

Imágenes satelitales y uso del suelo

Aplicación en el área metropolitana Santa Fe-Paraná

MG. ARQ. MIRTA SOIJET, Docente investigadora FADU/UNL

* Colaboradores: Sr. Marcelo Zamateo, Arq. Miguel Rodríguez, Arq. Mariana Melhem. El presente trabajo fue desarrollado en el marco del *Observatorio urbanístico del área metropolitana Santa Fe-Paraná*. Construcción de un sistema de información continua y monitoreo permanente para la generación de nuevos conocimientos técnicos con aplicación a las problemáticas urbano-territoriales del área. Investigador Responsable: Dr. Héctor Floriani. Investigadores: Dra. Isabel Martínez de San Vicente, Mg. Arq. Mirta Soijet, Mg. Arq. Ma. Laura Bertuzzi. Colaboradores: Paola Bagnera; Miguel Rodríguez, Graciela Mantovani, Mariana Melhem, Raúl Tonini y Marcelo Mántaras. Sede: Oficina Estudios Urbanos, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Nacional del Litoral.

1. Introducción. El observatorio como herramienta para la gestión del territorio

Un observatorio es un espacio de información para el monitoreo permanente del territorio que se lleva a cabo por medio de una serie de herramientas que hacen posible la construcción de un ámbito de información cuantitativa y cualitativa sobre el mismo.

Sus objetivos son recabar, producir, elaborar, sistematizar, interpretar y difundir información urbanística de los procesos de transformación, organizado según ejes temáticos capaces de caracterizar y explicar las principales transformaciones espaciales del área.

Se trata de dar continuidad en el tiempo a la producción de un corpus de conocimiento (actualizable permanentemente) funcional a eventuales intervenciones urbano-territoriales y de conformar una plataforma de recepción y continuidad de estas tareas en las administraciones públicas y las organizaciones sociales mediante la construcción de información disponible y coordinada, la realización de actividades de interacción entre agentes y el acceso a nuevas tecnologías de información.

Por lo tanto resulta necesario diseñar un instrumento de captación de información, que habrá de ser multidimensional y que comprenderá tanto las variables informáticas como las variables gestionales (identificación de las fuentes de la información, definición de los modos de hacerla confluir y formalización de los compromisos respectivos). Si bien el proceso de implementación del observatorio urbano incluye la realización de consultas con todas las instituciones gubernamentales que actúan en la jurisdicción territorial del observatorio propuesto además de asociaciones profesionales, representantes de organizaciones no-gubernamentales, de organizaciones cívicas, de organizaciones vecinales, etc., es igualmente importante proceder a la identificación de las fuentes de información disponibles y entidades de investigación y encuestas.

Finalmente, se habrá de dar paso a la negociación y construcción de los compromisos entre las instituciones que desean compartir la responsabilidad hacia el observatorio urbano para definir su estructura, condiciones de

funcionamiento y financiamiento, así como su mandato, tareas y productos.

El observatorio del Área Metropolitana Santa Fe-Paraná (AMSFP)

Se origina en el ámbito académico, con sede en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Nacional del Litoral y desarrollado a partir del financiamiento de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Nación. Se propone indagar en torno a un área metropolitana particular: definido por la existencia de dos centros urbanos principales, un alto grado de interrelación entre ellos, una cierta capacidad de autogestión del área para asumir emprendimientos infraestructurales de magnitud (túnel subfluvial, defensas, autopista Santa Fe-Paraná, puerto, etc.), la existencia de desbordes de alta especificidad funcional, el avance en articulaciones institucionales y administrativas entre distintas jurisdicciones gubernamentales.

Los usos del suelo

Dentro de este contexto, el objetivo de este trabajo en particular es el de reconocer, diferenciar y clasificar los distintos tipos de uso del suelo en el área de estudio delimitada (Dptos. La Capital en la Provincia de Santa Fe y Paraná en la Provincia de Entre Ríos) a partir de imágenes satelitales LANDSAT correspondientes a los años 1990, 2000 y 2006.

