



Canal de  
Isabel II

## CUADERNOS DE I+D+i

# 14

Seguimiento de la consolidación  
del desarrollo urbano en la  
Comunidad de Madrid mediante  
técnicas de teledetección







© Canal de Isabel II – 2011

**Autores:**

Lourdes Albizua

Uxue Donezar

Ana Leránoz

**Dirección del estudio:**

Juan Carlos Ibáñez

**Depósito Legal:**

Maquetación: BLINK Comunicación S.L.

Impresión:

Estilo Estugraf Impresores S.L.



## CUADERNOS DE I+D+i

14

Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid  
mediante técnicas de teledetección



## **EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.



## PRESENTACIÓN

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo del Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde Canal de Isabel II para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los cuadernos de I+D+i ya publicados son los que figuran en la presente tabla.

Nº colección	Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados
1	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de Pez Cebra
10	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II



## FICHA TÉCNICA



<b>Título del proyecto</b>	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección.
<b>Línea de investigación</b>	Aseguramiento del equilibrio disponibilidades /demandas.
<b>Unidades implicadas de Canal de Isabel II</b>	Subdirección de I+D+i. Subdirección de Planeamiento y Coordinación Municipal.
<b>Participación externa</b>	Trabajos Catastrales S.A.
<b>Objeto y justificación del proyecto</b>	<p>La previsión de la evolución temporal de la demanda en los distintos escenarios de futuro y su ubicación geográfica se basa en la información aportada en los planes municipales de ordenación urbana. Sin embargo, la evolución real del proceso de consolidación de estos planes está sometida a muchos factores circunstanciales, que no se prevén con precisión en la planificación urbana.</p> <p>La disponibilidad actual de imágenes de satélite multispectrales de media y de alta resolución, y la posibilidad de su proceso automático o semiautomático, mediante técnicas de teledetección, hacen posible el seguimiento, prácticamente en tiempo real, de la evolución del uso del territorio y el contraste con las previsiones realizadas a corto plazo, de forma que sea posible un ajuste más preciso en las prioridades de construcción de las nuevas infraestructuras.</p>
<b>Contribución al estado del arte</b>	Se ha desarrollado y puesto a punto una metodología operativa para la identificación de cambios en el tejido urbano municipal y el seguimiento de la evolución temporal de las zonas urbanizadas, en relación con la consolidación de los distintos planes de desarrollo urbano.
<b>Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes</b>	Se han procesado cuatro series de imágenes de media resolución del satélite SPOT-5, en modo multispectral 10 metros, y pancromática 2,5 metros, con cobertura sobre toda la Comunidad de Madrid, correspondientes al verano 2008; verano 2009; primavera 2010; y verano 2010. Se ha creado una base de datos cartográfica donde se ha registrado la información urbanística de las zonas en desarrollo correspondiente a esas fechas y su relación con el planeamiento urbano. Se ha incluido también información relativa a la superficie de zonas verdes clasificadas para cada estrato, municipio, y por rango de actividad vegetativa.
<b>Resumen de resultados obtenidos</b>	Los resultados se expresan mediante la clasificación de recintos urbanos de las zonas en desarrollo según tipo de objeto (edificios, viales, suelo no ocupado), y de los distintos ámbitos según su grado de consolidación y desarrollo en cada una de las fechas analizadas. Se han identificado las zonas verdes urbanas y las rurales de secano o regadío, clasificándolas en función de los índices de vegetación (NVDI).
<b>Líneas de investigación abiertas para la continuación de los trabajos</b>	<p>Utilización combinada de imágenes satelitales de alta y muy alta resolución, adecuando la periodicidad de adquisición y cobertura según el grado de consolidación de distintas zonas de la Comunidad de Madrid.</p> <p>Utilización de información LIDAR (Light Detection and Ranging) de muy alta precisión planimétrica y altimétrica.</p>



## RESUMEN EJECUTIVO



En el presente resumen ejecutivo se presenta la visión sinóptica del desarrollo del proyecto a través de los siguientes puntos:

- 1) Antecedentes,
- 2) Objetivos,
- 3) Metodología,
- 4) Resultados,
- 5) Conclusiones, y
- 6) Líneas de investigación futura.

## 1. Antecedentes

El desarrollo y ordenación del territorio en las ciudades tiene, entre otras consecuencias, un incremento y redistribución geográfica de la demanda de agua. Estos cambios se producen cada vez con mayor dinamismo y Canal de Isabel II, como entidad responsable del abastecimiento de agua, debe programar con antelación suficiente las inversiones necesarias para disponer las infraestructuras que aseguren las condiciones del servicio a todas las propiedades que se incorporen al sistema, sin menoscabo de la garantía y calidad de servicio al conjunto del sistema.

Las predicciones de evolución de las demandas, tanto en su cuantía como en su distribución territorial, tienen como principal referente las expectativas de crecimiento vinculadas al desarrollo del planeamiento urbano municipal. La velocidad a la que se produzca la consolidación del suelo urbano es determinante en los plazos requeridos para la construcción y puesta en servicio de las nuevas infraestructuras.

Canal de Isabel II, en su plan de I+D+i, dispone de una línea de investigación sobre “Aseguramiento del equilibrio entre disponibilidades y demandas”, y en ese marco se han llevado a cabo diversos proyectos de investigación sobre el comportamiento actual de la demanda de agua y previsiones de evolución futura a diversos horizontes. El proyecto que aquí se presenta tiene como objeto acotar la incertidumbre existente en cuanto a los plazos reales de consolidación de las previsiones de expansión urbana contenidas en los planes urbanísticos municipales.

Los satélites de observación de la Tierra y las técnicas más avanzadas de teledetección se han propuesto como herramientas para el seguimiento periódico de la consolidación urbanística en la Comunidad de Madrid. Estas técnicas también se han mostrado útiles para la detección y cuantificación de las zonas verdes urbanas, que en la actualidad suponen un elemento importante de la demanda de agua potable.

La información resultante del proyecto que se presenta a continuación, se ha incorporado en el sistema de información geográfica de Canal de Isabel II, y servirá de base para la elaboración y actualización de los planes de desarrollo de infraestructuras estratégicas de abastecimiento, que deben dar respuesta anticipada a las futuras demandas de agua ocasionadas por el proceso de expansión urbana en la Comunidad de Madrid.

## 2. Objetivo

El trabajo objeto de este proyecto consiste en la puesta a punto de una metodología operativa utilizando técnicas de teledetección, que permita la definición y elaboración de una base de datos cartográfica de la Comunidad de Madrid, que se actualice periódicamente, y en donde se refleje la evolución temporal de las zonas urbanizadas como consecuencia de la consolidación de los distintos planes de desarrollo urbano de los municipios.

Además, el alcance de la metodología a desarrollar contempla la detección y cuantificación de la evolución de las zonas verdes urbanas, cuyo peso en la demanda total de agua, es cada vez mayor, y la estimación de la demanda de agua en zonas urbanas como consecuencia de la consolidación de los planes urbanísticos.

El proyecto se desarrolló durante los años 2009 y 2010 con el proceso de imágenes de satélite correspondientes al verano de 2008, verano 2009 y principio de la primavera y final del verano de 2010.

## 3. Metodología

La metodología desarrollada se ha articulado en las siguientes fases:

- Fase 1. Recopilación y análisis de la información disponible
- Fase 2. Programación y adquisición de las imágenes de satélite
- Fase 3. Diseño de la base de datos cartográfica
- Fase 4. Proceso de imágenes
- Fase 5. Estimación de la demanda de agua

### Fase 1. Recopilación y análisis de la información disponible

La información preliminar más relevante aportada al proyecto ha sido:

- Edición digital de la ortofotografía a escala 1:5 000 del vuelo 2006 de toda la Comunidad de Madrid.
- Ortoimagen SPOT5 de 2005 de la cobertura de la península del PNT.
- Cartografía digital de catastro urbano actualizada en 2009.
- Base de datos cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior, actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006.
- Planeamiento urbanístico vigente 2009 y en tramitación, en formato digital.
- Modelo digital del terreno 25 metros, procedente del IGN.
- Mapa SIOSE (Sistema de información de ocupación del suelo español) de la Comunidad de Madrid, año de referencia 2005 a escala 1:25.000.

### Fase 2. Programación y adquisición de las imágenes de satélite

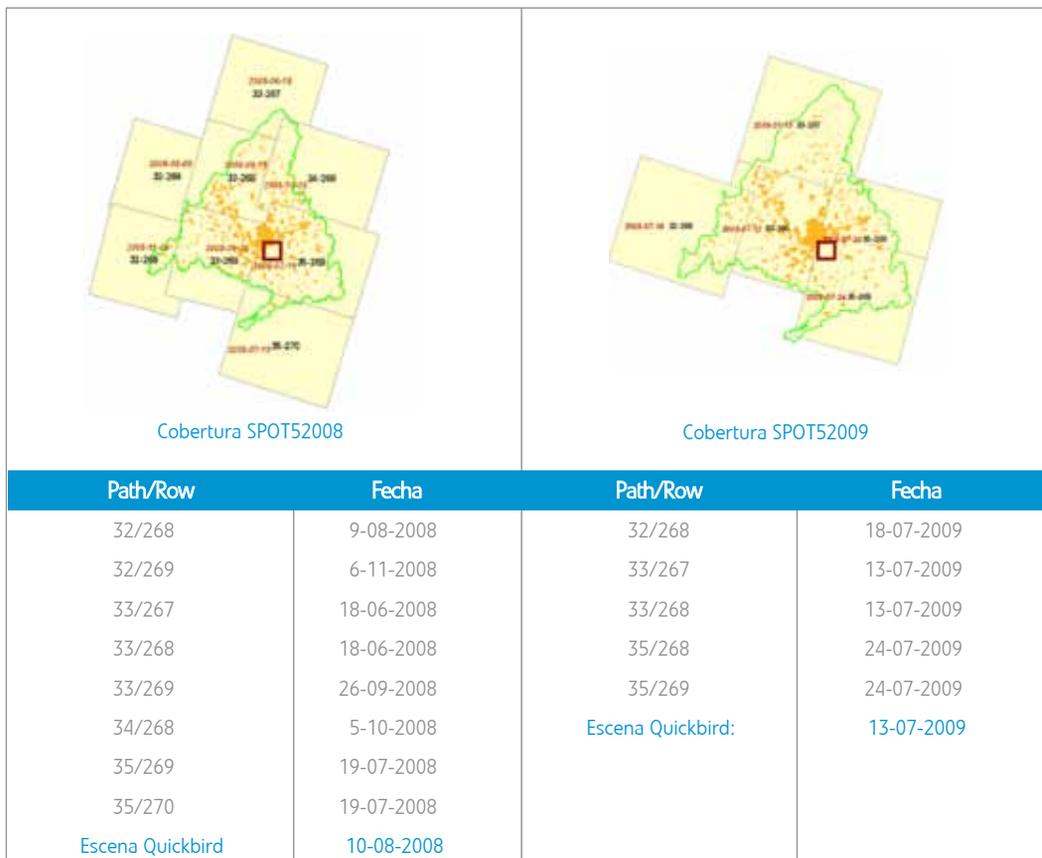
Las imágenes utilizadas en el proyecto han sido adquiridas por el satélite SPOT5, en modo multiespectral 10 metros y pancromática 2,5 metros, sobre toda la Comunidad de Madrid, que permite generar un producto combinado mediante fusión, idóneo para realización de seguimientos de cambios urbanísticos.

Se han utilizado las series de imágenes correspondientes a verano de 2008, verano de 2009, primavera y verano de 2010.

Las imágenes 2008 se seleccionaron del archivo de imágenes SPOT5 y se han utilizado para el diseño y generación de la base de datos cartográfica. Las imágenes 2009 y 2010 se adquirieron mediante programación específica, y se han utilizado para la actualización de la base de datos cartográfica.

La distribución de imágenes y fechas de adquisición para todas las coberturas del proyecto se presentan en las figuras 1 y 2.

**Figura 1. Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de verano 2008 y verano 2009 (en rojo zona piloto Quickbird)**



**Figura 2. Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de primavera 2010 y verano 2010 (en rojo zona piloto Quickbird)**



Con el fin de realizar una validación y control de calidad de la metodología desarrollada para el proyecto se adquieren también imágenes del satélite Quickbird, en modo multiespectral 2,4 metros y pancromática 0,6 metros, sobre una zona piloto de 64/77 kilómetros cuadrados, en fechas similares a las coberturas SPOT5. Para la zona piloto de Rivas Vaciamadrid las imágenes adquiridas son de fechas, 10 de agosto 2008 (seleccionada del catálogo de imágenes) y 13 de julio 2009 (mediante programación). En 2010 se elige otra zona sobre el municipio de Móstoles, adquiriéndose las imágenes de fechas 28 de marzo 2010 y 21 de agosto 2010, mediante programación.

### Fase 3. Diseño de la base de datos cartográfica

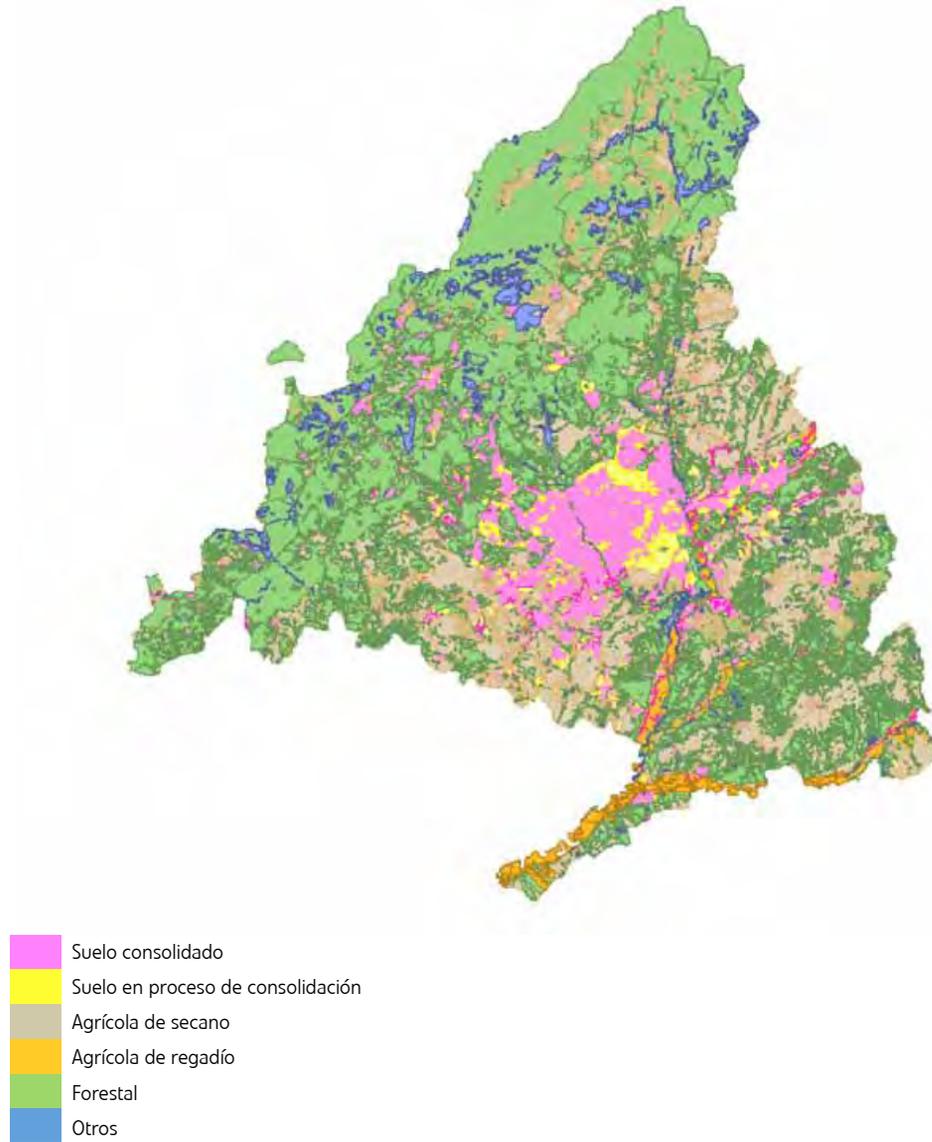
La definición y elaboración de una base de datos cartográfica, que integre la evolución temporal de las zonas urbanas en base a la consolidación de los planes urbanísticos, constituye el objetivo principal del presente proyecto. El diseño de la base de datos, definida por la leyenda de monitorización de los cambios, responde a la capacidad de discriminación de las imágenes SPOT5, en las diversas categorías de interés.

La base de datos cartográfica definitiva consta de las siguientes 6 capas: estratos, ámbito urbano, recinto urbano, subestrato (verde), ámbito verde y recinto verde, según se ilustra en la figura 3.

