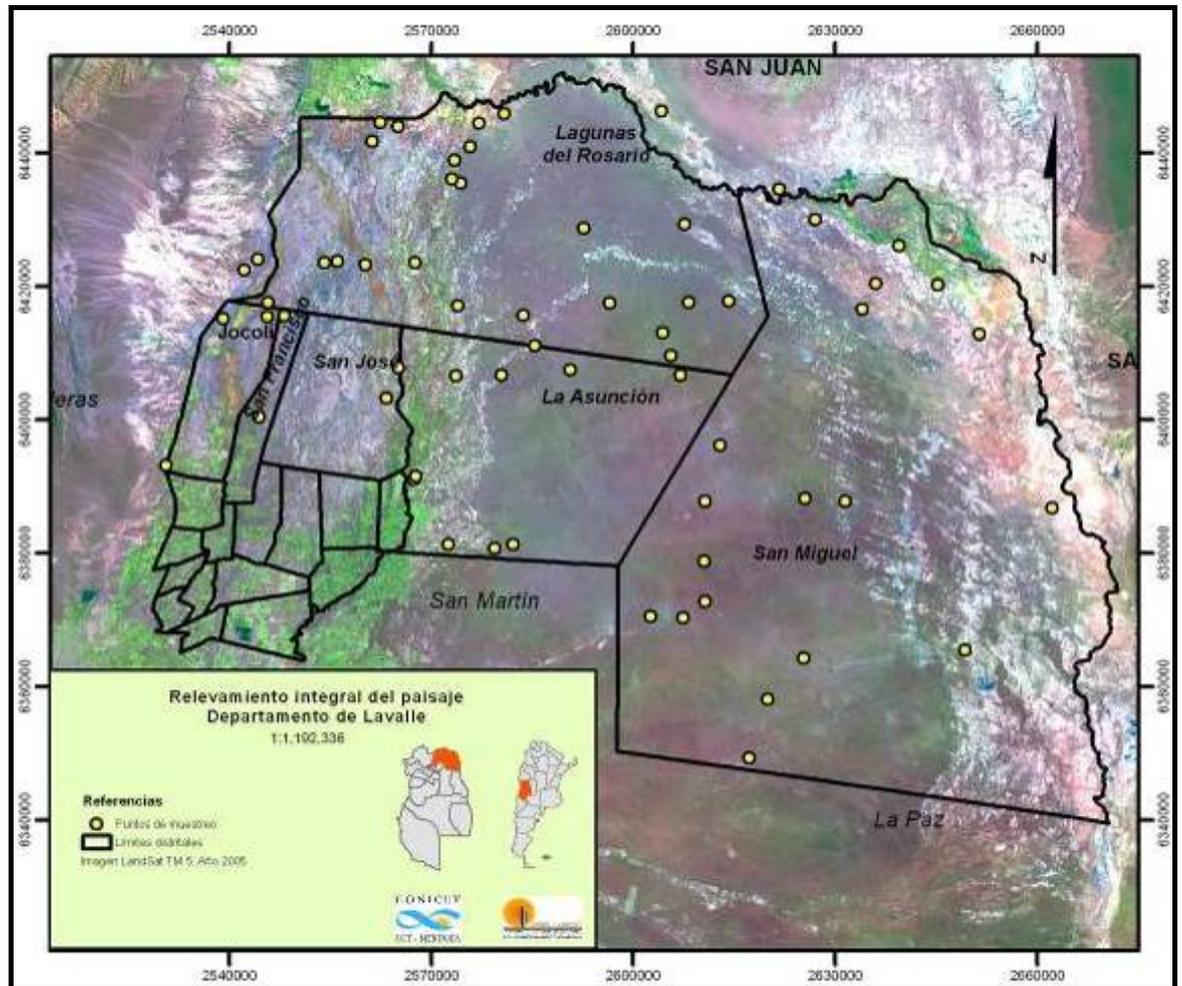
Fuente: LaDyOT

Para corroborar y consistir la información obtenida del procesamiento digital de imágenes y el uso de SIG, se recurre a la base de datos generada a partir del relevamiento para los puntos de muestreo.

El levantamiento del paisaje se realiza a partir de un protocolo que fue construido y consistido sobre la base de las observaciones realizadas en los diversos relevamientos.

Esto, permitió trabajar con estándares consensuados acerca de las unidades ambientales, elementos del relieve, pendiente, características morfoedológicas, escurrimiento, textura del suelo, pedregosidad, los principales procesos formadores del terreno, como así también, con datos de vegetación tanto fisonómicos como florísticos y ecológicos (Fig. N° 18).

Fig. N° 18 - Relevamiento integral del paisaje



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Resultados

Una vez identificadas y digitalizadas las formas del terreno, se corrobora en campo la información obtenida, a fin de generar y consistir las bases de datos y el mapa poligonal. El bosquejo geomorfológico analítico presenta ocho unidades clasificadas por criterios morfogenéticos: denudativo, fluvial y eólico fluvial (Figura N° 19).