2. Evaluación del recurso metodológico

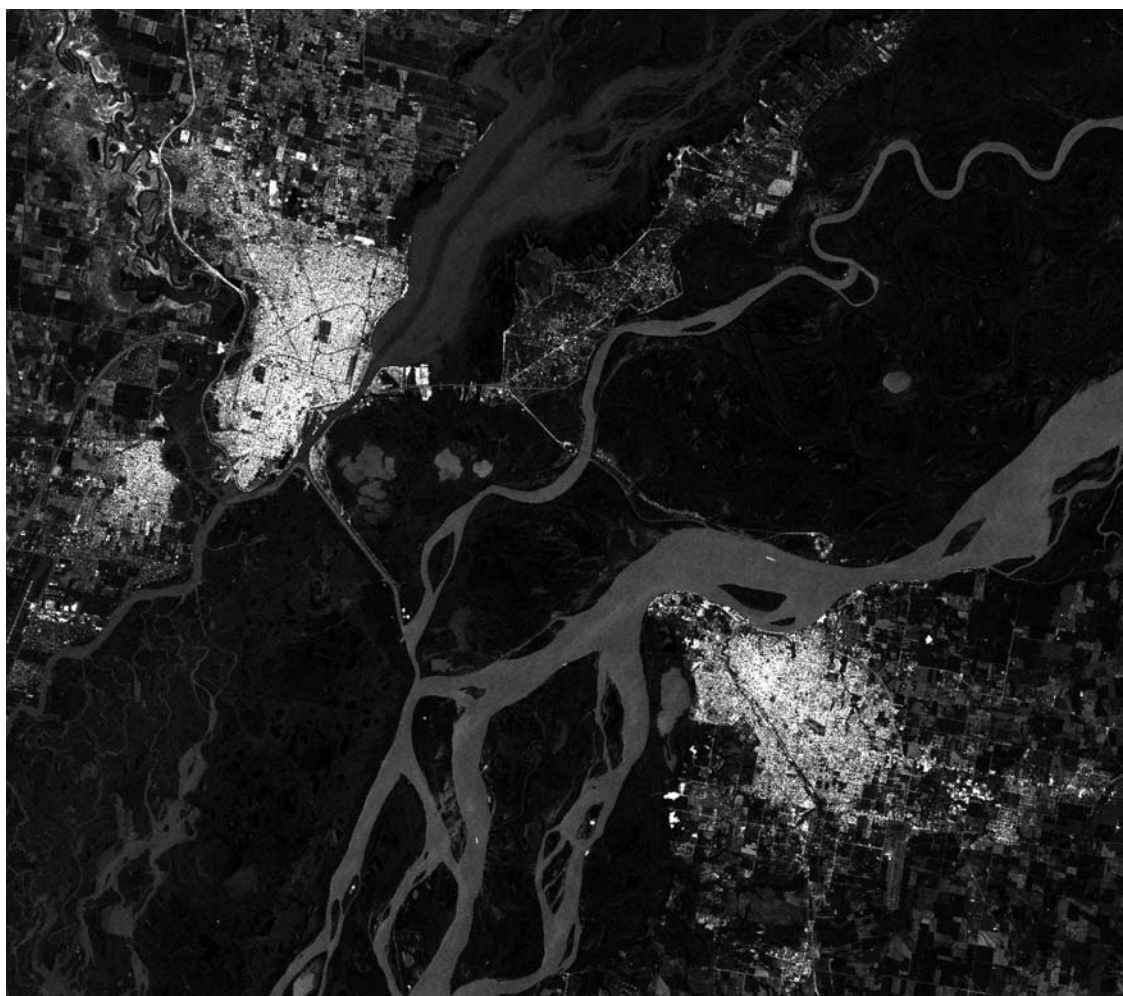
La metodología a utilizar puede denominarse clasificación automática multiespectral.

Se tomaron como zonas piloto las ciudades de Santa Fe, Paraná y sus alrededores.

Selección de clases

Con la imagen de 2006, a partir de una clasificación no supervisada (técnica por picos de histograma, CLUSTER) y una imagen en falso color compuesto, se definieron a priori las clases y se elaboró el siguiente listado de clases tentativas:

Urbano alta densidad
Urbano densidad media
Urbano baja densidad <i>suburbio calificado</i>
Urbano baja densidad <i>marginalidad</i>
Gran uso parcelario <i>predominio vacío</i>
Gran uso parcelario <i>lleno por forestación</i>
Gran uso parcelario <i>lleno por edificación/artificial</i>
Suelo desnudo <i>planes de vivienda</i>
Country alta densidad
Country baja densidad
Horticultura
Agricultura (predominio verdor)
Humedal (4 tipos)
Agricultura (predominio suelo)
Agua



Se separó agricultura y humedales en varios grupos de distinta respuesta espectral para que cada clase sea lo más pura posible. Utilizando imágenes de alta resolución como referencia, se trazaron áreas de entrenamiento de todas las clases. Mediante el análisis de separabilidad de la divergencia transformada módulo 2, se obtuvo una separabilidad promedio de 1,87. Las clases que presentaron más confusión (menor separabilidad) son:

3 y 4 (Marginalidad vs. Suburbio calificado). Valor: 0,60;
 5 y 10 (Predominio vacío vs. Country baja densidad). Valor: 0,89;
 6 y 9 (Predominio forestal vs. Country alta densidad). Valor: 0,34;
 6 y 10 (Predominio forestal vs. Country baja densidad). Valor: 1,02;
 9 y 10 (Country baja vs. alta densidad). Valor: 0,86.

Selección del algoritmo o método de clasificación

Aunque el algoritmo más utilizado y que suele dar resultados aceptables es el de *máxima verosimilitud*, también se hizo el proceso de clasificación con otros algoritmos a fin de evaluar los resultados y optar por el más adecuado o fiable.

Según Chuvieco, (1996:476/477) hay 3 formas de medir la fiabilidad de la clasificación:

- Comparar el inventario de la clasificación con otro/s obtenido/s por fuentes convencionales. Esto supone que esas fuentes son plenamente fiables y que las clases o leyendas serán coincidentes. A menudo no son suposiciones válidas.
- Comparar el resultado de la clasificación con otras áreas de control relevadas con este fin. Este proceso puede realizarse de modo cualitativo para constatar cierta consistencia, o bien cuantitativo, mediante el diseño de un muestreo aleatorio, sistemático, etc. Esto último excede el alcance de este estudio.
- Comparar las áreas de entrenamiento con el resultado de la clasificación en esos sectores. Sin ser un criterio riguroso de validación, resulta útil para evaluar la calidad de las muestras como *verdad del terreno*, mediante la elaboración de una tabla o matriz de confusión que resume acuerdos y desacuerdos entre las áreas de entrenamiento y el resultado de la clasificación.