**Estratos.** Esta capa delimita las zonas con comportamientos homogéneos, dentro del ámbito territorial. Se han definido los siguientes 6 estratos:

1. **Suelo consolidado:** integra el tejido urbano consolidado. Constituido por las edificaciones estables con cierta antigüedad y zonas donde no hay obras.
2. **Suelo en proceso de consolidación:** zona de obras, suelen ser amplias urbanizaciones, bien en los suburbios o en pleno centro urbano.
3. **Agrícola seco:** definido a partir del estrato "cultivo" del mapa SIOSE.
4. **Agrícola regadío:** definido a partir del estrato "cultivo" del mapa SIOSE.
5. **Forestal:** definido a partir del estrato forestal del mapa SIOSE.
6. **Otros:** resto de zonas, zonas rocosas, embalses etc.

Figura 3. Distribución de estratos por clases



**Ámbito urbano.** Zonas con un grado de consolidación homogéneo, dentro del estrato “suelo en proceso de consolidación”. Cada uno de ellos lleva una información asociada integrada en la base de datos mediante los siguientes atributos.

1. Urbanización o trama urbana existente.

- Urbanización: amplias urbanizaciones en construcción, en las que se pueden discriminar objetos (edificios, suelo, viales etc.). Localizadas generalmente en los suburbios.
- Trama: zonas generalmente de poca superficie donde no se discriminan objetos. Se pueden encontrar dentro o fuera de la masa urbana.

2. Estado, hace referencia a los diferentes estados de ejecución de las obras, en que se puede encontrar cada ámbito. Se contemplan las siguientes fases:

- En proceso de urbanización,
- Urbanización finalizada,
- En proceso de edificación,
- Edificación finalizada.

**Recinto urbano.** Son los elementos de mayor detalle dentro los ámbitos urbanos y de la base de datos cartográfica. Se presentan las siguientes clases: edificio; suelo pendiente de ejecución (todo aquello que no es edificio ni vial); viales asfaltados, y viales no asfaltados, según se ilustra en la figura 4.

Figura 4. Clases de recintos urbanos



**Recinto urbano**  
Clase de recinto urbano

- Edificio
- Suelo pendiente de ejecución
- Vial asfaltado
- Vial no asfaltado

**Subestrato (verde).** Integra la vegetación que inunda los estratos “suelo consolidado” y “suelo en proceso de consolidación”, y se calcula a partir de los índices de vegetación.

**Ámbito verde.** Constituido por dos clases: campos de golf y, parques y jardines.

**Recinto verde.** Constituidos por dos clases de recintos verdes: árbol y césped.

Con esto quedan definidos los elementos de la base de datos cartográfica, diseñada específicamente para el proyecto, y que se ha implementado en formato Geodatabase de ESRI, compatible con el sistema de información geográfico corporativo de Canal de Isabel II, GAUDY.

#### Fase 4. Proceso de imágenes

La metodología de proceso de imágenes elaborada para el proyecto se estructura en las siguientes categorías de procesos para las imágenes SPOT5. Cada una de ellas integra todos aquellos procesos en cadena que hay que realizar para obtener un objetivo específico.

1. Procesado básico.
2. Procesos específicos de seguimiento urbano.
3. Procesos específicos de delimitación de la zona verde.
4. Actualización a partir de las nuevas series de imágenes.
5. Verificación de metodología con imágenes Quickbird.

**1. Procesado básico**, integra los tratamientos previos que hay que realizar sobre las imágenes de satélite para que estén disponibles para su utilización en los procesos de clasificación. Se consideran los siguientes tratamientos previos:

- Control de calidad numérico y visual de las imágenes adquiridas.
- Ortorrectificación.
- Normalización relativa.
- Fusión.
- Mosaico.

**2. Procesos específicos de seguimiento urbano**, orientados a la identificación y clasificación de los recintos urbanos para su posterior integración en la base de datos cartográfica. Incluye los siguientes procesos:

- **Estratificación**, delimitación de zonas con un comportamiento urbano y de ocupación del suelo homogéneo, realizado a partir del mapa SIOSE y de las coberturas de imágenes de satélite 2005, (fecha de referencia del SIOSE) y 2008 (fecha del proyecto).
- **Segmentación de imágenes**, tiene como objetivo identificar los recintos urbanos que constituyen los ámbitos, para clasificarlos en la siguiente fase, según su categoría (edificio, suelo pendiente de ejecución, vial asfaltado, vial no asfaltado).
- **Clasificación orientada a objetos**, técnica de clasificación avanzada que se realiza sobre los objetos y tiene en cuenta la distribución espacial existente en la imagen (forma, textura y propiedades espectrales de los objetos que la forman). Se ha realizado utilizando la herramienta Feature Analyst de Erdas que parte de diferentes patrones de búsqueda en función del elemento a representar y se basa en técnicas de aprendizaje, utilizando procesos iterativos e interactivos. Los resultados se revisan por fotointerpretación.

- **Detección de cambios**, se utiliza para la actualización y delimitación de los estratos a fecha 2008; y en años posteriores, para la actualización y delimitación de estratos, localización de nuevos ámbitos urbanos, y actualización de recintos urbanos en ámbitos ya existentes.

Se utiliza la herramienta Delta Cue (ERDAS), que permite realizar cálculos comparativos entre imágenes de fechas diferentes, con el fin de valorar los cambios acaecidos en el territorio entre ambas fechas. Integra un conjunto de algoritmos basados en la comparación entre las imágenes de trabajo, a partir de combinaciones de sus bandas originales y/o sintéticas.

**Figura 5. Clasificación orientada a objetos, con catastro adecuado (imagen superior) y no adecuado (imagen inferior), sobre imagen SPOT5 fusionada 2,5 metros**



**3. Procesos específicos de la delimitación de la zona verde**, engloba las zonas verdes urbanas o jardines, las zonas agrícolas y las zonas naturales. Los procesos para su seguimiento son:

- **Cálculo del NDVI**. Los índices de vegetación se basan en el comportamiento espectral característico que presenta la vegetación, y en general se definen como relaciones sencillas calculadas entre las bandas roja e infrarroja cercana, ofreciendo una medida cuantitativa de su estado. La delimitación de la superficie verde se realiza a partir del índice de vegetación normalizado (NDVI), que es el índice más ampliamente extendido, y que se define como la relación normalizada entre las reflectividades de las bandas infrarroja ( $\rho_{IRC}$ ) y roja ( $\rho_R$ ).

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

A partir del mosaico de reflectancias de las imágenes se ha calculado el NDVI para el ámbito de estudio.

- Definición de umbrales de actividad vegetativa para cada estrato. Se establece el valor numérico del NDVI en la imagen a partir del cual se considera que ese píxel es vegetación, y se ha estimado dentro de cada estrato, teniendo en cuenta sus características (histogramas de valores de NDVI, inspección visual). En cada estrato se han determinado los siguientes rangos: el sustrato verde que inunda el suelo consolidado y el suelo en proceso de consolidación (no vegetación, NDVI medio y NDVI alto); suelo agrícola seco y el suelo agrícola regadío (No cultivo y cultivo en pie); y forestal (no vegetación, NDVI medio y NDVI alto).
  - Generación de sustrato verde. Segmentación. Clasificación de árbol y césped. Integra la vegetación (NDVI medio + NDVI alto) que inunda los estratos suelo consolidado y suelo en proceso de consolidación, y está constituido por ámbitos verdes (parques y jardines y campos de golf), que a su vez se clasifican mediante procesos de segmentación y clasificación con la herramienta Feature Analyst en recintos verdes de árbol y césped.
4. **Actualizaciones a partir de las nuevas series de imágenes.** El proceso de las series de imágenes posteriores tiene como objetivo actualizar la base de datos cartográfica. El proceso básico y los procesos de delimitación de la zona verde son idénticos a los indicados anteriormente. Sin embargo los procesos específicos de seguimiento urbano se centran en la actualización de la estratificación, respecto a la realizada en las respectivas actuaciones anteriores. En concreto, se presta especial interés en la localización de nuevos ámbitos urbanos que amplían el estrato suelo en proceso de consolidación. Esta actualización de la estratificación se realiza mediante técnicas de detección de cambios.

Los resultados del proceso del seguimiento urbano obtenidos de cada cobertura se integran en su respectiva Geodatabase actualizando de esta manera la base de datos cartográfica. El análisis conjunto de todas ellas permite realizar el seguimiento urbano del grado de consolidación de la Comunidad de Madrid.

5. **Verificación de metodología con imágenes Quickbird.** Con el fin de servir de contraste y control de calidad de la metodología desarrollada del proceso, se han adquirido imágenes de alta resolución del satélite Quickbird, en modo multiespectral 2,4 metros y pancromática 0,6 metros, y en fechas similares, en la zona piloto de Rivas Vaciamadrid, de 64/77 kilómetros cuadrados (10 de agosto 2008, 13 de julio 2009) y en la zona de Móstoles de 77 kilómetros cuadrados (28 de marzo 2010 y 21 de agosto 2010).

La metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT5. De la verificación realizada, se concluye:

- Los resultados obtenidos con Quickbird son análogos a los obtenidos con SPOT5.
- Se considera que la metodología desarrollada para SPOT5 es satisfactoria, y queda avalada por las pruebas realizadas con Quickbird.

## Fase 5: Estimación de la demanda de agua

El objetivo de esta fase es calcular la estimación de la demanda de agua correspondiente al consumo de la consolidación de la zona urbana y las zonas verdes.

La hipótesis de partida para la estimación de la demanda de agua en zona urbana como producto derivado y complementario del seguimiento del desarrollo urbano en las zonas en proceso de consolidación, se apoya en el conocimiento del consumo final previsto y el conocimiento de la superficie en planta a construir de los diferentes ámbitos de los planes urbanísticos. Combinando esta información con los resultados del proyecto, que proporciona la superficie construida en planta a fecha de adquisición de las imágenes, se obtendría la demanda actual esperada.

La estimación de la demanda de agua en zonas verdes se calcula en términos de necesidad de riego ( $NR_{mes}$ ) a partir de la ecuación:

$$NR_{mes} = \frac{ET_{c(mes)} - P_{mes}}{Eficiencia\ Riego}$$

En donde  $P_{mes}$  es la precipitación acumulada mensual y  $ET_{c(mes)}$  es la evapotranspiración mensual de la zona verde y se estima a partir de la evapotranspiración de referencia  $ET_0$  calculada con los datos obtenidos de las estaciones agroclimáticas de las respectivas zonas climáticas corregido por un factor  $K_c$  proporcionado por la FAO y mediante la fórmula:

$$ET_{c(mes)} = ET_0 \times K_c$$

Atendiendo a las condiciones climáticas, la Comunidad de Madrid se ha dividido en tres zonas, la sierra, la zona de transición y la vega, estimándose para cada una de ellas la evapotranspiración de referencia a partir de datos de estaciones meteorológicas. Las necesidades anuales para cada zona se han estimado a partir de las necesidades de riego mensuales sobre las zonas verdes de césped y árbol.

## 4. Resultados

Los resultados del proyecto incluyen: el diseño, generación y actualización de la base de datos cartográfica, su explotación y la estimación de la demanda de agua.

El diseño y la generación de la base de datos cartográfica constituyen los resultados de 2008, que también incluye la superficie verde obtenida para cada estrato, municipio, y rango de actividad vegetativa. Los resultados e información del proyecto se han integrado en el SIG corporativo de Canal de Isabel II donde se generan informes, mapas temáticos, etc., y se relaciona con la información de sus infraestructuras.

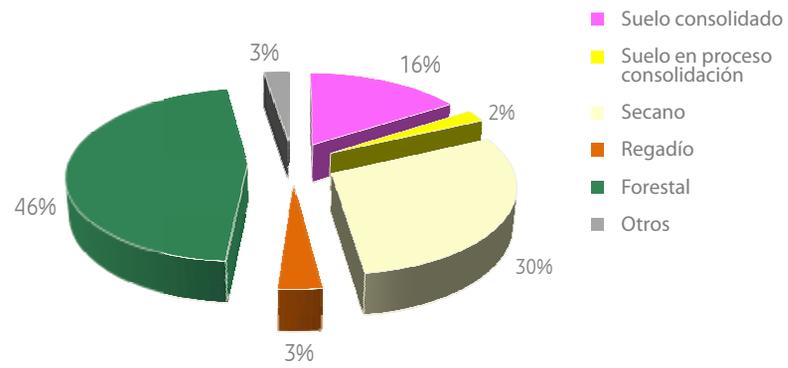
Los resultados del proceso de las coberturas SPOT5 de verano 2009, primavera 2010 y verano 2010, actualizan la base de datos cartográfica proporcionando la evolución del desarrollo urbano. Los resultados obtenidos de cada cobertura se integran en su respectiva Geodatabase, actualizando de esta manera la base de datos cartográfica. El análisis conjunto de todas ellas permite realizar el seguimiento urbano del grado de consolidación de la Comunidad de Madrid.

Respecto a la diferenciación de estratos, cabe destacar que la superficie de la Comunidad de Madrid se distribuye en un 79 por ciento de *suelo natural* (agrícola y forestal), un 18 por ciento de *suelo urbano* (suelo consolidado y en proceso de consolidación), y el 3 por ciento restante se agrupa en el estrato *otros*. El suelo en *proceso de consolidación* representa el 2 por ciento de la superficie total y el 11 por ciento del suelo urbano. La distribución se ilustra en la figura 6.

Los resultados de la actualización de la estratificación muestran que el suelo en proceso de consolidación aumenta progresivamente de 18.054 hectáreas en 2008; a 18.523 hectáreas en 2009; a 19.152 hectáreas en primavera 2010; y a 19.347 hectáreas en verano 2010.

Los resultados del seguimiento urbano para el proyecto, en su conjunto, se analizan seguidamente.

**Figura 6. Distribución de la superficie de los estratos (resultados 2008)**



- **Resumen de resultados. Nivel Comunidad de Madrid**

Para todos los periodos de estudio del proyecto incluye:

- La superficie clasificada en las distintas actuaciones, y la diferencia de superficie edificada entre dos actuaciones consecutivas.
- En el periodo comprendido entre los veranos de 2008 y 2009 es cuando se detecta el mayor aumento en superficie edificada (272,81 hectáreas), mientras que en el periodo comprendido entre la primavera y el verano de 2010 el aumento en superficie es mucho menor (72,13 hectáreas), en parte debido a que el periodo de tiempo entre ambas actualizaciones es mucho más corto. El detalle se recoge en la tabla 1.
- El resumen del grado de consolidación de los ámbitos que constituyen el suelo en proceso de consolidación, para todos los periodos de estudio, se detalla en la tabla 2 y la figura 7.

La gran mayoría de los ámbitos se encuentran en el grado de consolidación *edificando*. Además, a medida que se procesan más periodos aumenta la superficie de los ámbitos que alcanzan este grado de consolidación.

**Tabla 1. Resultados de superficie clasificada en las distintas actuaciones**

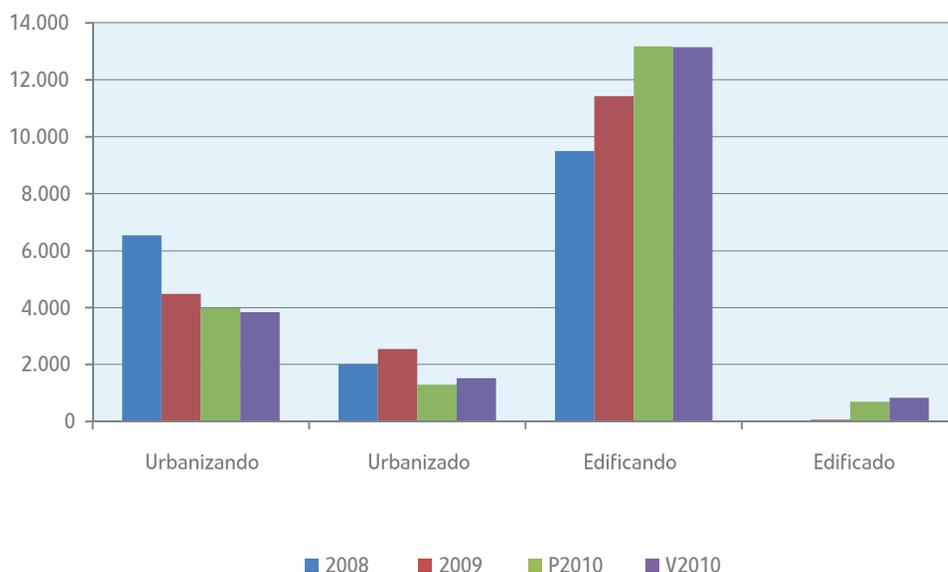
Superficie clasificada en la Comunidad de Madrid									
	V2010		P2010		V2009		V2008		
	Superficie (ha)	%							
Edificio	3.516	18,2	3.444	18,0	3.195	17,3	2.922	16,2	
Suelo	10.634	55,0	10.518	54,9	10.301	55,6	10.394	57,6	
Vial asfaltado	4.087	21,1	4.026	21,0	3.774	20,4	3.211	17,8	
Vial no asfaltado	1.110	5,7	1.163	6,1	1.253	6,8	1.527	8,5	
<b>Total</b>	<b>19.347</b>	<b>100</b>	<b>19.152</b>	<b>100</b>	<b>18.523</b>	<b>100</b>	<b>18.054</b>	<b>100</b>	

**Tabla 2. Resumen del grado de consolidación de los ámbitos en todos los periodos de estudio**

Resumen del grado de consolidación de los ámbitos (2008-2009-P2010-V2010)								
	2008		2009		P2010		V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)						
Urbanizando	207	6.538	206	4.484	179	3.985	179	3.841
Urbanizado	64	2.016	67	2.545	40	1.294	42	1.524
Edificando	337	9.501	375	11.431	445	13.179	447	13.148
Edificado	-	-	11	63	58	693	72	832
<b>Total</b>	<b>608</b>	<b>18.054</b>	<b>659</b>	<b>18.523</b>	<b>722</b>	<b>19.152</b>	<b>740</b>	<b>19.347</b>

El análisis del seguimiento de los ámbitos que constituyen el suelo en proceso de consolidación, en los distintos periodos de estudio, se apoya en una primera categorización, según su comportamiento, distinguiéndose: nuevos ámbitos, ámbitos con cambios y ámbitos sin cambios en la clasificación. En la tabla 3 se proporcionan las superficies correspondientes a la categorización de los ámbitos. La figura 8 refleja el seguimiento de los cambios producidos.