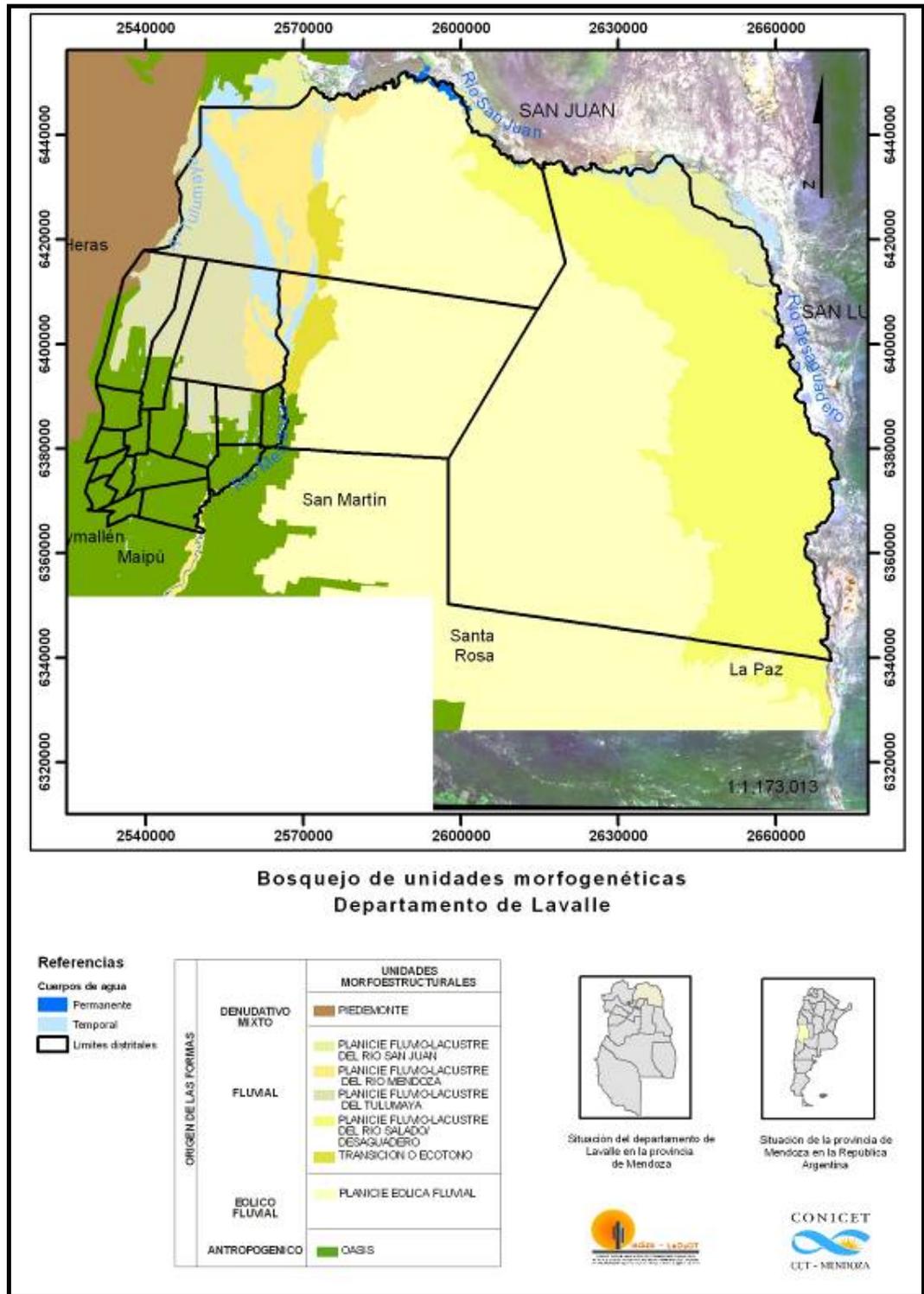
Las unidades geomorfológicas definidas de acuerdo al proceso formador, son las siguientes:

- *Origen denudativo:* Piedemonte
- *Origen fluvial:* planicie fluvio-lacustre del Río San Juan, planicie fluvio-lacustre del Río Mendoza, planicie fluvio-lacustre del Tulumaya, planicie fluvio-lacustre del Río

Salado-Desaguadero, zona de transición o de interdigitación entre materiales gruesos coluviales y finos fluviales