Calculada de este modo, la fiabilidad¹ global de los distintos métodos fué:

MÉTODO DE CLASIFICACIÓN	FIABILIDAD GLOBAL
Mínima distancia	59%
Discriminante lineal (FISHER)	73%
Máxima verosimilitud	80%
Clasificación en árbol	85% a 88% (según variante utilizada)

Fiabilidades

Fiabilidad del productor: parte de las áreas de entrenamiento que fueron bien clasificadas. El resto de las áreas

de entrenamiento (píxeles mal clasificados) constituyen el *error por omisión*. La *fiabilidad del productor* es el complemento a 100% del *error por omisión*.

Fiabilidad del usuario: probabilidad de que un píxel clasificado pertenezca realmente a esa clase. La *fiabilidad del usuario* es el complemento a 100% del *error por omisión*.

Para las dos variantes de clasificación en árbol las fiabilidades del productor y del usuario son:

Clasificación en árbol, variante	Gain ratio		Gini	
	PRODUCTOR	USUARIO	PRODUCTOR	USUARIO
1 Urbano alta densidad	95%	99%	98%	100%
2 Urbano densidad media	94%	100%	97%	99%
3 Urbano baja densidad <i>suburbio calificado</i>	89%	89%	77%	97%
4 Urbano baja densidad <i>marginalidad</i>	93%	88%	95%	88%
5 Gran uso parcelario <i>predominio vacío</i>	37%	87%	43%	96%
6 Gran uso parcelario <i>lleno por forestación</i>	56%	78%	57%	83%
7 <i>Idem lleno por edificación/artificial</i>	97%	84%	100%	88%
8 Suelo desnudo <i>planes de vivienda</i>	96%	90%	93%	91%
9 Country alta densidad	62%	91%	77%	84%
10 Country baja densidad	96%	52%	91%	64%
11 Horticultura	78%	88%	84%	85%
12 Agricultura (predominio verdor)	94%	100%	94%	99%
13 Humedal 1	77%	97%	85%	96%
14 Agricultura (predominio suelo)	94%	99%	96%	99%
15 Humedal 2	93%	81%	96%	81%
16 Humedal 3	77%	88%	76%	94%
17 Humedal 4	80%	99%	80%	100%
18 Agua	100%	100%	100%	100%

Analizando en detalle las tablas de confusión o matrices de error (no transcritas) se constata lo que era previsible en el análisis de separabilidad: los Countrys resultan clases que, según su densidad, tienden a confundirse con zonas forestadas o Vacías (suelo desnudo), y también entre sí.

Se puede optar por aceptar las fiabilidades tal cual están o intentar mejorarlas:

- Unificando las clases de menor separabilidad;
- Agregando información de base (limitándonos a imágenes LANDSAT, queda por ver el efecto de un análisis de texturas y el de agregar una imagen de otra época del mismo año).

Se constató que el análisis de texturas no hace un aporte concreto y se optó por unificar clases.

Los resultados para 2006 se analizarán conjuntamente con los de 1990 y 2000.

Estudio multitemporal

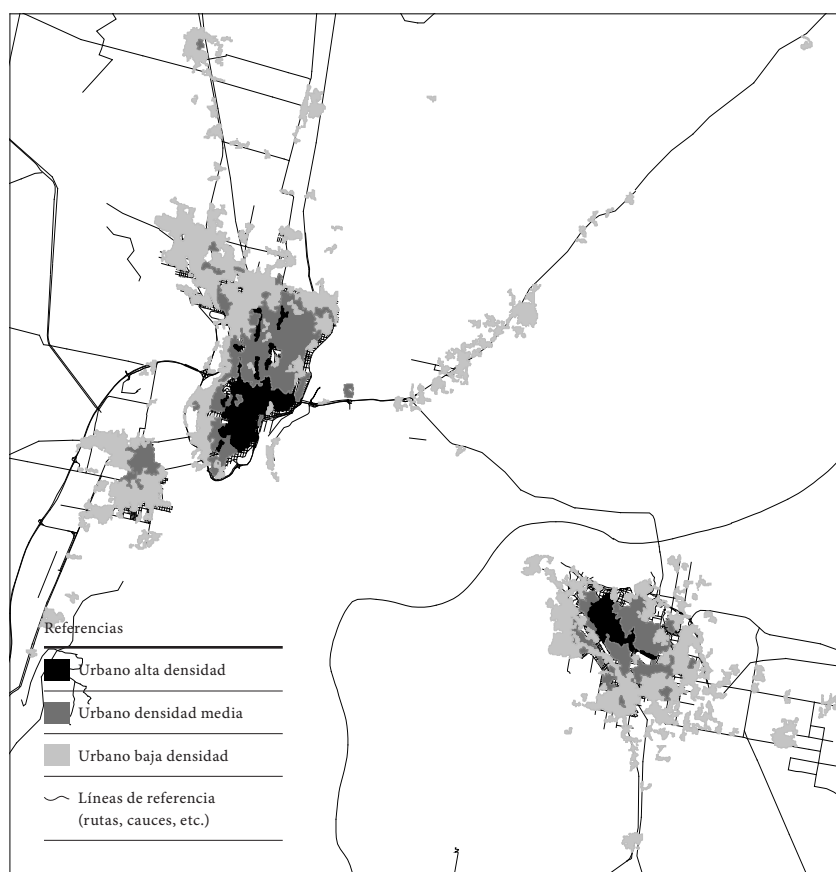
El análisis se realizará por comparación de imágenes temáticas obtenidas por clasificación similar a la de la situación actual, usando las mismas firmas espectrales, previa equiparación radiométrica de las imágenes de 1990 y 2000.