**Figura 7. Evolución del grado de consolidación (ha)**

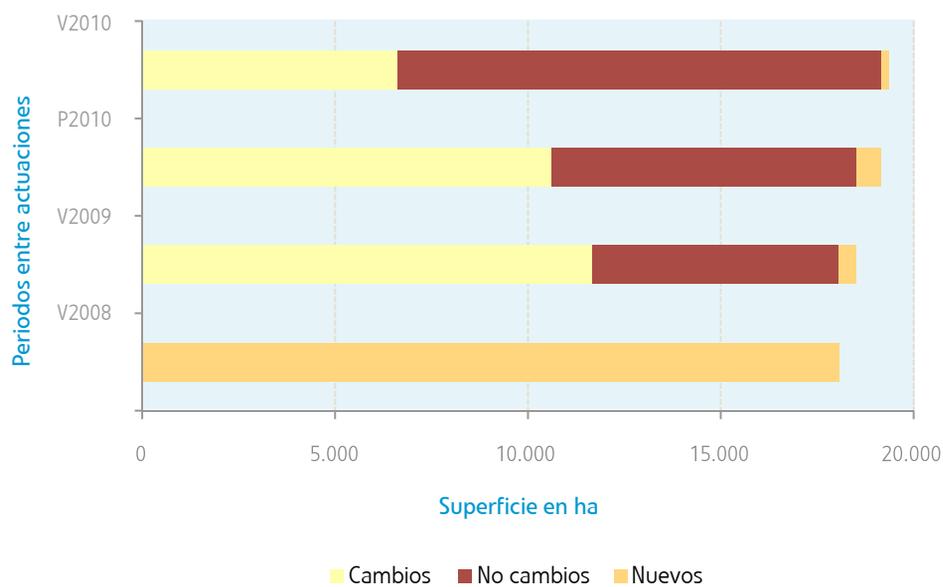


**Tabla 3. Resumen del tipo de ámbitos en el suelo en proceso de consolidación durante los años del proyecto**

Resumen del tipo de ámbitos en el suelo en proceso de consolidación								
	V2008		V2009		P2010		V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)						
Nuevos ámbitos	608	18.054	51	456	63	630	18	195
Ámbitos con cambio	-	-	194	11.665	241	10.602	122	6.609
Ámbitos sin cambios en la clasificación	-	-	414	6.401	418	7.920	600	12.543
<b>Total</b>	<b>608</b>	<b>18.054</b>	<b>659</b>	<b>18.523</b>	<b>722</b>	<b>19.152</b>	<b>740</b>	<b>19.347</b>

**Figura 8. Seguimiento de ámbitos: relación de cambios**

Seguimiento de ámbitos



En la tabla 4 se muestran los cambios identificados en los ámbitos que presentan diferencias entre dos actuaciones consecutivas.

**Tabla 4. Relación de cambios en los recintos clasificados en los ámbitos con cambios**

Ámbitos con cambios - Relación de recintos de cambio									
	V2008-V2009			V2009-P2010			P2010-V2010		
	Nº recintos	Superficie (ha)	%	Nº recintos	Superficie (ha)	%	Nº recintos	Superficie (ha)	%
Suelo-Edificio	1.453	256,72	20	622	221,58	41	256	62,79	39
Suelo-Vial asfaltado	1.316	99,83	8	231	17,16	3	216	11,05	7
Suelo-Vial no asfaltado	944	183,59	15	219	11,32	2	245	12,31	8
Vial no asfaltado - Vial asfaltado	542	534,68	42	108	242,11	45	104	49,74	31
Otros	5.292	183,94	15	578	48,20	9	384	25,45	16
<b>Total</b>	<b>9.547</b>	<b>1.258,77</b>	<b>100</b>	<b>1.758</b>	<b>540,36</b>	<b>100</b>	<b>1.205</b>	<b>161,33</b>	<b>100</b>

El grado de consolidación de los ámbitos con cambios se presenta en la siguiente tabla, en la que se aprecia que la mayoría se encuentra en estado *edificando*.

**Tabla 5. Relación de los grados de consolidación de los ámbitos con cambios**

Relación de grados de consolidación de los ámbitos con cambios								
Grado de Consolidación	V2008		V2009		P2010		V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)
Urbanizando	-	-	21	1.525,8	17	620,07	15	888,22
Urbanizado	-	-	27	1.847,74	11	161,91	7	239,92
Edificando	-	-	135	8.228,97	165	9.188,39	86	5.341,13
Edificado	-	-	11	63,03	48	631,77	14	139,61
<b>Total</b>			<b>194</b>	<b>11.665,12</b>	<b>241</b>	<b>10.602,12</b>	<b>122</b>	<b>6.608,89</b>

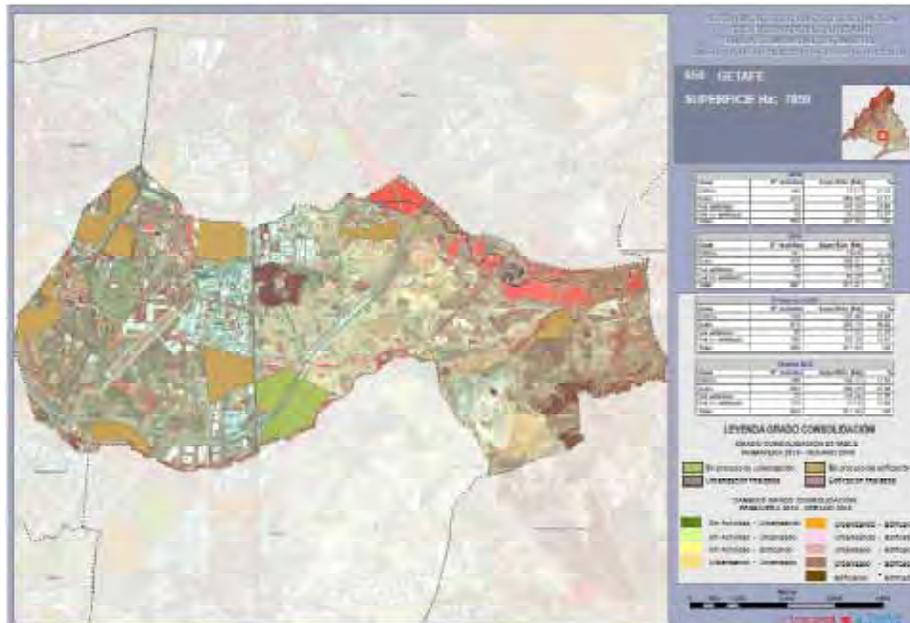
También se han detectado cambios que se ubican en zonas definidas en la actuación anterior como suelo *consolidado* y que pasan, debido a la detección de actividad, a suelo en *proceso de consolidación* en la siguiente actualización, considerados ámbitos parcialmente incluidos dentro del suelo consolidado. Generalmente, se corresponden con demoliciones u obras dentro del entramado urbano.

Los ámbitos que alcanzan el grado de consolidación *edificado* se consideran finalizados. Estos ámbitos siguen perteneciendo al suelo en proceso de consolidación ya que puede haber cierta incertidumbre en cuanto a su ejecución definitiva.

Los resultados se presentan en una **Geodatabase**, integrada en el sistema de información geográfico de Canal de Isabel II. Las herramientas del SIG proporcionan una gran versatilidad para explotar esta información en relación con la del planeamiento urbano o las propias infraestructuras actuales o planificadas de Canal de Isabel II. Algunos de los productos obtenidos son:

- Cruce de los resultados de todas las actualizaciones con el planeamiento urbanístico, los resultados integrados en la base de datos cartográfica, permiten realizar un seguimiento del grado de ejecución del desarrollo urbano, reflejado en los planeamientos urbanísticos de los municipios. Este seguimiento se ha realizado mediante el cruce de los resultados obtenidos, de todos los periodos de estudio base, contra el planeamiento vigente, en su versión más actual, y en sus diferentes categorías:
  - 1) Suelo urbano consolidado y ámbitos desarrollados
  - 2) Ámbitos no desarrollados con informe de viabilidad y
  - 3) Ámbitos no desarrollados sin informe de viabilidad
- Mapas temáticos por municipio y para la Comunidad de Madrid en los que se refleja de forma cartográfica y numérica los cambios producidos durante la ejecución del proyecto. Sobre el mapa se simboliza la evolución del grado de consolidación durante los dos últimos periodos, primavera y verano 2010 y se incluye también una tabla resumen con la superficie de recintos clasificados a lo largo de las cuatro fechas procesadas. La figura muestra el mapa temático correspondiente al municipio de Getafe.

**Figura 9. Explotación de resultados: Mapa temático resultante del municipio de Getafe.**



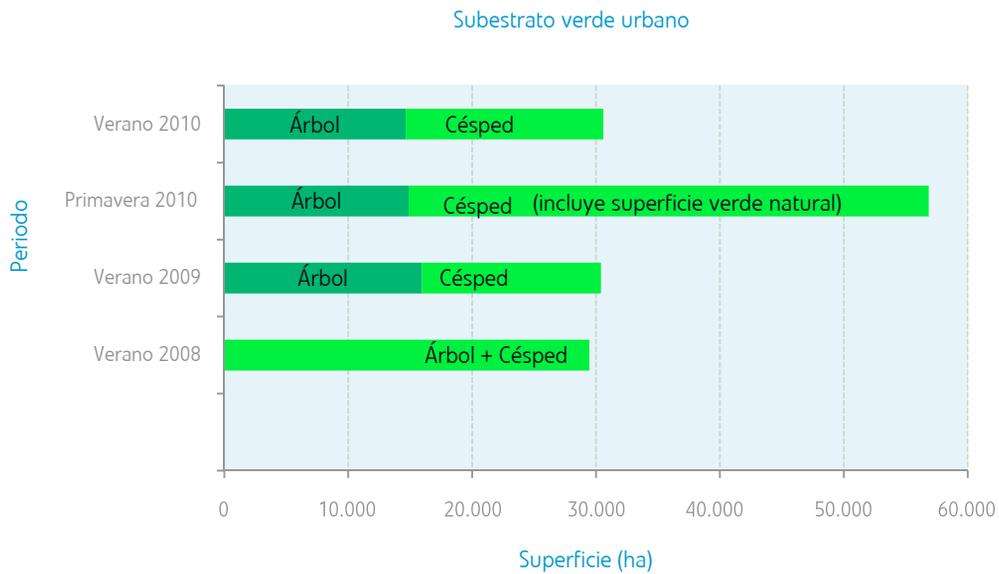
- Relación de cambios por municipio. Incluye:
  - El seguimiento de superficies clasificadas y relación de cambios por municipio, para todos los años de estudio.
  - El seguimiento del grado de consolidación de los ámbitos por municipio para todos los años de estudio.

Con respecto a los resultados de la superficie verde, cabe destacar que coberturas de imágenes amplias en el tiempo presentan diferentes estados fenológicos en la vegetación, de forma que no se puede tratar toda la cobertura de manera homogénea y se complica la definición de un único umbral del índice de vegetación para la estimación de la superficie verde. Para la estimación de la demanda de agua se consideran representativos los resultados correspondientes a las imágenes obtenidas en verano, ya que en ésta época el vigor de la vegetación se encuentra relacionado con el aporte artificial de agua.

En las figuras 10, 11, 12 y 13 se muestran los resultados de la superficie verde por estrato, para la Comunidad de Madrid, y para todos los periodos de estudio según su grado de actividad.



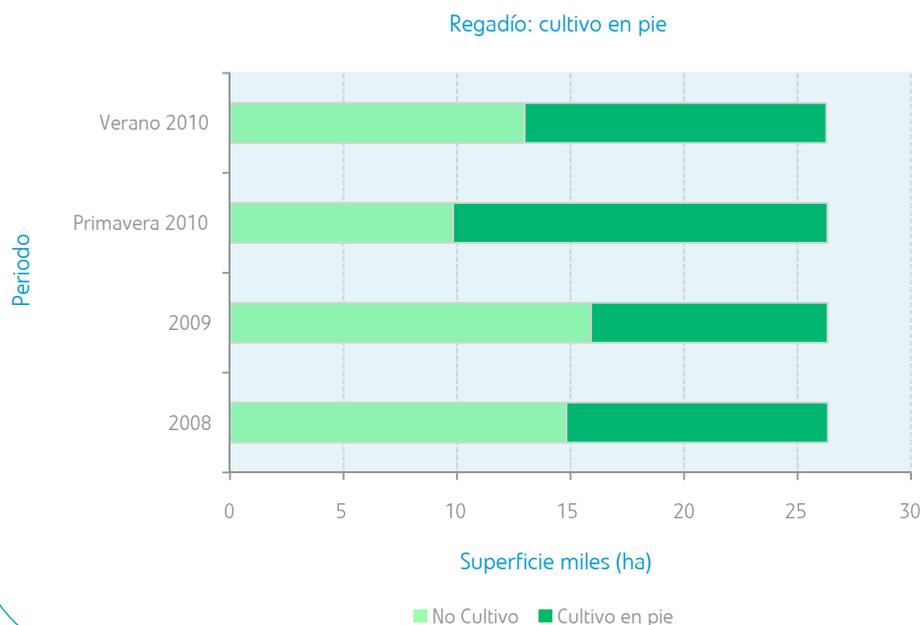
**Figura 11. Distribución de las superficies de árbol y césped del substrato verde urbano en los periodos de verano 2010, primavera 2010 y verano 2009**



**Figura 12. Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo en el estrato de secano para todos los periodos de estudio**



**Figura 13. Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo en el estrato de regadío, para todos los periodos de estudio**



La estimación de la demanda de agua en zonas verdes urbanas se calcula en términos de necesidad de riego mensuales, obtenidas a partir de la información de la precipitación mensual acumulada y la evapotranspiración.

En la tabla 6 se presenta la demanda de agua anual en hectómetros cúbicos al año, para los años 2009 y 2010, obtenidas al aplicar las necesidades de riego sobre las superficies de las zonas verdes urbanas (césped y árbol) de cada zona climática de la Comunidad de Madrid.