- *Origen eólico*: planicie eólica-fluvial
- *Origen antropogénico*: oasis

Fig. N° 19 - Bosquejo de unidades morfoestructurales



Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

Fig. N° 21 - Leyenda de Bosquejo de principales geoformas

		UNIDADES MORFOESTRUCTURALES	GEOFORMAS
		ORIGEN DE LAS FORMAS	
DENUDATIVO MIXTO		PIEDEMONTE	PIEDEMONTE DISTAL
	FLUVIAL	PLANICIE FLUVIO-LACUSTRE DEL RIO SAN JUAN	PALEO CAUCE RIO MENDOZA
		PLANICIE FLUVIO-LACUSTRE DEL RIO MENDOZA	PALEOCAUCE RIO TUNUYAN
PLANICIE FLUVIO-LACUSTRE DEL TULUMAYA		CAUCE ACTIVO DEL RIO SAN JUAN	
PLANICIE FLUVIO-LACUSTRE DEL RIO SALADO/ DESAGUADERO		CAUCE ACTIVO RIO MENDOZA	
TRANSICION O ECOTONO		BAJOS DEL RÍO MENDOZA	
		CAUCE ACTIVO (TULUMAYA)	
		CAUCES ABANDONADOS	
		DEPÓSITOS LOESSOIDES	
		INTERFLUVIO RÍO MENDOZA	
		INTERFLUVIO RÍO MENDOZA - ARROYO TULUMAYA	
EOLICO-FLUVIAL		LAGUNAS	
		LAGUNAS Y BAÑADOS	
		BARREALES Y SALITRALES	
		SALITRAL	
		LECHO RIO DESAGUADERO	
		LECHO RÍO SAN JUAN Y DESAGUADERO	
		LECHO TULUMAYA	
		MEDANOS	
		PLANICIE	
		PLANICIE CON DEPOSITOS ARCILLO ARENOSOS	
	PLANICIE CON DEPOSITOS ARCILLO LIMOSOS		
	PLANICIE CON DEPOSITOS LIMO ARENOSOS		
ANTROPOGENICO	OASIS	OASIS	

Fuente: SIG – DESER, LaDyOT, IADIZA

A continuación, en las Fig. N° 22, 23, 24 y 25 se ilustran las geoformas identificadas más representativas.

Fig. N° 22 - Geoformas de origen denudativo mixto



Piedemonte

Fig. N° 23 - Geoformas de origen fluvial



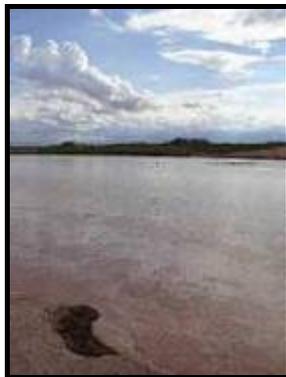
Barreal



Salitral



Cauce activo del Río San Juan



Cauce activo Río Mendoza



Laguna El Manantial



Lecho Tulumaya

Fig. N° 24 - Geoformas de origen eólico-fluvial



Médanos



Planicie con depósitos arcillo limosos

Fig. N° 25 - Geoformas de origen antropogénico



Oasis: viñedos y olivos

Conclusión

Se logra un bosquejo de unidades geomórficas del departamento de Lavalle, a través de la permanente interacción entre el relevamiento de campo, basado en protocolos de levantamiento integral del paisaje y construidos empíricamente siguiendo las técnicas de análisis en el terreno; y las herramientas y técnicas que ofrece el análisis geoespacial (PDI y SIG).

Mediante esta interacción campo-laboratorio, se consigue extrapolar los resultados a áreas de difícil acceso del desierto de Lavalle. Considerando que el área tiene aproximadamente 1.000.000 de ha, se cumple la condición del análisis geoespacial para inferir datos y cubrir áreas extensas mediante técnicas de extrapolación.

Si bien los cambios en la geomorfología pueden apreciarse a escalas de tiempo muy grandes, en el marco de la evaluación y monitoreo de la desertificación del departamento de Lavalle, el contar con la información de geoformas y materiales, permite relacionar la información con otros indicadores de estado-presión.

Las complejas interacciones entre relieve, clima e impacto humano por uso del suelo a lo largo del tiempo permiten definir las zonas más vulnerables a sufrir los efectos erosivos y de degradación de tierras. De este modo, esta fuente de información cartográfica constituye una importante base para la toma de decisiones de carácter territorial.

Agradecimiento

A nuestra querida colega la Dra. Almuth Therburg, quien colaboró muy activamente en la realización de tareas de campo y aportes conceptuales y metodológicos relevantes para la realización del presente trabajo.