Equiparación radiométrica

El área de estudio se cubre en su mayoría con la escena 227-82 y se completa con la 226-82, existiendo un sector de superposición importante y útil a los fines de obtener muestras de reflectividad invariante (PIFs = pseudo invariant features) coincidentes en todas las imágenes, para aplicar el método de corrección lineal usando puntos de alta y baja reflectividad en cada banda por separado.

La metodología ideal hubiera sido la calibración de los ND para llevarlos a valores de radiación, pero no se contaba con toda la información necesaria. Cabe mencionar que Chuvieco (1996:432), cita resultados con 98% de correlación entre ambas metodologías (equiparación vs. calibración). La técnica de normalización radiométrica utilizada se basa en el uso de muestras de radiancia pseudoinvariantes (pseudoinvariant features PIF), (Schott *et al.*, 1988; Hill and Sturm, 1991).

Por inspección visual no se hallaron PIFs de alta reflectividad suficientemente extensos; por ello se optó por tomar percentiles de píxeles de alta y baja reflectividad, y usar el valor medio de los que coinciden geográficamente.

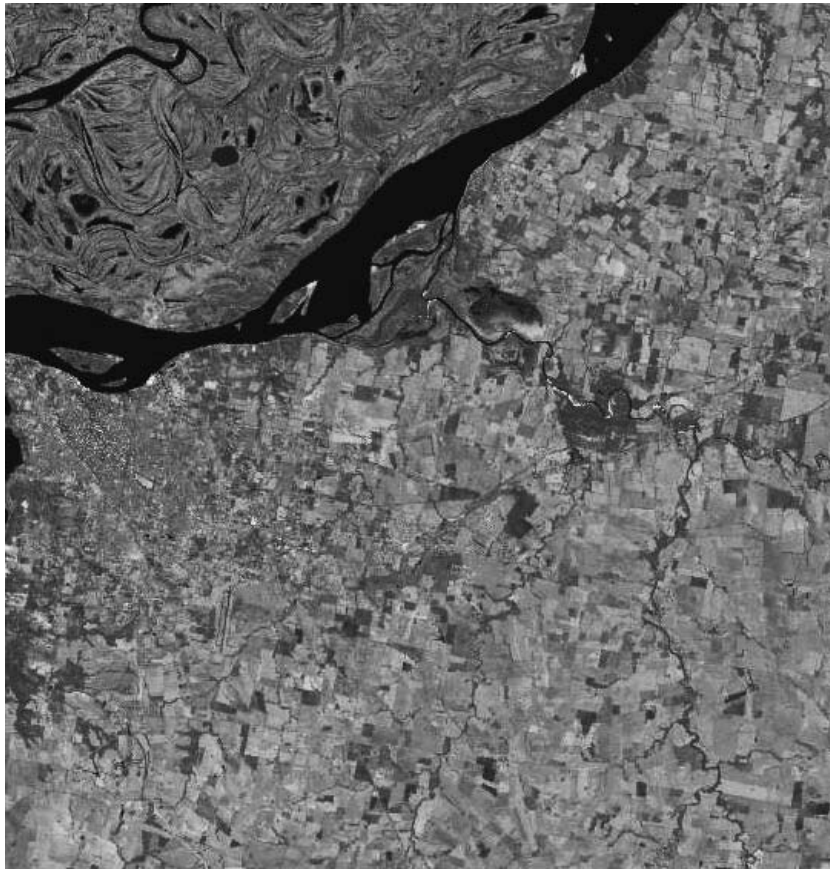


Nota: por su aspecto *salpicado* y para que sea posible apreciar al menos en parte este resultado en una imagen sin usar colores, se muestran sólo las 3 categorías urbanas.

Para cada par de bandas coincidentes se hizo un histograma sin tomar en cuenta los valores cero y se tomó el 5% de cada extremo como sectores de reflectividad alta y baja. Después se calculó el valor medio de los píxeles de alta y baja reflectividad, geográficamente coincidentes en ambas bandas.

Con esos valores se calculó la ganancia (*gain*) y el desplazamiento (*offset*) necesarios para equiparar cada banda con la de referencia.

Todas las imágenes se corrigieron para equipararlas a la de 2006 (situación actual, de la que más conocimiento se tiene), es decir que el proceso de equiparación radiométrica se hizo para 24 bandas (6 por cada imagen).