**Tabla 6. Estimación de la demanda de agua de zonas verdes urbanas para toda la Comunidad de Madrid**

	Resultados 2009			Resultados 2010		
	Superficie (ha)	Demanda total (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda por ha (m <sup>3</sup> /ha año)	Superficie (ha)	Demanda total (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda por ha (m <sup>3</sup> /ha año)
Césped	14.238	153,5	10.777	15.426	118,3	7.671
Árbol NDVI alto	2.552	3,9	1.536	2.383	1,8	759
Árbol NDVI medio	13.195	6,9	526	11.832	3,1	259
<b>Total</b>		<b>164,3</b>	<b>12.840</b>	<b>29.642</b>	<b>123,2</b>	<b>8.690</b>

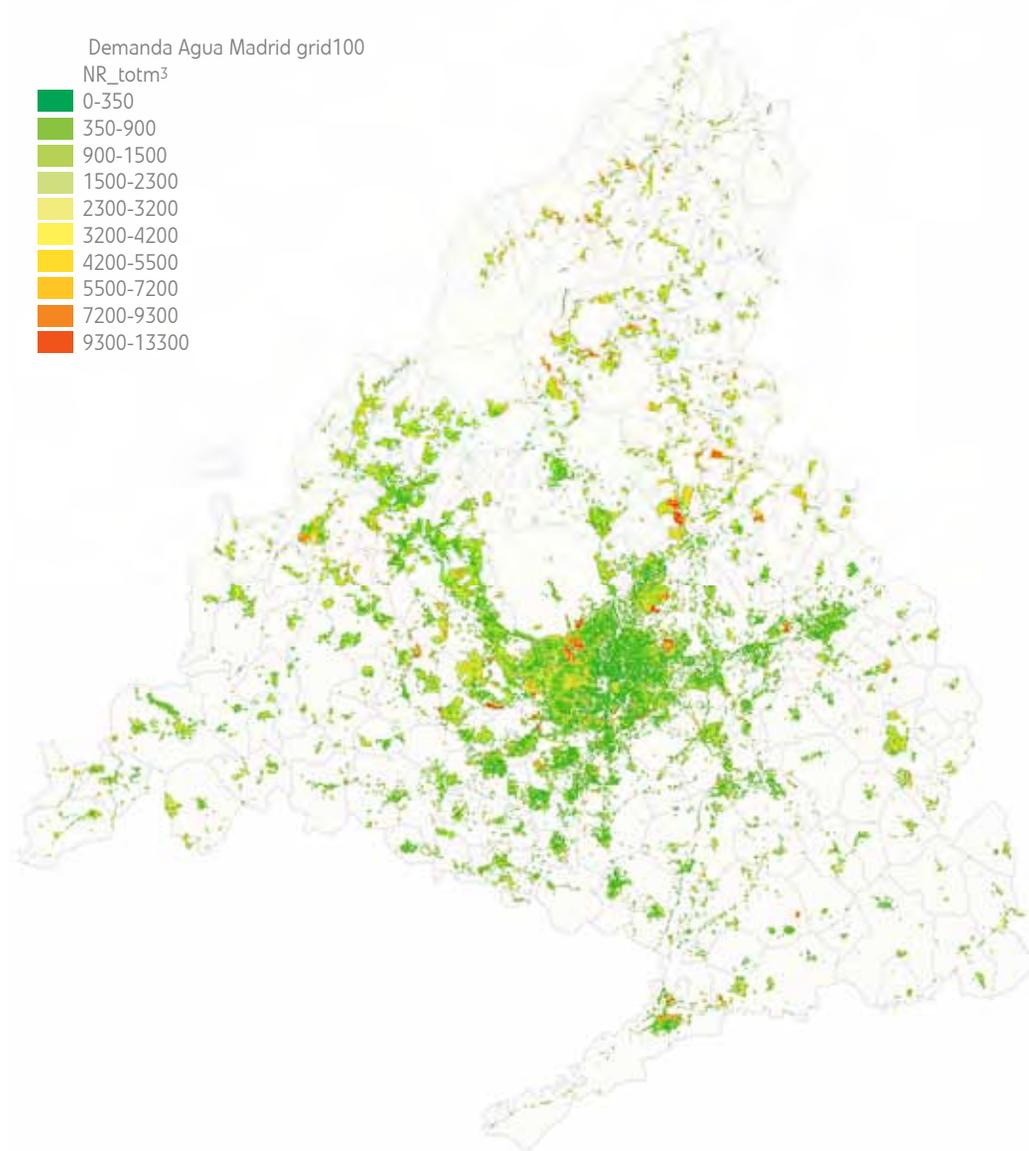
Para tener una visión más completa de la demanda de agua, se ha calculado la distribución espacial continua (metros cúbicos por año y hectárea) sobre la Comunidad de Madrid, sobre una malla de 100 metros. El resultado se muestra en las figuras 14 y 15.

Los resultados de la demanda de agua para la superficie verde de césped, muestran una coherencia con los datos obtenidos en estudios anteriores, tal como se exponen en el cuaderno de I+D+i N°11 de *Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid*. Los resultados para el 2009 (10.777,32 metros cúbicos por hectárea y año, que equivalen a 153,45 hectómetros cúbicos al año) son algo superiores a los reflejados para un año medio tipo seco (la información de AEMET corrobora que el año 2009 se considera seco en la Comunidad de Madrid respecto los datos medios de los últimos 30 años), y los resultados para el 2010 (7.670,64 metros cúbicos por hectárea y año, que equivalen a 118,33 hectómetros cúbicos al año) son semejantes a los correspondientes de clima medio.

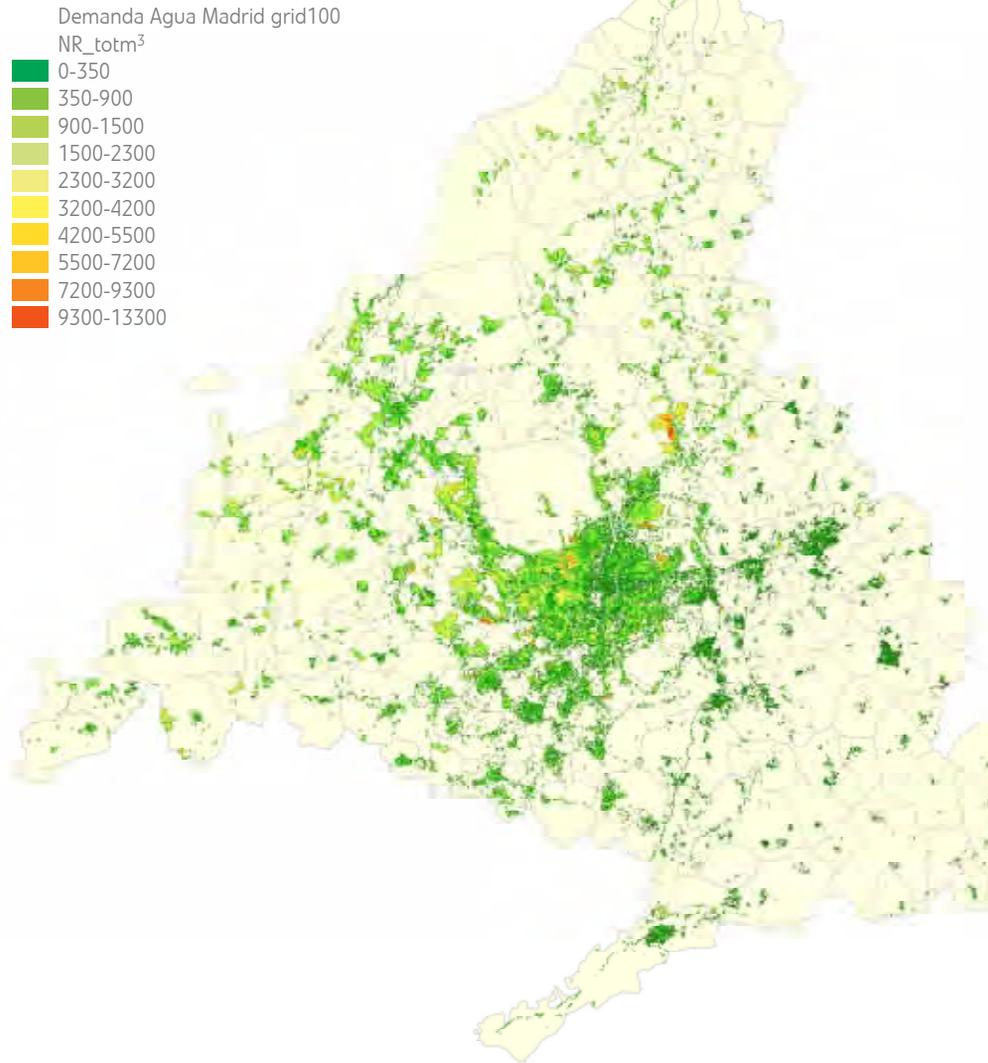
Los resultados para zonas arboladas no son comparables con los de esos trabajos anteriores, en primer lugar debido a las distintas técnicas utilizadas en la clasificación, y a la estimación de la demanda que en aquellos casos se hizo, basada en un riego de apoyo de 400 metros cúbicos por hectárea y año, independientemente del año meteorológico.

La identificación de nuevas zonas urbanas en proceso de consolidación y la evaluación de la superficie edificada en relación con la prevista en los planes urbanísticos, permitirá una estimación más precisa de la aparición de nuevas demandas, su distribución geográfica y velocidad de consolidación.

**Figura 14. Distribución espacial de la demanda de agua anual del año 2009 en la Comunidad de Madrid**



**Figura 15. Distribución espacial de la demanda de agua anual del año 2010 en la Comunidad de Madrid**



## 5. Conclusiones

Se consideran cumplidos los objetivos del proyecto. Se ha desarrollado una metodología operativa que, apoyándose en imágenes SPOT5, realice el seguimiento de la consolidación urbana en la Comunidad de Madrid. Con respecto a la estimación de la demanda de agua, se ha establecido la metodología de estimación de demanda en zonas verdes con su respectiva valoración, y se han puesto las bases para el cálculo de la demanda urbana en las zonas en desarrollo.

Respecto a la adquisición de imágenes, se señala la importancia de realizar una programación específica para el proyecto, de acuerdo a sus objetivos. Se requiere una ventana de programación corta en el tiempo, lo cual no siempre es factible, ya que las programaciones se ven afectadas por las condiciones meteorológicas, conflictos con otras solicitudes, etc. Problemas derivados de coberturas en periodos de tiempo amplios, se traducen en la dificultad de clasificar aquellos ámbitos que abarquen varias escenas con diferente estado de construcción en cada una de ellas.

Se considera adecuado realizar el seguimiento únicamente con coberturas de verano ya que parece suficiente disponer de una serie de imágenes por año, y en ésta época habitualmente las adquisiciones tienen una amplitud temporal más corta. Por otra parte la estimación de las superficies verdes en primavera se ve perturbada por las aportaciones naturales de agua.

La metodología de proceso de imágenes requiere un tratamiento muy específico. En ella cabe destacar la robustez del método de ortorrectificación, la fusión (SRF<sup>1</sup>) específica para datos SPOT5 la estratificación del territorio y su actualización, y la idoneidad de combinar diferentes métodos de clasificación según la información auxiliar disponible.

La gran relevancia de disponer de la información auxiliar del SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español), utilizada para la delimitación de zonas con un comportamiento urbano y de ocupación del suelo homogéneo, desde la perspectiva del presente proyecto. El estrato en proceso de consolidación, que es el de mayor relevancia, se ha definido apoyándose inicialmente en esta información.

Las pruebas previas realizadas en la fase de segmentación y clasificación, ponen de manifiesto la importancia de disponer de un catastro lo más actualizado posible. Su uso ha sido fundamental en la clasificación dentro del diseño y ejecución de la metodología planteada.

El uso del planeamiento urbano vigente en su versión más actual resulta imprescindible en este proyecto, como marco de referencia de las expectativas de crecimiento urbano.

La validación de la metodología realizada a partir de imágenes de alta resolución Quickbird pone de manifiesto:

- Los resultados obtenidos con Quickbird son análogos a los obtenidos con SPOT5.
- Se considera que la metodología desarrollada para SPOT5 es satisfactoria, y las pruebas realizadas con Quickbird avalan esta conclusión.
- La relación coste y disponibilidad de imágenes, y el tiempo de respuesta para disponer de resultados es el adecuado, utilizando imágenes SPOT5.
- La identificación de edificios con imágenes QuickBird, cuando se dispone de catastro se realiza de una manera mucho más precisa, llegando a identificar edificios de muy poca superficie. Esta contribución es importante cuando el grado de consolidación del ámbito es muy alto. Se puede valorar la utilización de estas imágenes a futuro en zonas concretas.

---

<sup>1</sup>SRF Spectral Response Function

## 6. Líneas de Investigación

Se proponen las siguientes líneas de investigación futura como mejora continua a la valoración del grado de consolidación de los desarrollos urbanos:

- Realización del seguimiento mediante información satelital combinando imágenes de alta y muy alta resolución, adecuando la periodicidad de adquisición según el grado de consolidación urbana de las diferentes zonas de la Comunidad de Madrid. Se considera adecuada la adquisición anual de una cobertura SPOT5, para tener una valoración del grado de consolidación del seguimiento urbano, y en aquellas zonas con grados de consolidación avanzados realizar adquisiciones específicas con satélites de muy alta resolución que permiten una identificación más precisa.
- Utilización de información LIDAR (Light Detection and Ranging), que es un sistema de medida activo a bordo de un avión, que proporciona información en altura de la superficie terrestre y es la base para la realización de MDTs (modelos digitales de terreno), y MDSs (modelos digitales de superficie) de muy alta precisión planimétrica y altimétrica. Entre sus aplicaciones destaca la medición de zonas urbanas. El desarrollo de técnicas de seguimiento con imagen LIDAR, que suministra información en vertical permitiría valorar, junto con la información auxiliar disponible actualmente, la superficie edificada en altura. De esta manera se conseguiría una mejor estimación de la demanda de agua urbana.





# ÍNDICE DE CONTENIDOS



**1. INTRODUCCIÓN** página 41

**2. OBJETIVO** página 45

**3. ÁMBITO TERRITORIAL Y TEMPORAL** página 49

**4. METODOLOGÍA** página 53

4.1. FASE 1: Recopilación y análisis de la información disponible

4.2. FASE 2: Programación y adquisición de las imágenes de satélite

4.3. FASE 3: Diseño de la base de datos cartográfica

4.4. FASE 4: Proceso de imágenes

4.5. FASE 5: Estimación de la demanda de agua

## **5. ADQUISICIÓN Y PROCESO DE IMÁGENES página 131**

### **6. RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO URBANO página 141**

- 6.1. Resumen de resultados en el total de la Comunidad de Madrid
- 6.2. Resultados de la identificación de nuevos ámbitos
- 6.3. Resultados del seguimiento de ámbitos con cambios
- 6.4. Ámbitos sin cambios
- 6.5. Ámbitos parcialmente incluidos dentro del suelo consolidado
- 6.6. Ámbitos finalizados
- 6.7. Cruce de los resultados del seguimiento urbano con el planeamiento urbanístico
- 6.8. Mapas temáticos

### **7. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE VERDE página 159**

- 7.1. Resultados de los estratos forestal, seco y regadío
- 7.2. Resultados del substrato verde

### **8. VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA CON IMÁGENES QUICKBIRD página 171**

- 8.1. Verificación seguimiento urbano verano 2008 y verano 2009. Zona piloto de Rivas Vaciamadrid
- 8.2. Verificación seguimiento urbano primavera 2010 y verano 2010. Zona piloto de Móstoles
- 8.3. Resumen verificación de la metodología de seguimiento urbano
- 8.4. Verificación de la estimación de la zona verde verano 2008 y verano 2009. Zona piloto de Rivas Vaciamadrid
- 8.5. Verificación de la estimación de la zona verde primavera 2010 y verano 2010. Zona piloto de Móstoles

### **9. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN ZONAS VERDES página 195**

- 9.1. Resultados demanda de agua 2009
- 9.2. Resultados demanda de agua 2010

## **10. CONCLUSIONES página 215**

### **11. ANEXOS página 219**

- Anexo 1. Glosario de términos
- Anexo 2. Referencias
- Anexo 3. Índice de figuras
- Anexo 4. Índice de tablas



# 1

Introducción

El desarrollo y ordenación del territorio en las ciudades tiene como consecuencia un incremento y redistribución geográfica de la demanda de agua. Estos cambios se producen cada vez con mayor dinamismo y Canal de Isabel II, como entidad responsable del abastecimiento del agua, debe programar con antelación suficiente las inversiones necesarias para disponer de las infraestructuras que aseguren las condiciones del servicio a todas las propiedades que se incorporen al sistema, sin menoscabo de la garantía y calidad de servicio al conjunto del sistema.

Las predicciones de evolución de las demandas, tanto en su cuantía como en su distribución territorial, tienen como principal referente las expectativas de crecimiento vinculadas al desarrollo del planeamiento urbano municipal. La velocidad a la que se produzca la consolidación del suelo urbano es determinante respecto a los plazos requeridos para la construcción y puesta en servicio de las nuevas infraestructuras.

Canal de Isabel II, en su plan de I+D+i, dispone de una línea de investigación dedicada al "Aseguramiento del equilibrio entre disponibilidades y demandas", y en ese marco se han llevado a cabo diversos proyectos de investigación sobre el comportamiento actual de la demanda de agua y previsiones de evolución futura a diversos horizontes. En este contexto se ha desarrollado el proyecto que aquí se describe, con el título: "Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección", que tiene como objeto acotar la incertidumbre existente en cuanto a los plazos reales de consolidación de las previsiones de expansión urbana contenidas en los planes urbanísticos municipales.

Los satélites de observación de la Tierra y las técnicas más avanzadas de teledetección se han propuesto como herramienta para el seguimiento periódico de la consolidación urbanística en la Comunidad de Madrid. Estas técnicas también se han mostrado útiles en la detección y cuantificación de las zonas verdes urbanas, que en la actualidad suponen un elemento importante de la demanda de agua potable.





# 2

## Objetivos

El objeto del proyecto consiste en la puesta a punto de una metodología operativa utilizando técnicas de teledetección, que permita la definición y elaboración de una base de datos cartográfica de la Comunidad de Madrid, que se actualice periódicamente, y en donde se refleje la evolución temporal de las zonas urbanizadas como consecuencia de la consolidación de los distintos PAU (Planes de Desarrollo Urbano) de los municipios.

Además, el alcance de la metodología desarrollada se ha ampliado para detectar y cuantificar la evolución de las zonas verdes urbanas, cuyo peso, en la demanda total de agua, es cada vez mayor. La evaluación de la superficie edificada en relación con la prevista en los planes urbanísticos permite una estimación más precisa de la aparición de nuevas demandas, su distribución geográfica y velocidad de consolidación.