Bibliografía

- Abraham, E. M., Del Valle, H. F., Roig, F., Torres, L., Ares, J., Godagnone, R. (2009). *Overview of the Geography of the Monte Desert biome (Argentina)*. Journal of Arid Environments, 73, Issue 2, p. 144-153. Reino Unido: Elsevier.
- Abraham, E. M., E. Montaña y L. Torres (2006). *Desertificación e indicadores: posibilidades de medición integrada en fenómenos complejos*. Barcelona: Scripta Nova. Disponible en www.ub.es/geocrit/sn/sn-148.htm.
- Abraham, E., P. Maccagno y D. Tomassini (2003). *Experiencia argentina vinculada a la obtención y evaluación de indicadores de desertificación*. En Abraham, Tomasini, E., D. y Macagno, P. (Ed.). *Desertificación. Indicadores y puntos de referencia en América Latina y el Caribe*, ps. 81-105. ISBN 987-20906-0-2. Mendoza: SAyDS / GTZ / UNDC / IADIZA
- Abraham, E. M., (2003). *Desertificación: bases conceptuales y metodológicas para la planificación y gestión. Aportes a la toma de decisión. Zonas Áridas*, p. 7, 19-68, Lima.
- Abraham, E. M. y Prieto, R. (2000). *Viticulture and desertification in Mendoza, Argentine*. Zentralblatt für Geologie und Paleontology, T. I. H. 7/8, ps. 1063-1078, Stuttgart.
- Abraham, E. M., (2000). *Mapa geomorfológico de Mendoza*. En Abraham, E. y Rodríguez Martínez, F. (Ed.) (2000). *Argentina: recursos y problemas ambientales de la zona árida. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja*. Universidades y Centros de Investigación de la Región Andina Argentina, Mendoza: Junta de Gobierno de Andalucía,
- Abraham E. M. & M. Prieto (1991). *Contributions of historical geography to the study of processes of landscape change. The case of Guanacache, Mendoza, Argentina*. N° 11: ps. 309-336. Bamberger Geographische Schriften. Mendoza: Proyecto Lada-Fao.
- Abraham, E. M. (1983). *La región de las Travesías y Bolsones*. Interpretación imagen LANDSAT 1:500.000 General Alvear (CNIE-22107-13334). En Atlas total de la República Argentina, ASAS, 79, Sección II y III. Buenos Aires: Centro Editor de América Latina.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de Teledetección Espacial (3ª ed.)*, pp 368. Madrid: Rialp.
- Estrella, H., Heras, V. y Guzzetta, V. (1979). *Registro de elementos climáticos en áreas críticas de la provincia de Mendoza*. En Cuaderno Técnico 1, pp. 79. Mendoza: IADIZA.
- Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Bull. Geol. Soc. Am., N° 56 p.p. 275-370. Disponible en www.sociedadgeologica.es/archivos/
- Morello, J. (1958). *La Provincia Fitogeográfica del Monte*. Opera Lilloana N° 2, ps 11-155. En GTC: Plan dasocrático, Fracción 2, Campo de Saujil. Decreto N° 2.038 de Protección de la Fauna Silvestre. Provincia de Catamarca. Disponible en www.mineria.gov.ar/estudios.

- Pinilla, C. (1995). *Elementos de teledetección*, ps. 313. Madrid: Rama.
- Regairaz, C. (2000). *Suelos de Mendoza*. En Abraham, E. y Rodríguez Martínez (Ed.). Argentina: recursos y problemas ambientales de la zona árida. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja., Universidades y Centros de Investigación de la Región Andina Argentina, Mendoza: Junta de Gobierno de Andalucía.
- Roig, F. (1972). *Bosquejo fisonómico de la provincia de Mendoza*. Jornadas Argentinas de Botánica. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica. XVIII (Suplemento), ps. 49-80. Buenos Aires.
- Strahler, A. N. (1984). *Geografía física (7ª ed.)*. 767 p. Barcelona: Omega.
- Soria, D., Salomón, M., Abraham, E., Fernández, R. y Rubio, C. (2007). *Mapa de Vegetación de Lavalle, Mendoza, Argentina*. Actas del XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, p.10, 17 al 21 de septiembre de 2007. Mar del Plata: AETD.
- Soria, D., Salomón, M. y R. Fernández (2005a). *Inventario y análisis, hidrografía superficial cuerpos de agua*. Informe de avance, 12 p., Proyecto Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Áridas. FAO, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorial. Mendoza: IADIZA- CONICET. Disponible en www.cricyt.edu.ar/LaDyOT, www.ambiente.gov.ar.
- Soria, D., Salomón, M. y R. Fernández (2005b). *Paisaje*. Informe de avance del Proyecto Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Áridas. FAO, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorio, 14 p. Mendoza -IADIZA-CONICET. Disponible en www.cricyt.edu.ar/LaDyOT, www.ambiente.gov.ar.
- Torres, L., Montaña E., Abraham, E. y Pastor, G. (2003). *La utilización de indicadores socio-económicos en el estudio y la lucha contra la desertificación*. Instituto Interdisciplinario de América Latina y El Caribe. Disponible en <http://www.tau.ac.il/eial/current/torres.html>.