Izquierda. Imagen de 2006. Página siguiente. Se muestran vistas antes (las 4 superiores) y después de la equiparación radiométrica aplicada (las 4 inferiores).

Clasificación

Se clasificaron las imágenes obtenidas utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud y con las firmas espectrales obtenidas de la imagen de 2006.

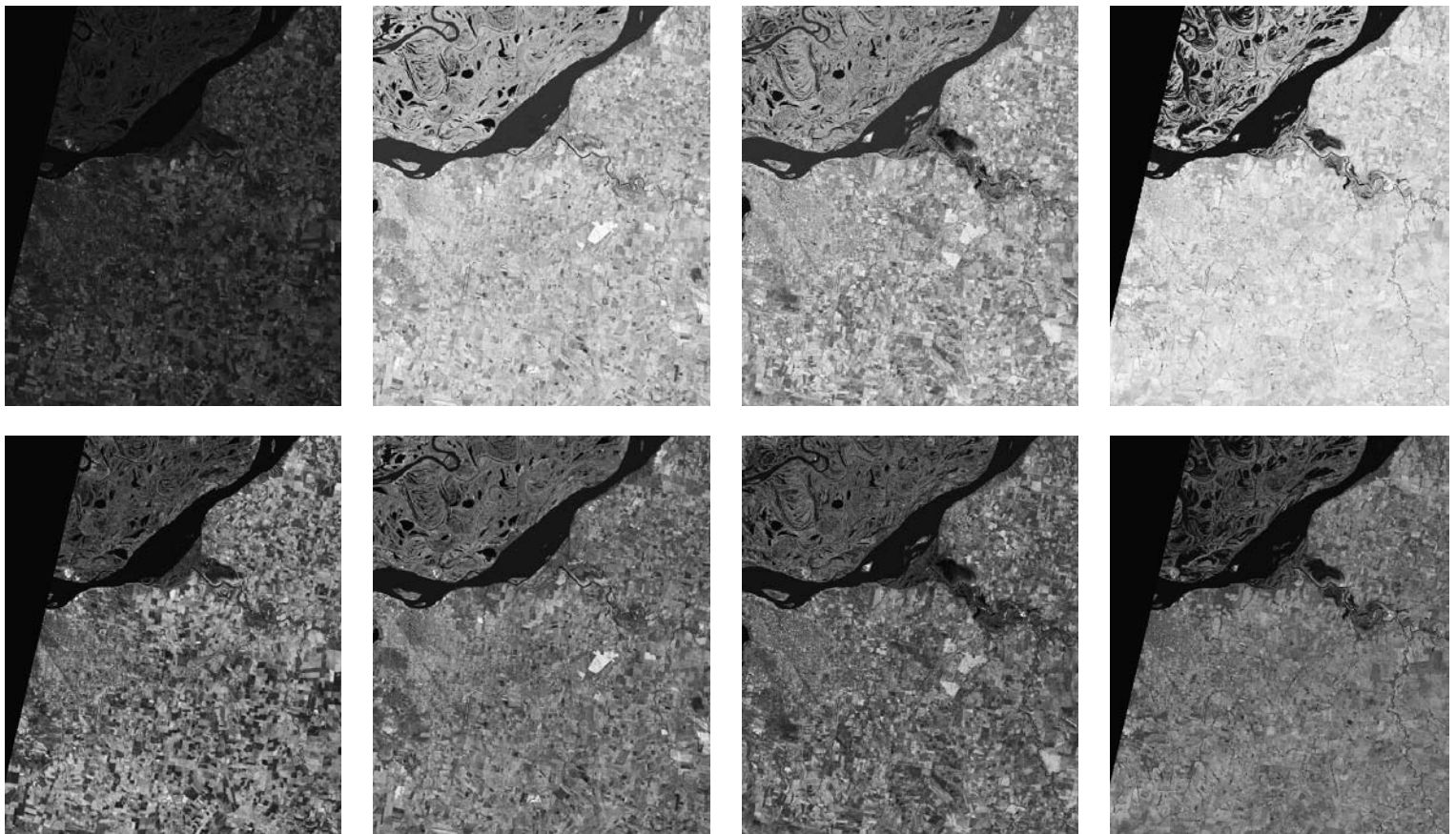
A simple vista se constata que la diversidad de fechas y estados hídricos de las imágenes influye notoriamente. Se acentúa el problema de confusión de clases heterogéneas y aparece confusión a causa de los diferentes estados fenológicos de la vegetación y de los diferentes contenidos de agua del suelo.

Clases heterogéneas: firmas espectrales *amplias* o *difusas* (variabilidad sub-píxel y sub-muestra, píxel mixto, muestras no homogéneas, etc.). Clases: urbano, frutihorticultura, vegetación natural mixta. *Efecto causado:*

clasifican certeramente como píxeles de esas clases otros que no lo son: renovales de ñoas como frutihorticultura, riveras o arenas como urbano, etc.

Para paliar esta dificultad se agregará un análisis de textura como bandas adicionales de información de base. Se sabe que así desmejora la resolución espacial por tratarse de un tipo de filtro de paso bajo, pero si mejora sustancialmente el resultado, la escala pasa a un segundo plano de importancia.