El proyecto se programó para su realización durante dos años, mediante el proceso de una o dos series de imágenes anuales, correspondientes a los periodos de primavera (marzo–abril), y verano (agosto–septiembre). Se adquirieron las series correspondientes al verano de 2008, verano de 2009, primavera y verano de 2010. La metodología del proyecto se elaboró para dar respuesta durante el primer periodo al diseño, definición y elaboración de la base de datos cartográfica, y para la actualización de la base de datos cartográfica en el resto. Las sucesivas actualizaciones permitieron ir ajustando y consolidando la metodología desarrollada.

En el presente documento se presenta el trabajo realizado, según el siguiente esquema: 1) la metodología desarrollada para la ejecución del trabajo; 2) la depuración y ajustes de la metodología como consecuencia de su ejecución; 3) los resultados definitivos obtenidos para todos los periodos de actualización; 4) el resultado conjunto y valoración del seguimiento del grado de consolidación y delimitación de la zona verde; y 5) las conclusiones del proyecto, donde también se hace referencia a las lecciones aprendidas.

En primer término se describe todo el desarrollo metodológico, y en un segundo término se agrupan los resultados de su ejecución en las sucesivas actualizaciones. En consecuencia, el documento se estructura en los siguientes contenidos:

- Objetivos
- Ámbito territorial
- Descripción de la metodología desarrollada
  - FASE 1. Recopilación y análisis de la información disponible
  - FASE 2. Programación y adquisición de las imágenes de satélite
  - FASE 3. Diseño de la base de datos cartográfica
  - FASE 4. Proceso de imágenes SPOT5
  - FASE 5. Estimación de la demanda de agua
- Resultados
- Conclusiones





# 3

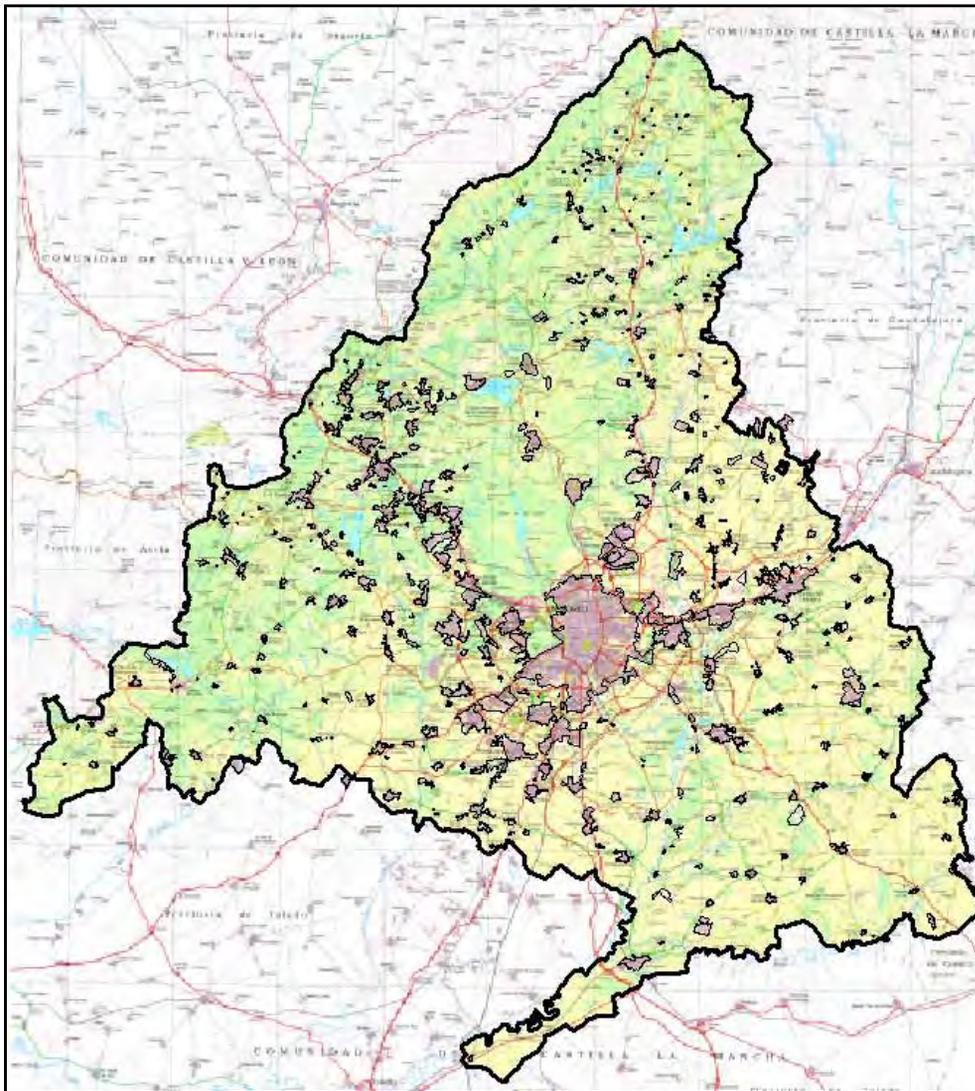
Ámbito territorial y temporal

El ámbito territorial de estudio cubre la totalidad de la Comunidad de Madrid, con una superficie de 8.021,80 kilómetros cuadrados.

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la evolución temporal del desarrollo de las zonas urbanizadas. Por lo tanto, los núcleos urbanos y sus alrededores requieren una atención especial, por ser zonas sujetas a un gran dinamismo en la evolución de los planes de desarrollo urbanísticos de los municipios de la Comunidad de Madrid.

La figura 16 resalta los núcleos urbanos dentro de la Comunidad de Madrid.

Figura 16. **Ámbito territorial del estudio**



El ámbito temporal abarca los siguientes periodos de estudio: verano 2008, verano 2009, primavera 2010 y verano 2010.

Así, el proyecto ha consistido en el diseño y definición de una base de datos cartográfica, a partir del proceso y tratamiento de la cobertura SPOT5 de la Comunidad de Madrid adquirida en verano de 2008 y se han realizado actualizaciones periódicas sobre esta base de datos, a partir de las coberturas adquiridas en verano de 2009, primavera de 2010, y verano de 2010, quedando, de esta manera, reflejada la evolución temporal de las zonas urbanizadas como consecuencia de la consolidación de los planes urbanísticos en este periodo de tiempo.



# 4

## Metodología

La metodología desarrollada contempla las siguientes fases:

Fase 1. Recopilación y análisis de la información disponible

Fase 2. Programación y adquisición de las imágenes de satélite

Fase 3. Diseño de la base de datos cartográfica

Fase 4. Proceso de imágenes SPOT5:

- Procesado básico
- Procesos específicos de seguimiento urbano durante el primer periodo de estudio
- Procesos específicos de la delimitación de la zona verde
- Procesamiento de los periodos posteriores para la actualización de la base de datos cartográfica
- Verificación de la metodología con imágenes Quickbird

Fase 5. Estimación de la demanda de agua

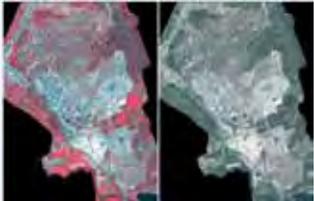
#### **4.1. Fase 1. Recopilación y análisis de la información disponible**

La información utilizada en el proyecto ha sido la siguiente:

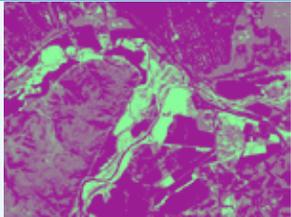
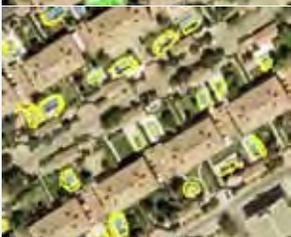
- Cartografía digital actualizada a escala 1.000 y 5.000 del servicio cartográfico de la Comunidad de Madrid.
- Incluye información de planeamiento urbano en vigor.
- Edición digital de ortofotografías del vuelo fotogramétrico de la Comunidad de Madrid de 2003, (Proyecto GEOMADRID).
- Ortofotografías a escala 1:2.000 y 1:5.000 de los vuelos de 2006.
- Cartografía digital de catastro urbano, actualizada en 2008.
- Sistema de información geográfico de las infraestructuras de Canal de Isabel II (GAUDY).
- Base de datos cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior, actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006.
- Planes urbanísticos municipales en fase de tramitación.
- Modelo digital del terreno a 25 metros, procedente del IGN.
- Mapa SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España) de la Comunidad de Madrid.
- Ortoimagen SPOT5 2005 de la península, del PNT.

En la tabla 7 de las páginas siguientes se detalla la información recibida según sus características de contenido, escalas, sistema de referencia, etc.

**Tabla 7. Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid**

Relación y características de la información utilizada				
Descripción	Formato	Sistema referencia	Fichero	Imagen
<p>Ortofotografía a escala 1:2.000 del vuelo 2006</p> <p>Cobertura parcial de la Comunidad de Madrid</p>	.ecw	WGS84	<p>1.676 ficheros</p> <p>Ejemplo ficheros: 02-29-93-b.ecw</p>	
<p>Ortofotografía a escala 1:5.000 del vuelo 2.006</p>	.ecw	ED50	<p>1187 ficheros</p> <p>Ejemplo fichero: 431-7-8.ecw</p>	
<p>Ortoimágenes SPOT5 años 2004 y 2005, 2,5 m, 3 bandas (R,G,B)</p>	.tif	ED50	<p>17 ficheros</p> <p>Ejemplo fichero: hoja_01_spot2005.tif</p>	
<p>Información multitemporal QuickBird. Color Natural y Falso Color - 0,6 m, 3 bandas (R,G,B). Años 2002, 2004 y 2006. Zona Rivas-Vaciamadrid:</p> <p></p> <p>Información derivada:</p>	.tif	ED50	<p>6 ficheros</p> <p>Ejemplo fichero: ortho02apr29_cc_nir_8b.tif</p>	

**Tabla 7. Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid**

Relación y características de la información utilizada				
Descripción	Formato	Sistema referencia	Fichero	Imagen
Segmentación NDVI (QB), 0,6m - 3 bandas (R,G,B). Años 2002, 2004 y 2006	.tif	ED50	3 ficheros Ejemplo fichero: segmentacion_ndvi_ortho02apr29.tif	
Cambios Vegetación (QB), 0,6m - 3 bandas (R,G,B). Años 2002-2004 y 2004-2006	.tif	ED50	2 ficheros Ejemplo fichero: cambi-vege_2004-2002.tif	
Clasificación Agua (QB) 0,6m - 1 banda. Años 2002, 2004 y 2006	.img	ED50	3 ficheros Ejemplo fichero: agua_2002_fin_2bits.img	
Clasificación Agua (QB). Años 2002, 2004 y 2006	.shp	ED50	3 ficheros Ejemplo fichero: agua_2002_fin_2bits.shp	
Planeamiento urbano en vigor, de 2005 de la Comunidad de Madrid	.dgn	ED50	26 ficheros de calificación 27 ficheros de clasificación Ejemplo ficheros CAL***.dgn CLA***.dgn	<p>Archivo de calificación: CAL****.DGN</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Residencia Multifamiliar</li> <li>2 A Urbanizable</li> <li>3 Industrias + Naves Agropecuarias</li> <li>4 Terciario</li> <li>5 Verde Público</li> <li>6 Deportivo</li> <li>7 Equipamiento</li> <li>8 Servicios</li> <li>9 Infraestructuras</li> </ol> <p>Archivo de clasificación: CLA****.DGN</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Suelo Urbano</li> <li>2 A Urbanizable</li> <li>3 A Urbanizable con PPO</li> <li>4 Suelo General</li> <li>5 Suelo No Urbanizable Común</li> <li>6 Suelo No Urbanizable Protegido</li> </ol> 

**Tabla 7. Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid**

Relación y características de la información utilizada				
Descripción	Formato	Sistema referencia	Fichero	Imagen
Cartografía digital actualizada a escala 1:5.000 del Servicio Cartográfico de la Comunidad de Madrid	.dgn	ED50	765 ficheros Ejemplo ficheros: 05-01-13.dgn	
Cartografía digital de catastros 2007 y 2009 de la Comunidad de Madrid	Geodatabase y shape	ED50	Ejemplo fichero: CR_PARCELA.shp	
Cartografía digital actualizada a escala 1:1.000 del Servicio Cartográfico de la Comunidad de Madrid de 2003	.dgn	ED50	Organizado en 179 municipios Ejemplo fichero: La Acebeda: 10007P10.dgn	
BdD cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006 (1)	.GDB	ED50	estanques	
			fuentes	

**Tabla 7. Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid**

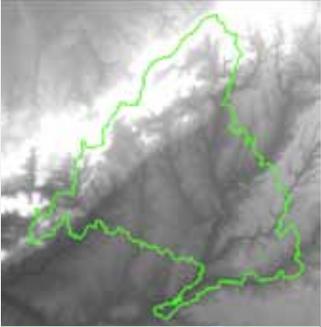
Relación y características de la información utilizada				
Descripción	Formato	Sistema referencia	Fichero	Imagen
BdD cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior, actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006 (2)	.GDB	ED50	piscinas	
			zcesped	
			zforestal	
			zvisletas	

Tabla 7. Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid

Relación y características de la información utilizada				
Descripción	Formato	Sistema referencia	Fichero	Imagen
BdD cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior, actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006 (3)	.GDB	ED50	ACOMETIDAS_TOTAL	
			campos_de_golf	
			PARCELAS_TOTAL	
			parques	
BdD cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006 (4)	GDB	ED50	zonas_total	

...la tabla continua en la página siguiente.

**Tabla 7. Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid**

Relación y características de la información utilizada			
Descripción	Formato	Sistema referencia	Imagen
Modelo digital del terreno a 25 m procedente del IGN	ASCII X,Y,Z	ED50	
Mapa SIOSE de la Comunidad de Madrid (Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España).	Geodatabase	ETRS89	
Ortoimagen SPOT5 2005 de la península del PNT	.ecw	ETRS89	

De toda la información procesada, la más relevante ha sido la siguiente:

- Edición digital de la ortofotografía, a escala 1:5.000, del vuelo 2006 de toda la Comunidad de Madrid. Las ortofotografías son ortofotomapas que reflejan la realidad de la Comunidad de Madrid en el año 2006, a escala muy detallada. Se considera una información cartográfica muy valiosa a nivel cualitativo, ya que, permite ver a un gran nivel de detalle la evolución de los usos del suelo (cambios), sirve como base a la fotointerpretación y también como información de referencia para la búsqueda de puntos de control en el proceso de ortorrectificación.
- Ortoimagen SPOT5 2005 de la cobertura de la península del PNT. Se utiliza como información de referencia para la búsqueda de puntos de control en el proceso de ortorrectificación, en la zona fuera de la Comunidad de Madrid y en la fase de estratificación que se analizará más adelante.
- Cartografía digital de catastro urbano actualizada en 2009. Es una información muy detallada y actualizada del ámbito urbano, requerida para la definición de objetos urbanos en el proceso de clasificación.

- Base de datos cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior, actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006. Resulta de gran interés para extraer información referente a la ubicación de zonas verdes.
- Dos versiones del planeamiento urbano. Planeamiento urbano en vigor de 2005, procedente de GEOMADRID, y una segunda versión, más elaborada con la información del planeamiento urbanístico vigente y en tramitación, en formato digital actualizada en 2009.
- Capa campos de golf de la Geodatabase cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior, actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006.
- Modelo digital del terreno a 25 metros, procedente del Instituto Geográfico Nacional, como información altimétrica necesaria en el proceso de ortorrectificación.
- Mapa SIOSE de la Comunidad de Madrid.  
SIOSE (Sistema de Ocupación del Suelo de España), es un mapa de ocupación del suelo E 1:25.000, realizado de forma homogénea para todo el territorio español, a partir de una cobertura SPOT5 del año 2005, a 2,5 metros de resolución espacial. Esta cartografía presenta un especial detalle en las zonas urbanas (recinto mínimo 1 hectárea), y ha sido el punto de partida para la estratificación del territorio del área de estudio.

## 4.2. Fase 2. Programación y adquisición de las imágenes de satélite

Los requerimientos del proyecto establecen la utilización de imágenes de alta resolución para la totalidad del ámbito territorial de la Comunidad de Madrid (con resolución inferior a 10 metros), correspondientes a los periodos de inicio de primavera (marzo–abril), y final de verano (agosto–septiembre). Dentro de cada periodo, la diferencia en fechas de adquisición entre las escenas que constituyen una cobertura debe ser inferior a 30 días, por lo que se debe programar su adquisición con suficiente antelación.

Se consideraron, como más adecuadas, las fechas correspondientes al verano de 2008 (imágenes de archivo) para el diseño metodológico inicial, y las de verano 2009, primavera de 2010 (marzo–abril), y verano 2010 (agosto–septiembre), para las sucesivas actualizaciones.

Además, como complemento a cada serie, y con el fin de servir de contraste y control de calidad del proceso, se planteó adquirir sobre una zona urbana, con una superficie mínima de 50 kilómetros cuadrados, una escena de los satélites denominados *de muy alta resolución*, VHR (2,4 metros), para cada uno de los periodos de trabajo del proyecto.

A continuación se exponen los satélites operativos que se encuadran para cada tipo de resolución, explicando en mayor detalle los seleccionados para el proyecto por ser los que mejor responden a las necesidades del mismo.

### 4.2.1. Adquisición de imágenes de satélite de alta resolución

En las tablas 8, 9, y 10 se detallan los satélites operativos en el año 2009, que tienen algún sensor con resolución espacial inferior a 10 metros y que dan respuesta a los requisitos exigidos para la adquisición de una cobertura de 10 metros. Los tres primeros satélites de la tabla, ofrecen una resolución muy justa, mientras que los satélites de la parte inferior satisfacen mejor los requisitos exigidos.

**Tabla 8. Satélites operativos en 2008 de resolución espacial en torno a 10 m**

Satélite	País	Fecha de lanzamiento	Sensores	Tipos	Número de bandas	Resolución	
SPOT 4	Francia	1998	HRVIR	PAN	1	10 m	
				XS	4	20 m	
SPOT 1,2,3	Francia	1986, 1990, 1993	HRV	PAN	1	10 m	
				XS	3	20 m	
IRS-P6	India	2003	LISS IV		3	5,8 m	
				LISS III	XS	4	23,5 m
				AWIFS		4	56 m
RAPIDEYE	German Space Agency (DLR)	2008	REIS	XS	5	6,5 m	
ALOS	Japón	2006	PRISM, AVNIR-2, PALSAR	XS	4	10 m	
				PAN	1	2,5 m	
				SAR	1	10-100 m	
SPOT5	Francia	2002	HRG	XS	4	20 – 10 m	
				PAN	1	5 – 2,5 m	
FORMOSAT-2	China	2004	RSI/ISUAL	XS	4	8 m	
				PAN	1	2 m	
CARTOSAT-1	India	2005	Ópticos	PAN	1	2,5 m	

Para el presente proyecto se consideró que las imágenes más adecuadas son las adquiridas por el satélite SPOT5, ya que dispone de bandas espectrales con resolución espacial de 10 metros, pudiéndose adquirir de forma simultánea escenas pancromáticas de mayor resolución espacial (2,5 metros), que mediante técnicas de fusión permiten generar un producto combinado, que integra la riqueza espectral de las escenas multiespectrales y el detalle espacial de la escena pancromática.

Por la experiencia adquirida en proyectos anteriores de seguimientos de cambios urbanísticos y de seguimiento de las medidas de ahorro de agua, y con la ejecución del presente proyecto se confirma que la detección de nuevas urbanizaciones y zonas verdes amplias requiere la utilización de imágenes de las características ofrecidas por la combinación de estos dos productos de SPOT5.

En la tabla 9 se detallan las características técnicas del sensor SPOT5.

Los detalles de las coberturas SPOT5 de la Comunidad de Madrid adquiridas para el proyecto se presentan en el capítulo 5. **Adquisición y proceso de imágenes de satélite.**

Tabla 9. Características del satélite SPOT5 (\*)

Característica	SPOT5		
Fecha de lanzamiento	03/05/02		
Altitud	822 km		
Inclinación	98,7		
Velocidad	7,4 km/s		
Duración de la órbita	101,4 minutos		
Tipo de la órbita	Sincrónica con el sol		
Bandas	PAN + 4 XS		
Rango espectral	Pancromático		448 – .71 $\mu\text{m}$
	Multiespectral	Verde	50 – .59 $\mu\text{m}$
		Rojo	61 – .68 $\mu\text{m}$
		NIR	78 – .89 $\mu\text{m}$
		SWIR	11,58 – 1,75 $\mu\text{m}$
Resolución espacial	Pancromático	2,5 m o 5 m	
	Multiespectral	10 m (Verde, Rojo, NIR) 20 m (SWIR)	
Anchura de barrido	60 km		
Periodo de revisita	2 a 3 días		
Máxima cobertura nubosa	$\leq$ 10% Estimación manual		
Ángulo de visión Off-nadir	+/- 27°		
Rango dinámico	8 bits		

(\*) Adaptado: <http://www.spotimage.com>

#### 4.2.2. Descripción de las imágenes de satélite de muy alta resolución

Para la realización del control de calidad del proceso y validación de la metodología empleada, se planteó adquirir una escena de alta resolución (2,4 metros) sobre zona urbana, con una superficie mínima de 50 kilómetros cuadrados, obtenida en las mismas fechas que las escenas SPOT5 captadas para toda la Comunidad de Madrid.

En la tabla 10 se detallan los satélites operativos más utilizados y que tienen algún sensor con resolución espacial en torno al metro.

Ambos satélites responden a los requerimientos establecidos. Tienen en común que sus imágenes se captan en modo pancromático y multiespectral. De manera que se adquiere simultáneamente una imagen de muy alta resolución en modo pancromático y 4 bandas de resolución espacial menor pero con mayor contenido espectral, abarcando las bandas del visible y del infrarrojo.

De los datos comparativos de la tabla 10 se puede deducir que ambos satélites ofrecen características técnicas similares. No obstante, para el presente estudio se considera más adecuado Quickbird ya que:

- Ofrece un menor tamaño de píxel en la banda pancromática y en las multiespectrales, que permite alcanzar mejor detalle, y por tanto trabajar con mayor precisión a escalas cartográficas más altas, punto muy importante en estudios de cambios urbanos. Su tamaño de píxel (2,4 m/ 0,6 m) permite contrastar mejor los resultados obtenidos con SPOT5.
- La superficie mínima de programación en Quickbird, actualmente es de 77 km<sup>2</sup>; mientras que en IKONOS es 100 km<sup>2</sup>, lo que se ajusta mejor a los requerimientos.

El satélite IKONOS se reservó como alternativa, en el caso de que existiera algún problema con Quickbird.

Las imágenes Quickbird se distribuyen en tres niveles diferentes de proceso: básico, estándar y ortorrectificado. Debido a que al producto estándar ya se le ha aplicado la corrección topográfica utilizando GTOPO30 como modelo de elevación, no es posible realizar correcciones posteriores para lograr mayores precisiones.

Existe una modalidad de este tipo de producto denominado "Standard Ortho-ready", con las mismas características que el "Standard", pero al que no se le ha aplicado ningún MDT y resulta el idóneo para realizar ortoimágenes.

En todos los casos las imágenes se suministran con su correspondiente fichero RPC (Rational Polynomial Coefficients). Este fichero contiene la información necesaria para el cálculo de la orientación interior y exterior. También incluye información referente a las coordenadas geográficas asociadas con las coordenadas de la imagen.

Teniendo en cuenta estos argumentos, y que la finalidad del trabajo es la realización de ortoimágenes de satélite para el seguimiento del desarrollo urbanístico, el producto "Standard Ortho-ready" es el más adecuado.

En resumen, el producto adquirido para cada periodo presenta las siguientes características:

- Producto Bundle (pancromática a 0,6 m y multiespectral a 2,4 m).
- Standard Ortho-ready.
- 16 bits.

Tabla 10. Comparativa de las características de las distintas imágenes de alta resolución

	QuickBird	IKONOS			
Fecha lanzamiento	18/10/01	24/09/99			
Altitud órbita	450 Km	680 Km			
Inclinación	98°	98,1°			
Sentido órbita	descendente	descendente			
Tipo de órbita	sincrónica con el sol	Sincrónica con el sol			
Resolución en el nadir (Resolución productos)	0,61 m (desde 0,61 m)	0,81 m (1 m)			
Anchura de barrido	16,5 Km	11 Km			
Almacenamiento	128 Gbit	64 Gbit			
Bandas	PAN + 4 XS	PAN + 4 XS			
Rango espectral	Pancromático	.45 – .90 $\mu\text{m}$	.45 – .90 $\mu\text{m}$		
	Multiespectral	Azul	.45 – .52 $\mu\text{m}$	Azul	.45 – .53 $\mu\text{m}$
		Verde	52 – .60 $\mu\text{m}$	Verde	52 – .61 $\mu\text{m}$
		Rojo	63 – .69 $\mu\text{m}$	Rojo	64 – .72 $\mu\text{m}$
		NIR	76 – .90 $\mu\text{m}$	NIR	77 – .88 $\mu\text{m}$
Resolución espacial	Pancromático	0,61 m (nominal para < 26° del nadir) 0,72 m (nominal para > 26° del nadir)	1 m (nominal para < 26° del nadir)		
	Multiespectral	2,44 m (nominal para < 26° del nadir) 2,88 m (nominal para > 26° del nadir)	4 m (nominal para < 26° del nadir)		
Rango dinámico	11 bits	11 bits			
Máxima cobertura nubosa	<= 20% Estimación manual	<= 20% Estimación manual			
Elevación solar	>= 15°	>= 15°			
Angulo de visión Off-nadir	0°- 15° (por defecto) 0°- 25°	0°- 15° (por defecto) 0°- 25°			
Periodo de revisita	4,5 - 5 días (a 0,7 m res.)	2,5 – 3 días (a 1 m res.)			
Pedido mínimo para nuevas adquisiciones	77 Km <sup>2</sup>	100 Km <sup>2</sup>			

(\*)Adaptado: Quickbird de <http://www.digitalglobe.com/>; IKONOS de <http://www.euspaceimaging.com>

Los detalles de las imágenes Quickbird, de muy alta resolución, adquiridas sobre la zona piloto se presentan en el capítulo 5. Adquisición y proceso de imágenes de satélite.

**Figura 17. Comparación de una zona urbanizada con zonas verdes.**

Imagen SPOT5 fusionada de 2,5 m de resolución, (arriba).

Imagen IKONOS de agosto de 2004 fusionadas de resolución espacial 1 m (abajo).



### 4.3. Fase 3. Diseño de la base de datos cartográfica

El objetivo principal del presente proyecto es la definición y elaboración de una base de datos cartográfica que integre la evolución temporal de las zonas urbanas sobre la base de la consolidación de los planes urbanísticos. Así mismo, se persigue poner a punto una metodología para su actualización mediante la aplicación de técnicas de teledetección con coberturas periódicas de imágenes de satélite SPOT5 de la Comunidad de Madrid.

Para realizar el diseño de la base de datos cartográfica, que constituye la leyenda de monitorización de los cambios, se realizaron una serie de pruebas previas con el fin de determinar la capacidad de discriminación de las imágenes SPOT5 en las diversas categorías de interés, definir la metodología más adecuada para lograr los objetivos, y recopilar información auxiliar que permita una mejor discriminación y monitorización de las distintas categorías de la base de datos cartográfica.

Para la realización del diseño de la base de datos cartográfica se ha trabajado con los planes urbanísticos, el catastro, la información del SIOSE y Corine, y las imágenes de satélite del primer periodo de estudio (verano de 2008), utilizándose también como apoyo las imágenes SPOT5 de 2005. Cada una de estas fuentes de información aporta un aspecto importante en el diseño cartográfico. Así, las imágenes de satélite permiten ver la evolución real existente en el territorio; los planes urbanísticos recogen el planeamiento de una ordenación a futuro del territorio; los mapas SIOSE y Corine reflejan los usos generales del suelo en una fecha concreta, cada uno a su escala y nivel de leyenda correspondiente; y el catastro aporta el detalle a nivel de parcela.

La base de datos cartográfica se ha estructurado en las siguientes 6 capas:

- Estratos
- Subestrato (verde)
- Ámbito verde
- Recinto verde
- Ámbito urbano
- Recinto urbano

En los siguientes apartados se describe en detalle cada una de estas capas.

#### 4.3.1. Estratos

La capa "estratos" delimita las zonas con comportamientos homogéneos dentro del ámbito territorial de la Comunidad de Madrid. Se han definido los siguientes 6 estratos:

##### Suelo consolidado

Integra el tejido urbano consolidado. Constituido por las edificaciones estables con cierta antigüedad y zonas donde no hay obras. En este estrato sólo se pueden encontrar demoliciones y zonas de obras a futuro, es decir a partir de 2009. Un ejemplo de suelo consolidado se observa en la figura 18.

Figura 18. Detalle de suelo consolidado en pleno centro urbano



#### Suelo en proceso de consolidación

Zona de obras, suelen ser amplias urbanizaciones, bien en los suburbios o en pleno centro urbano. Un ejemplo de este tipo de suelo se observa en la figura 19.

#### Suelo agrícola de secano

Este estrato se define a partir del estrato cultivo del SIOSE, y se corrobora con el índice de vegetación. Un ejemplo de este tipo de suelo se aprecia en la figura 20.

#### Suelo agrícola de regadío

Este estrato se define a partir del estrato cultivo del SIOSE, y se corrobora con el índice de vegetación. Un ejemplo de este tipo de suelo se aprecia en la figura 21.

#### Suelo forestal

Este estrato se define a partir del estrato forestal del SIOSE, y se corrobora con el índice de vegetación. Un ejemplo de este tipo de suelo se aprecia en la figura 22.

#### Otros

Resto de zonas: zonas rocosas, embalses, etc. Un ejemplo de este tipo de suelo se aprecia en la figura 23.

**Figura 19. Detalle de suelo en proceso de consolidación**

Ejemplos de nueva urbanización (arriba), y suelo edificado en pleno centro urbano (abajo)



**Figura 20. Detalle del estrato agrícola de secano**



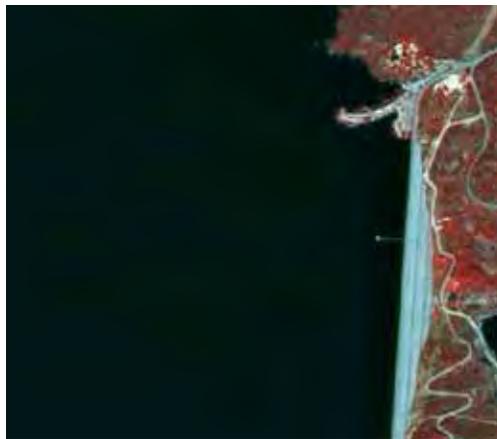
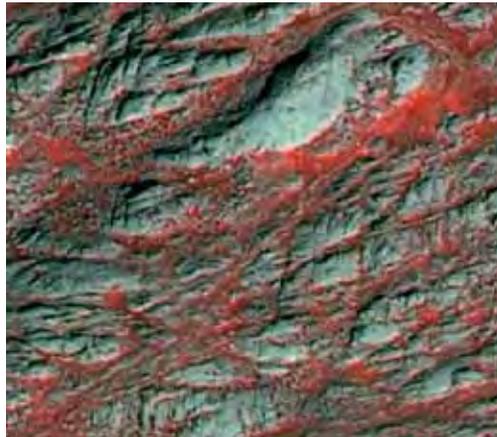
**Figura 21. Detalle del estrato agrícola de regadío**



**Figura 22. Detalle del estrato natural forestal**



**Figura 23. Detalle de zona rocosa (arriba), y embalse (abajo)**



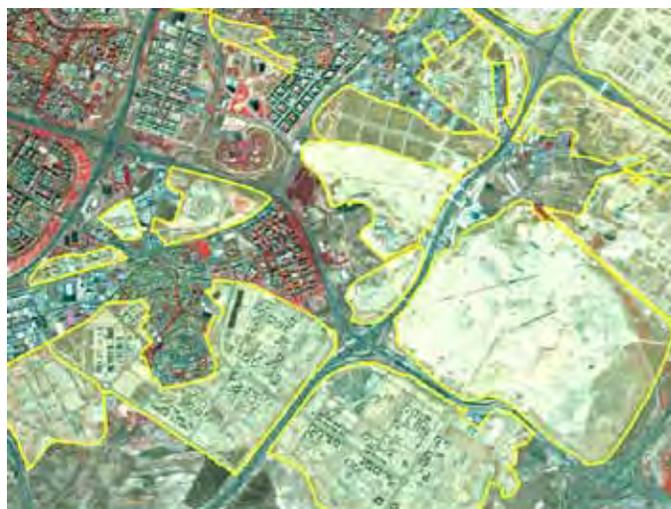
### 4.3.2. Estrato suelo en proceso de consolidación

De todos estos estratos, el suelo en proceso de consolidación, precisa una atención especial por su gran dinamismo. Por este motivo requiere un ritmo mayor de actualización y una monitorización más exhaustiva.

La delimitación de este estrato se basa en la identificación e integración de los recintos en construcción del mapa SIOSE. Como el mapa SIOSE refleja la realidad con respecto a la ocupación de los usos del suelo a fecha 2005, ha sido necesario actualizar la información a la realidad existente a fecha 2008, apoyándose en las imágenes SPOT5 de 2005 y 2008 y utilizando una metodología basada en detección de cambios y fotointerpretación.

En la figura 24 se aprecia la delimitación del estrato *suelo en proceso de consolidación* en los suburbios de Madrid, a partir de la actualización del mapa SIOSE.