Diferencias de época del año: se sabe la verdad del terreno de 2006 (fecha de las fotos de alta resolución disponibles); las firmas espectrales son compatibles con imágenes de años anteriores (gracias a la equiparación radiométrica), siempre y cuando sean compatibles las



condiciones al momento de la toma de imágenes. Para las imágenes satelitales disponibles no se cumple este último requisito: cada una es de una estación distinta del año, así los distintos estados fenológicos de la vegetación e hídricos del suelo dificultan la clasificación correcta de los píxeles. Estos problemas afectan principalmente a las clases que contienen vegetación (prácticamente todas en nuestro caso) o donde es posible una gran diversidad de estados hídricos (todo el sector de riberas, islas, bajos, etc).

Efecto causado: terrenos húmedos tienden a clasificar como árboles, cierta vegetación natural podría confundirse con cultivos, la diferenciación entre diversas clases de uso urbano es menos viable, etc.

Para paliar esta dificultad se unificarán las clases urbanas en una sola; se calculará la *distancia* de clasificación y se marcarán como *no identificables* los píxeles que clasifiquen con mucha distancia (dudosos). También se podrían usar máscaras para excluir del análisis las zonas de alta variabilidad hidrológica.

Como cuestión no satisfecha se había previsto evaluar la fiabilidad de los resultados, comparándolos con los datos censales disponibles y usando como marco de referencia la división geográfica usada para discriminar esa información (distritos, radios o grupos de radios censales, etc.) Los datos censales útiles para esto son los que están expresados en unidades de superficie o que, de algún modo, se pueden relacionar con superficies. Dada la

dificultad para encontrar coincidencia entre las clases/ leyendas de los datos censales y de la clasificación, no fue posible realizar dicha evaluación.

Análisis

Una vez obtenidos los resultados de la mejor calidad posible, el análisis de variaciones de una fecha a otra se puede hacer pixel a pixel (generando un nuevo mapa) o por inventarios, siempre con alguna división del territorio como marco de referencia (polígonos disponibles).

Resultados

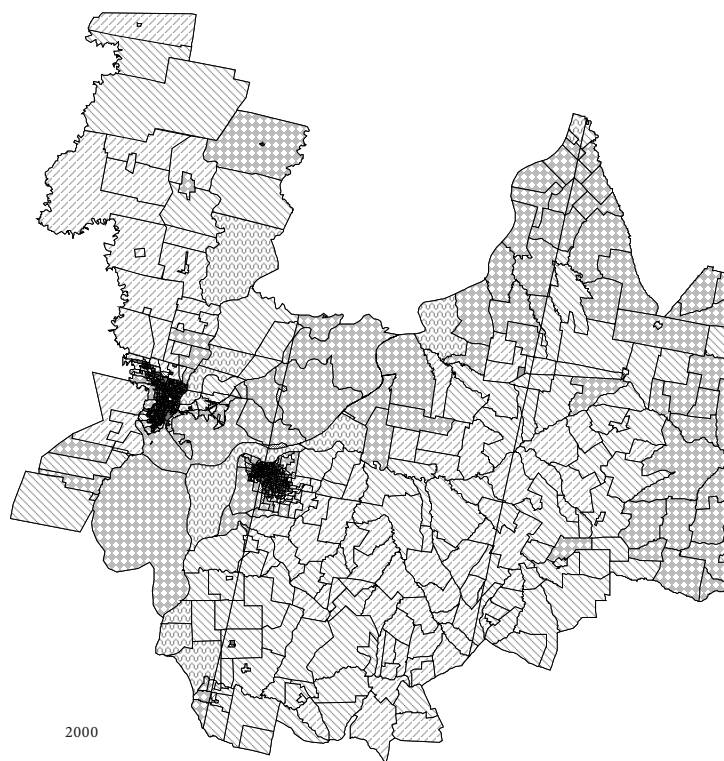
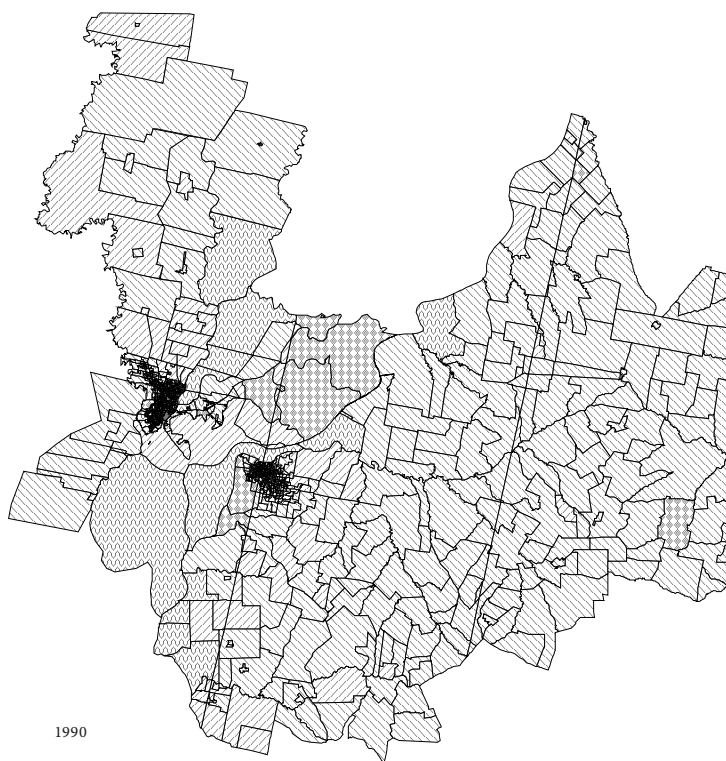
Para la comparación entre imágenes de 1990, 2000 y 2006 se utilizaron 7 clases. Esta reducción está vinculada a la diversidad de época del año de las imágenes utilizadas.