Figura 24. Delimitación del estrato "suelo en proceso de consolidación" a partir del SIOSE



#### 4.3.2.1. Suelo en proceso de consolidación. Ámbitos

El estrato *suelo en proceso de consolidación* está constituido por ámbitos, definidos como zonas con un grado de consolidación homogéneo. En la figura 24 anterior se podía observar la delimitación de cada uno de ellos. A continuación se describe la información asociada a cada ámbito, que se integra como atributo del ámbito, dentro de la base de datos cartográfica.

Información asociada:

##### a. Urbanización o trama urbana existente

- **Urbanización:** amplias urbanizaciones en construcción, en las que se pueden discriminar objetos (edificios, suelo, viales, etc.), localizadas generalmente en los suburbios.
- **Trama:** zonas generalmente de poca superficie, donde no se discriminan objetos. Se pueden encontrar dentro o fuera de la masa urbana.

**Figura 25. Ámbitos en “suelo en proceso de consolidación”  
Urbanización (arriba). Trama (abajo)**



#### b. Estado

Hace referencia a los diferentes estados de ejecución de las obras que se pueden encontrar en cada ámbito. Un ejemplo se puede observar en la figura 26.

- **En proceso de urbanización.** Los viales están sin asfaltar
- **Urbanización finalizada.** Los viales ya están asfaltados y aún no se ha empezado a edificar.
- **En proceso de edificación.** Ya se ha empezado a edificar.
- **Edificación finalizada.** La edificación se encuentra finalizada, también incluye los ámbitos finalizados aunque no tengan edificación (una carretera, por ejemplo).

#### c. Observaciones

Hace referencia a la información catastral y auxiliar utilizada, citándose si la información catastral ha sido utilizada en la clasificación.

- **Catastro adecuado.** Informa que la clasificación se ha apoyado en el catastro. Un ejemplo se puede observar en la figura 27.
- **Catastro no adecuado.** Informa de la no utilización del catastro para clasificar, bien por carecer de catastro para la zona o en el caso de existir, por no adecuarse a la realidad del ámbito sobre el terreno. Un ejemplo se puede observar en la figura 28.

#### 4.3.2.2. Suelo en proceso de consolidación: recintos urbanos

Los ámbitos urbanos están constituidos por recintos urbanos, siendo éstos los elementos de mayor detalle dentro de la base de datos cartográfica. Se trata de los objetos resultantes de la clasificación categorizados según la siguiente leyenda:

- **Edificio:**
  - En zonas clasificadas con *catastro adecuado*, es aquel recinto de catastro que contenga al menos un edificio.
  - En zonas clasificadas con *catastro no adecuado*, el recinto delimita el edificio.
- **Suelo pendiente de ejecución:** todo aquello que no es edificio ni vial.
- **Viales asfaltados**
- **Viales no asfaltados**

La figura 29 ilustra los tipos de recintos urbanos.

Figura 26. Ejemplos de grado de consolidación



En proceso de urbanización



Urbanización finalizada



En proceso de edificación

Figura 27. Ejemplos de utilización de catastro adecuado



Figura 28. Ejemplos de no utilización de catastro (catastro no adecuado)



Figura 29. Clases de recintos urbanos



#### Recinto urbano

Clase de recinto urbano

- Edificio
- Suelo pendiente de ejecución
- Vial asfaltado
- Vial no asfaltado

### 4.3.3. Substrato verde

El substrato verde integra la vegetación que inunda los estratos *suelo consolidado* y *suelo en proceso de consolidación*. Se calcula a partir de los índices de vegetación, dentro de ambos estratos. La figura 30 ilustra este tipo de substrato.

#### 4.3.3.1. Ámbitos verdes

El substrato verde está constituido por ámbitos, definiéndose a su vez dos tipos:

- **Campos de Golf.** Vegetación que pertenece a un campo de golf.
- **Parques y Jardines.** Vegetación que no pertenece a un campo de golf.

En la figura 31 se observan los dos tipos de ámbitos verdes.

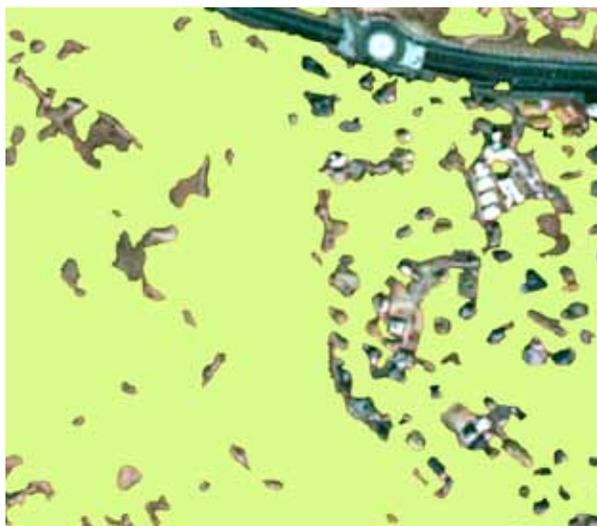
#### 4.3.3.2. Recinto verde

Los ámbitos verdes están constituidos por recintos verdes. Se definen dos clases de recintos verdes:

- **Árbol**
- **Césped**

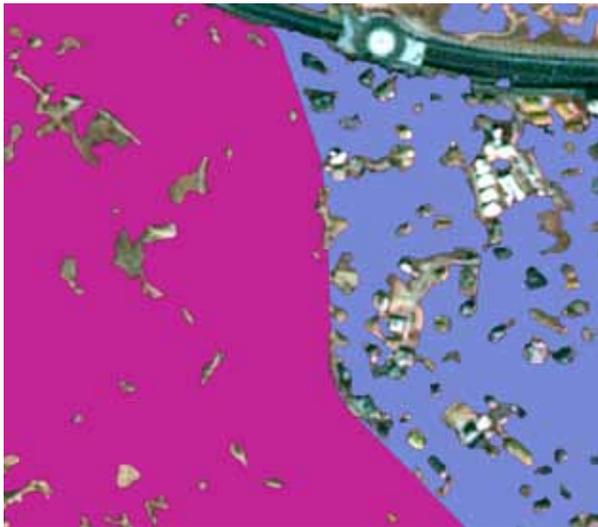
En la figura 32 se observan los dos tipos de ámbitos verdes.

Figura 30. Detalle del sustrato verde



 Substrato

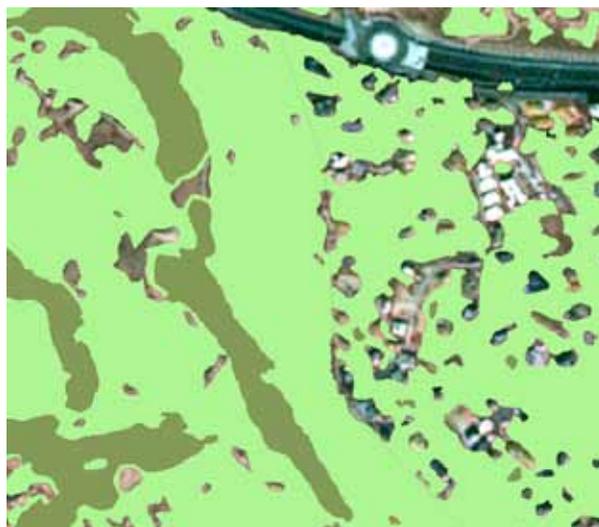
Figura 31. Detalle de ámbitos verdes



Ámbito Verde  
Clase Ambito Verde

- Campo de golf
- Parques y jardines

Figura 32. Detalle de recintos verdes

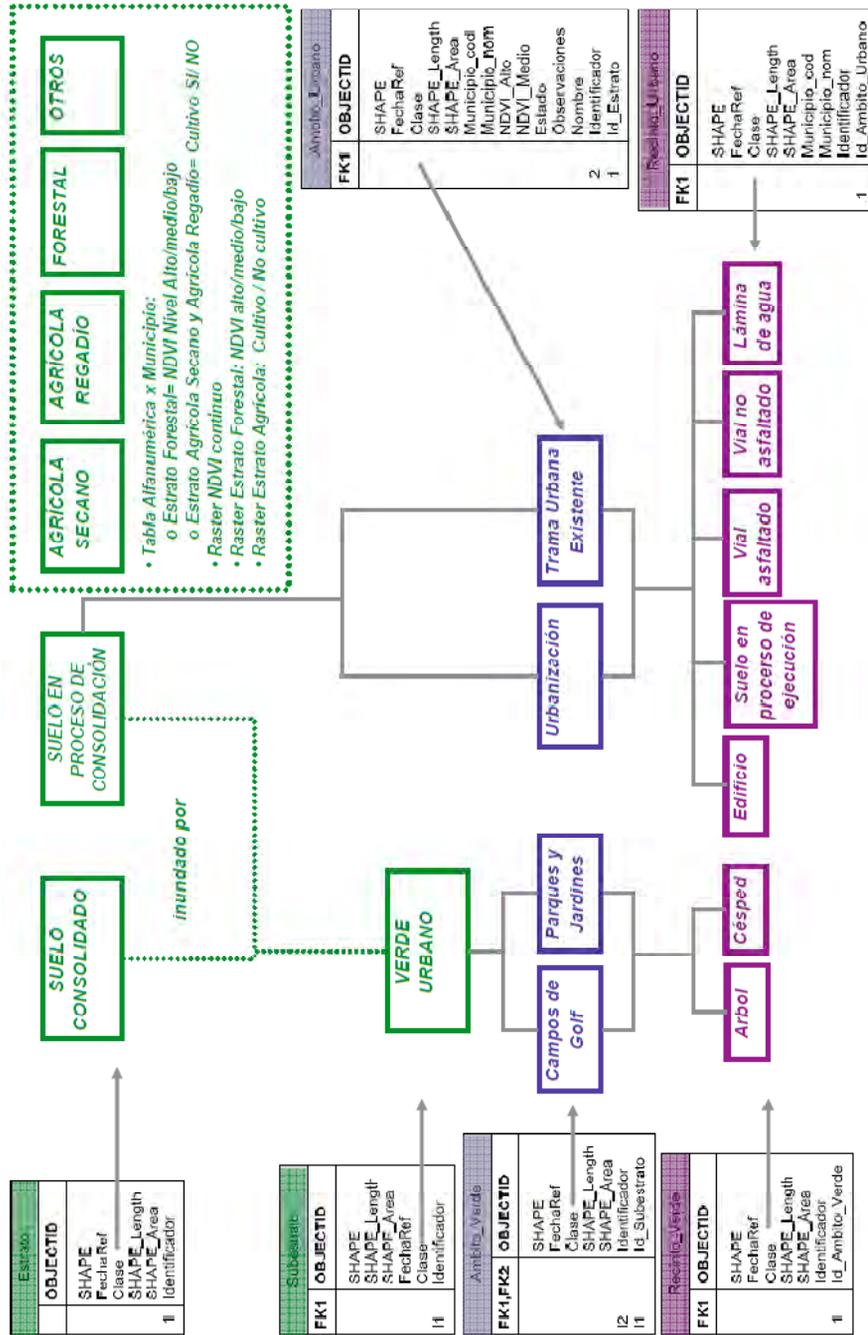


Recinto Verde  
Clase Recinto Verde

Árbol  
Cesped

Con esta explicación quedan definidos los elementos de la base de datos cartográfica, diseñada específicamente para el proyecto, que se ha implementado en formato Geodatabase de Esri, y cuyo esquema de diseño se muestra a continuación.

Figura 33. Esquema de la base de datos cartográfica



#### 4.4. Fase 4. Proceso de imágenes

La metodología de trabajo de proceso de imágenes elaborada para el proyecto utilizando la primera serie de imágenes de satélite, se centra en la elaboración, definición y creación de la base de datos cartográfica. Para las series posteriores se centra en la actualización de la base de datos.

La metodología desarrollada se estructura en las tres siguientes categorías de procesos para las imágenes SPOT5. Cada una de ellas integra todos aquellos procesos en cadena que hay que realizar para obtener un objetivo específico.

- **Procesado básico**

Integra los tratamientos previos que hay que realizar sobre las imágenes de satélite para que estén disponibles para su utilización en los procesos de clasificación. Se consideran los siguientes tratamientos previos:

- Control de calidad
- Ortorrectificación
- Normalización relativa
- Fusión
- Mosaico

- **Procesos específicos de seguimiento urbano**

Engloban los procesos siguientes:

- Estratificación
- Segmentación de imágenes
- Clasificación orientada a objetos
- Detección de cambios

- **Procesos específicos de delimitación de la zona verde**

Engloban los procesos:

- Cálculo del NDVI
- Definición de umbrales de actividad vegetativa para cada estrato
- Generación de subestrato verde; segmentación; clasificación de árbol y césped

La metodología desarrollada para el proceso de imágenes SPOT5 se contrasta con el procesado sobre Quickbird y se analiza en el punto:

- Verificación de la metodología con imágenes Quickbird sobre una zona piloto

La metodología desarrollada para la actualización de la base de datos cartográfica con las series sucesivas de imágenes, se desarrolla en el punto:

- Metodología para la actualización de la base de datos cartográfica

En los siguientes apartados se describe en detalle la metodología de proceso de imágenes desarrollada. Los resultados correspondientes del seguimiento urbano, del seguimiento de la zona verde y de la verificación de la metodología con Quickbird se presentan conjuntamente para todos los periodos de estudio en los apartados de resultados.

#### **4.4.1. Procesado básico**

En este apartado se describen los tratamientos previos que hay que realizar sobre las imágenes de satélite para que estén disponibles para su utilización en los procesos de clasificación. Se consideran los tratamientos previos descritos seguidamente.

##### **4.4.1.1. Control de calidad**

En esta fase del trabajo se ha analizado el estudio de factibilidad de la programación de imágenes para todas las coberturas del proyecto. Se ha estado en contacto con el distribuidor de imágenes para realizar un seguimiento de las adquisiciones, controlando que la adquisición se complete en el periodo solicitado y con los parámetros acordados. Así mismo, para la cobertura 2008 se ha buscado en el catálogo de imágenes de archivo de SPOT5, la alternativa más adecuada.

Una vez obtenidas las imágenes, se ha realizado un control de calidad, que engloba el estudio de histogramas (distribución y saturación), así como el análisis visual de las mismas (que no tengan fallos de captura). Además, se ha controlado que el área de estudio quede cubierta en su totalidad, y se ha optimizado el número de escenas necesarias para completar la cobertura.

##### **4.4.1.2. Ortorrectificación**

El proceso de orrorrectificación se ha realizado por triangulación en bloque (usando LPS, módulo de orrorrectificación de imágenes en bloque del software ERDAS), ya que presenta la ventaja de aportar una solución más robusta al modelo matemático permitiendo obtener mayores precisiones. De manera complementaria se realizan controles geométricos, visuales y mediante los RMSE.

1. La orrorrectificación elimina la variación escalar contenida en la imagen causada por el sensor, el relieve topográfico y los errores sistemáticos asociados con la imagen. El resultado es una imagen planimétricamente correcta, representando objetos del terreno en sus posiciones reales X,Y. Por tanto dicha imagen queda métricamente corregida a una escala uniforme constituyendo una auténtica ortoimagen.
2. Para este proceso se ha utilizado como información de referencia las ortofotografías más recientes, que corresponden con el vuelo de 2006 a escala 1:5.000, y como MDT el del IGN a 25 metros.

Los puntos de control se han seleccionado manteniendo una distribución uniforme sobre la superficie de las escenas SPOT5 que asegura un apoyo correcto para cada escena.

Para cada punto de control se miden las coordenadas imagen (fila-columna), las coordenadas terreno (XUTM, YUTM) y la altitud ortométrica (H) interpolada en el MDT. Para conseguir una mejor continuidad geométrica entre escenas se eligen puntos de control terrestre comunes en la zona de solape entre escenas adyacentes.

3. Los puntos de control utilizados se han archivado en una base de datos para volver a ser utilizados en la orrorrectificación de adquisiciones de imágenes futuras, de manera que el trabajo de orrorrectificación resulte más operativo.

El proceso de ortorrectificación se realiza, de acuerdo a los siguientes pasos:

- MDT y cartografía de referencia
  - Incorporación de todas las escenas pancromáticas y multiespectrales a ortorrectificar
  - Selección y medida de los puntos de control
  - Ororrectificación propiamente dicha
  - Control geométrico y visual
4. En primer lugar se incorporan las escenas a ortorrectificar que definen el bloque fotogramétrico y se identifica el modelo de sensor asociado a cada escena, así como sus respectivos ficheros de cabecera que contienen la información necesaria para el cálculo de la orientación interior y exterior.
  5. Se introducen los puntos de control. Los puntos de control deben ser claramente identificables, principalmente rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismo temporal, como por ejemplo cruces de carreteras, caminos, vías de ferrocarril, esquinas de piscina, etc. Es imprescindible, que los puntos de control estén a nivel del suelo, evitando saltos o puntos con posibilidad de presentar diferentes relieves, como por ejemplo pasos elevados de carreteras, tejados de casas, etc.

No conviene utilizar cursos de agua o embalses ya que sufren variaciones estacionales importantes. Además, suelen ser muy útiles en el caso de utilizar como referencia una ortofoto, las manchas características de la vegetación o lindes de parcelas agrícolas, que son inapreciables en cartografía pero se aprecian muy bien en las imágenes. Respecto a la distribución de los puntos conviene que se encuentren uniformemente distribuidos sobre el área de estudio. El número de puntos de control depende, entre otros factores, de la complejidad geométrica de la imagen, del modelo de sensor y de la rugosidad del terreno.