1. Urbano: unificando la diferenciación cualitativa de densidades que se hizo para '06.
2. Fruti/horticultura: sectores cultivados que presentan gran diversidad y subdivisión del terreno.
3. Cultivos: uso agrícola y ganadero, incluyendo praderas implantadas en buen estado.
4. Vegetación herbácea: uso ganadero extensivo, vegetación natural o de sustitución (cultivos degradados).
5. Monte y forestación: todo tipo de árboles y arbustos.
6. Suelo desnudo: vegetación escasa o nula (movimientos de tierra en general).
7. Agua: ríos, lagunas y anegamientos de todo tipo.

Organización de resultados

Para el análisis multitemporal se utiliza una capa de segmentación del territorio como marco de referencia. En primer lugar se calculó la clase mayoritaria y la frecuencia con que se presenta en cada radio censal (% del área del radio ocupada por la clase mayoritaria), esto para las imágenes de 1990, 2000 y 2006.

Clase mayoritaria de uso del suelo por radio censal en toda el área de estudio:



Usos predominantes

■	Urbano
▨	Cultivado
▧	Vegetación herbácea
▩	Forestación
■	Suelo desnudo
▨	Agua

En un plano *síntesis*, se unifican los resultados en un número de 3 dígitos:

primer dígito: clase mayoritaria en 2006;

segundo dígito: clase mayoritaria en 2000;

tercer dígito: clase mayoritaria en 1990.

Este plano tiene utilidad en formato digital e interactivo.

Así es sencillo separar los radios según la evolución, ya sea para colorear en un mapa o calcular las superficies afectadas.

Valores bajos de frecuencia indican que la segmentación en radios censales no parece muy apropiada para el análisis. En promedio ponderado por superficie, la clase mayoritaria representa el 38% del territorio, es decir que la diversidad interna en cada radio es importante. Y se aprecia a simple vista en los radios de mayor superficie (son muy cambiantes porque esa *mayoría* no predomina fuertemente y con poco cambio pasa a ser otro el uso *mayoritario*).

Este efecto debería reducirse al usar una segmentación en unidades más pequeñas (pág. siguiente).

En segundo lugar se realizó un procedimiento similar para un sector de la segmentación catastral en los sectores periurbanos de las ciudades de Santa Fe y Paraná.

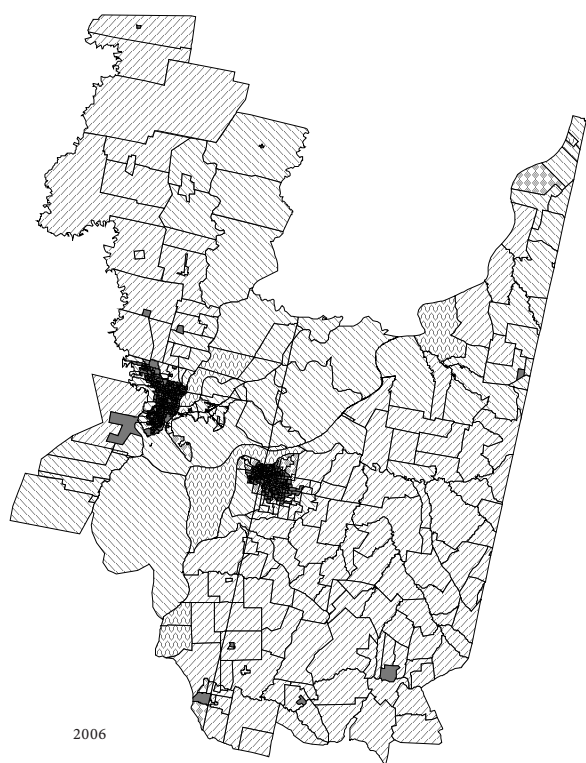
Así se pasa de 38% a 60% de *pureza* de la clase mayoritaria, en promedio ponderado.

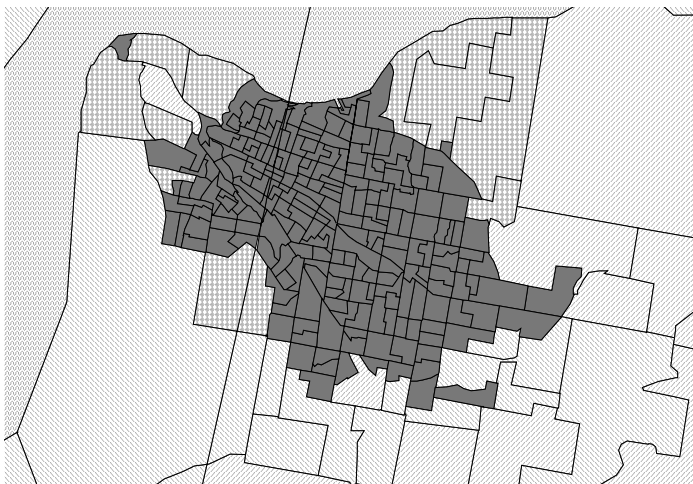
Luego se realizó un inventario de las áreas ocupadas por cada clase en cada unidad de segmentación.

A modo de ejemplo se toman sectores urbanos y periurbanos en las ciudades de Santa Fe y Paraná. Se podría hacer un seguimiento aún más detallado usando el método de inventarios aplicado a cada radio censal. Sin embargo la calidad de las clasificaciones no lo justifica, por las causas mencionadas al explicar la metodología (imágenes de distintas épocas del año y distintos estados hídricos y clase fruti-horticultura sin una firma espectral muy definida).

Interpretación de los inventarios resultantes

Este plano tiene utilidad en formato digital e interactivo por ello se ha definido un código unificado sencillo de interpretar.





Evolución del uso del suelo en la ciudad de Paraná. Años 1990, 2000 y 2006.



Evolución del uso del suelo en la ciudad de Santa Fe. Años 1990, 2000 y 2006.

Usos predominantes

■	Urbano
▨	Cultivado
▨	Vegetación herbácea
▨	Forestación
■	Suelo desnudo
▨	Agua

Aún así, existen inconsistencias derivadas de los problemas en la clasificación, según ya se mencionó.

- Es muy notorio el *crecimiento de montes* (5NN o N5N); la clase 5 está levemente subestimada en las imágenes de 1990 y bastante sobrestimada en las de 2000.
- El estado hídrico cambia mucho entre imágenes, eso explica también las variaciones de la clase 7.
- Cambios alternativos entre las clases 3 y 4 son totalmente normales en suelos cultivados: las praderas degradadas y suelos con vegetación de sustitución (gramíneas, normales entre cultivos) clasifican como 4.
- La clase 2 se confunde bastante con la 3 a causa de la gran diversidad, más aún al hacer la *extrapolación* de firmas a 2000 y 1990. Al segmentar en radios censales prácticamente desaparece, pero aún usando parcelas catastrales aparece como debería; para mejorar estos resultados se debería estar trabajando con imágenes de más resolución espacial (pixel más chico).

Conclusión

A pesar de las dificultades para realizar la clasificación multitemporal, siendo el sector *urbano* el de principal interés, se observa buena fiabilidad de los resultados aun sin hacer un análisis cuantitativo de dicha fiabilidad.

Dado que se trata del estado de avance de un proceso, resulta esperable una optimización de resultados rehaciendo el trabajo con imágenes de épocas del año similares agregando alguna imagen de píxel más chico para trabajar con información de textura (satélites SPOT, IKONOS, Quick Bird, etc.).

Atendiendo a la posibilidad de continuar con un seguimiento permanente, cabe señalar la disponibilidad de imágenes satelitales de características prácticamente comparables con las LANDSAT más una banda monocromática de píxel más chico (para trabajar con textura), pero sin costo de comercialización.

Se ha reiterado el carácter de *yacimiento* que tiene un Observatorio. En este sentido, la presente se constituye en una herramienta más que permite cuantificar las transformaciones operadas en materia de usos dominantes tanto en áreas rurales como urbanas.

A partir de aquí se podrá detectar, puntualizar, señalar, circunscribir procesos de expansión-retracción de la urbanización, niveles de consolidación, evolución de los valores del suelo, encarar problemáticas referidas de abastecimiento diario de las localidades y afrontar las referidas a situación ocupacional por ramas y sectores entre otros.

Referencias citadas

- Chuvieco, E. (1996): *Fundamentos de teledetección especial. Tercera edición*. Ediciones RIALP SA, Madrid, p. 568.
- Hill, J; Sturm, B. (1991): «Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring». *International Journal of Remote Sensing*. pp. 12 / 1471 / 7941.
- Schott, J; Salvaggio, C; Volchok, W. (1988): «Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features». *Remote Sensing of Environment*. pp. 26 / 1 / 16.

Bibliografía

- Martínez de San Vicente, I; Floriani, H; Soijet, M; Rausch, G; Visintini, M. (2008): «Observatorio urbanístico del Área Metropolitana Santa Fe-Paraná». Ponencia presentada en la *Tercera reunión de Usuarios de Tecnologías de la información Geográfica del Nordeste Argentino*. Laboratorio de Cartografía Digital, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia.
- Martínez de San Vicente, I; Floriani, H. Becarias: Rausch, G; Visintini, M; Martínez de San Vicente, I; Floriani H; Soijet, M. (2007): «Observatorio urbanístico del Área Metropolitana». Ponencia presentada en *IV Seminario Internacional de Ordenamiento Territorial*. Instituto de Cartografía, Investigación y Formación para el Ordenamiento Territorial (CIFOT), Facultad de Filosofía y Letras, UNCU, Mendoza.