Matemáticamente son necesarios muy pocos puntos de control, y ese mínimo aumenta cuanto mayor sea el grado de complejidad de la ecuación de transformación utilizada. Sin embargo, es necesario superar muy ampliamente ese mínimo de puntos para conseguir un producto de calidad. De forma operativa, el número de puntos de apoyo dependerá de los resultados obtenidos en el ajuste por triangulación. Además si se trabaja por triangulación en bloque, el número de puntos de control se reduce de manera significativa, frente a los necesarios en la ortorrectificación por escena individual.

En esta fase también se introducen puntos de chequeo, que son puntos semejantes a los de control, pero que no intervienen en la solución matemática del ajuste, sino que se utilizan para la valoración objetiva del ajuste por triangulación.

La figura 34 ilustra sobre la selección de puntos de control tomados sobre ortofoto.

En la figura 35 se muestra el protocolo seguido en la distribución de los puntos de control y de chequeo para cada escena.

Figura 34. Ejemplos de puntos de control tomados sobre ortofoto



Figura 35. Distribución de puntos de control y de chequeo sobre las escenas SPOT5

11	12	13	14	15	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Punto de Control</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Punto de Chequeo</div>
21	22	23	24	25	
31	32	33	34	35	
41	42	43	44	45	
51	52	53	54	55	

6. Puntos de paso. Una vez seleccionados los puntos de control y de chequeo, se calculan los puntos de paso, que son puntos comunes entre imágenes, y visualmente reconocibles en la zona de solape, por tanto no es preciso atribuirles ninguna coordenada (X,Y,Z) en el terreno. La importancia de los puntos de paso radica en que su posición define la relación existente entre las escenas, evitándose en muchos casos el esfuerzo adicional de las mediciones en campo que presentan los puntos de apoyo. La definición de los puntos se realiza mediante un proceso semiautomático, de forma interactiva entre el operador y el software.
7. Triangulación. Una vez seleccionados los puntos de control, chequeo, y de paso, se realiza el ajuste por triangulación que calcula el modelo matemático y que convierte las coordenadas de la imagen a sus coordenadas reales.

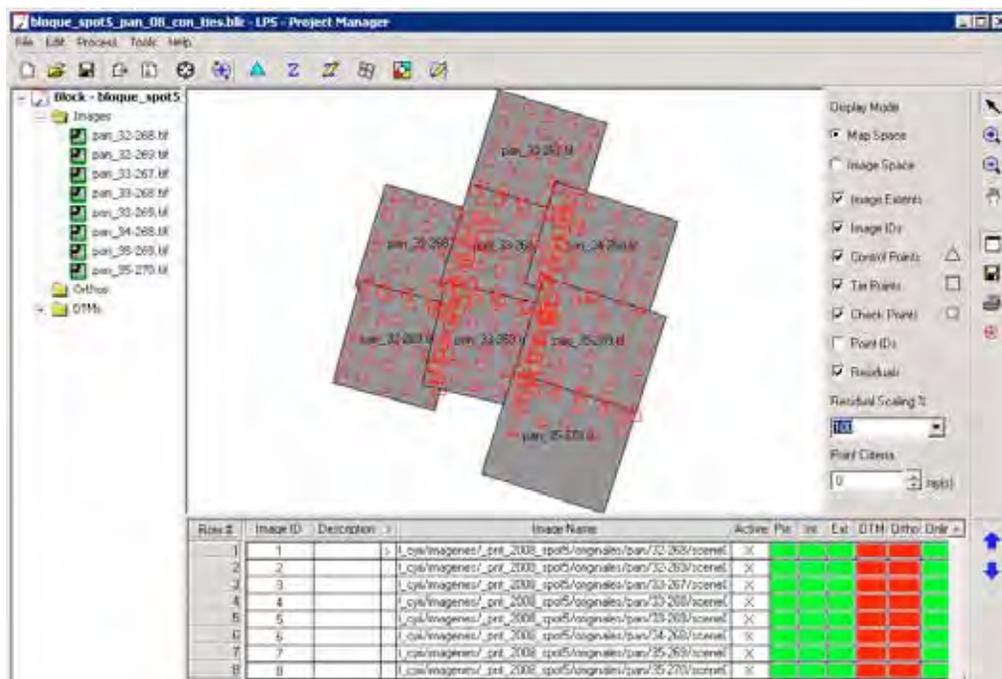
La triangulación en bloque, con ajuste por aerotriangulación, presenta la ventaja de aportar una solución más robusta al modelo matemático, permitiendo obtener mayores precisiones. Queda definida mediante la relación matemática entre las imágenes contenidas en un bloque, el modelo del sensor y el terreno. La metodología es muy similar a la de escena individual, salvo que se trabaja conjuntamente con todas las escenas adquiridas para la cobertura espacial de una época específica. La figura 36 muestra un ejemplo característico de triangulación en bloque con puntos de control, chequeo y paso.

8. A continuación, para conocer la bondad del ajuste, se calculan sus errores residuales, como la diferencia, para cada punto de control, entre su coordenada teórica y su respectiva coordenada estimada obtenida a partir del ajuste. Se realiza una valoración de los puntos de control eliminando del ajuste aquellos cuyo valor residual supera al píxel.

La bondad del ajuste se estima calculando el error cuadrático medio de las coordenadas de los puntos de control y de chequeo estimados mediante la fórmula siguiente:

$$\text{RMS}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{observado}} - X_{\text{calculado}})^2}{n}}$$

Figura 36. Bloque de escenas de la cobertura SPOT5 2008 con la distribución de los puntos de control, chequeo y paso



Una vez aceptado el ajuste se procede a ortorrectificar. La metodología empleada en el remuestreo de la imagen es la de convolución cúbica. Este método reduce el efecto de dispersión en rasgos lineales, ya que, el valor final del píxel remuestreado se calcula a partir de una media ponderada de los píxeles que tiene alrededor. Como desventaja hay que indicar que se modifican los valores digitales de los píxeles e implica un mayor volumen de cálculo. Es el método más indicado para los procesos de fusión.

Como resultado del proceso de ortorrectificación se obtiene la cobertura de imágenes SPOT5 pancromáticas, y multispectrales, ambas remuestreadas a 2,5 metros, que es el tamaño de pixel de la pancromática, para luego realizar la fusión.

Todas las imágenes ortorrectificadas se remuestrean, con el condicionante de que los píxeles sean superponibles, es decir, que la coordenada del centro del primer píxel (superior izquierda) sea múltiplo de 2,5. Esto asegura el perfecto alineado de los píxeles en los posibles mosaicos subsiguientes.

9. Tras la corrección geométrica de la imagen se realiza el análisis de la calidad de la imagen. El control de calidad se realiza a lo largo del todo el flujo de trabajo. No obstante la ortorrectificación requiere una valoración especial.

Tras la corrección geométrica de la imagen es necesario revisar el resultado obtenido mediante un control de calidad visual y geométrico.

- El **control de calidad visual** se puede realizar superponiendo la ortoimagen obtenida con cartografía existente, o con la ortofoto de referencia. El objetivo del control visual es verificar que:
  - a) No se hayan producido errores de procesado.
  - b) La continuidad geométrica entre escenas adyacentes.
  - c) El análisis en zonas con cambios bruscos de altimetría.

En las figuras 37 y 38 se muestran ejemplos referentes al control de calidad visual superponiendo la ortoimagen de muy alta resolución, con cartografía 1:1.000, o mediante superposición con la ortofoto de referencia.

- El **control de calidad geométrico** se realiza mediante puntos de chequeo. Para ello se seleccionan cinco puntos por escena SPOT5 localizados uniformemente por la imagen. A continuación se calcula el RMSE entre puntos de cada una de las imágenes de satélite, ortorrectificadas respecto a la ortofoto de referencia, mediante la fórmula:

$$\text{RMSE}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{ortorrectificada}} - X_{\text{referencia}})^2}{n}}$$

**Figura 37. Superposición de ortoimagen SPOT5 fusionado 2,5 m con cartografía 1:1.000**



La precisión de la corrección mediante puntos de chequeo de las escenas debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Error máximo no superior a 1,5 píxeles, aunque los estándares indican que será inferior a 2,5 del RMSE.
- RMSE inferior al píxel, acorde a los estándares de calidad.

**Figura 38. Comparación de ortoimagen SPOT5 2,5 m, sin fusionar, con ortofoto de 50 cm de precisión**



#### 4.4.1.3. Correcciones atmosféricas de las imágenes. Normalización relativa

Para poder comparar imágenes de diferentes fechas es imprescindible realizar correcciones atmosféricas y radiométricas, calculando los valores de reflectividad de la cubierta terrestre.

La atmósfera ejerce un efecto perturbador sobre la radiancia que llega al sensor. Esto implica que no se puedan comparar, de una manera fiable, los datos entre imágenes de distintas fechas debido a las distintas condiciones atmosféricas con que fueron adquiridas. Para que esta comparación se pueda llevar a cabo, en teoría, se deben corregir las imágenes atmosféricamente de forma absoluta, calculando los valores de reflectividad de la cubierta terrestre. Estos valores representan la respuesta de las diferentes cubiertas y usos del suelo antes de ser dispersados por la atmósfera.

La corrección rigurosa del efecto atmosférico es compleja y exige información adicional de la atmósfera, de la cual no siempre se dispone. Como alternativa, se han desarrollado algoritmos de corrección que utilizan información extraída de los datos de la propia imagen. La aplicación de estos algoritmos resulta relativamente sencilla, y su utilización está ampliamente extendida en los estudios de teledetección.

El método de corrección utilizado en el presente proyecto es el de P.S. Chávez llamado "Dark-object Subtraction Technique", (1988). En un primer paso, considera que las condiciones en las que se encuentra la

atmósfera se relacionan con los valores mínimos de los histogramas de las imágenes y además, tiene en cuenta la correlación que existe entre las diferentes bandas para eliminar los efectos negativos de la atmósfera. A continuación se calculan los valores de reflectividad, a partir de los coeficientes de calibración propios de cada imagen.

El método de corrección de P.S. Chávez llamado "Dark-object Subtraction Technique" es una aproximación basada en la normalización de intensidades entre las diferentes bandas dentro de la misma imagen. Este método puede complementarse, para realizar comparaciones más rigurosas entre imágenes adquiridas en diferentes fechas, con una corrección relativa, que consiste en equiparar en zonas invariantes las reflectividades para cada una de las bandas entre ambas escenas. La hipótesis se basa en que las zonas invariantes de la imagen, por su propia naturaleza, presentan una respuesta espectral que debería permanecer constante en el tiempo ("puntos neutros"). Y cualquier diferencia en los valores de reflectancia de estas zonas se considera que son debidos a:

- Variaciones de las condiciones atmosféricas de las distintas imágenes
- Distancia de la Tierra al Sol
- Diferencias del ángulo solar o de los ángulos del sensor

El criterio de selección de estos "puntos neutros" es el siguiente:

- Misma elevación que la mayoría de la escena
- Sin cobertura vegetal, o mínima
- Zonas relativamente llanas
- Zonas normalmente consideradas: aguas profundas, rocas, carreteras, suelo desnudo

A grandes rasgos, el método se describe en los puntos que siguen:

1. Referir todas las imágenes con las que se va a trabajar a una elegida como referencia. Así se consigue que todas se encuentren en las mismas condiciones y por lo tanto no existan diferencias de unas a otras que inducirían a tomar como cambio lo que realmente no lo es.
2. Seleccionar un conjunto de píxeles de la imagen que mantiene constante su radiancia en el tiempo, tanto de baja reflectividad (sombras, aguas claras y profundas), como de alta reflectividad (pistas de aterrizaje, suelo desnudo).
3. Establecer la correlación existente entre las distintas imágenes con la imagen de referencia.
4. Realizar una regresión lineal de las reflectividades de los "puntos neutros" para cada banda, y para cada imagen, con respecto a la de referencia.
5. Estimar, para cada banda, la recta de regresión lineal:  $y = a + bx$ .

A cada banda se le aplicará su correspondiente fórmula que nos permitirá obtener las imágenes corregidas atmosféricamente entre ellas.

#### 4.4.1.4. Fusión de imágenes

Los estudios en zonas urbanas requieren la utilización de imágenes de alta, o muy alta resolución espectral y espacial. Una alta resolución espectral facilita la diferenciación de cubiertas, mientras que una alta resolución espacial permite delimitar de forma más precisa la superficie ocupada por cada una de ellas.

Debido a los condicionantes propios de los sensores, existe una relación inversa entre la resolución espacial y espectral de los mismos. En general, los sensores con alta resolución espectral no ofrecen una resolución espacial óptima y viceversa.

SPOT5, satélite utilizado en este proyecto, capta imágenes en modo pancromático y multispectral, de manera que se adquiere casi-simultáneamente (con diferencias de décimas de segundo) una imagen de muy alta resolución (2,5 metros), en modo pancromático, y 4 bandas de resolución espacial menor (10 metros) pero con mayor contenido espectral, abarcando las bandas del verde, al infrarrojo medio.

La fusión de imágenes multispectrales (XS), y pancromáticas (PAN), es una técnica de procesamiento que permite combinar el carácter espectral de las bandas XS, con el mayor detalle o resolución espacial de la banda PAN, obteniendo un producto que integra ambos potenciales. El propósito de la fusión de imágenes es el obtener una única imagen XS de alta resolución espacial, que mantenga la información radiométrica y espectral de la XS de partida y a la que se haya incorporado el detalle espacial de la PAN; de esta forma se obtienen las bandas XS fusionadas. El método de fusión ideal sería aquel que permitiera obtener una imagen fusionada cuya información espectral no variase respecto a la imagen original.

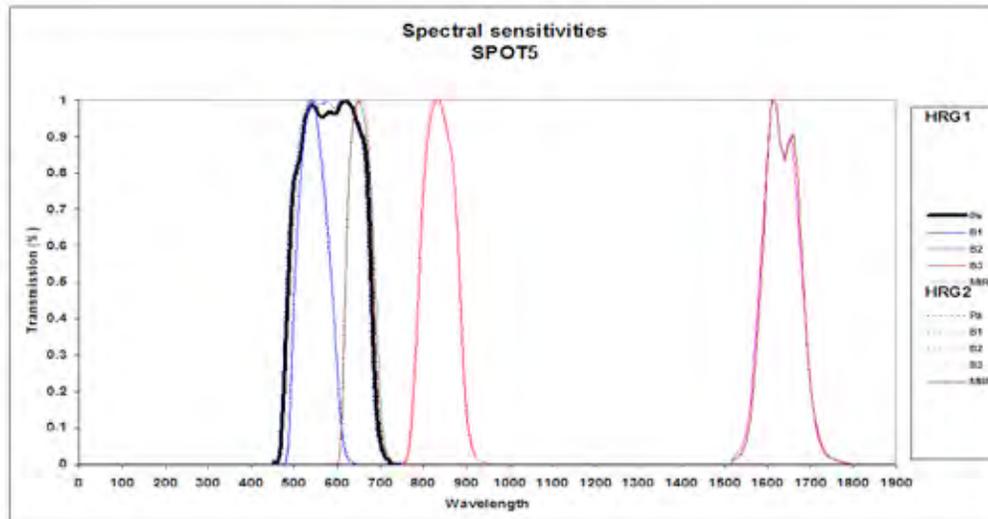
Para fusionar las imágenes PAN y XS es imprescindible que ambas sean totalmente superponibles geoméricamente. SPOT5 adquiere sus imágenes XS y PAN con un desfase temporal de unos segundos, por lo que el proceso de ortorrectificación de las escenas hay que realizarlo previamente a la fusión, para garantizar el corregistro entre ellas. Una vez corregistradas, el siguiente paso consiste en remuestrear las bandas XS (10 metros) a tamaño de píxel de la banda PAN (2,5 m) utilizando el algoritmo de convolución bicúbica.

En este proyecto se ha utilizado el método de fusión SRF acrónimo de Spectral Response Function, diseñado por la Doctora Dña. María González de Audicana, profesora titular de la Universidad Pública de Navarra y colaboradora en este proyecto.

Las características fundamentales del método se detalla en los siguientes puntos:

- El método de fusión SRF tiene en cuenta las curvas de respuesta espectral de los sensores de SPOT5, que se presentan en la figura 39.
- Se extrae el detalle espacial de la PAN que realmente le falta a la imagen XS, inyectándose a la imagen XS.
- Se obtienen imágenes de alta calidad espacial y espectral.
- No introduce artefactos extraños.
- Bajo coste computacional.
- Este método ha sido utilizado en la producción de la cobertura SPOT5 del proyecto SIOSE.
- Premiado en "2006 Data Fusion Context" organizado por el "Comité Técnico de Fusión de Datos" de IEEE, Geoscience and Remote Sensing Society.

Figura 39. Curva de respuesta espectral para el sensor SPOT5(\*)



(\*) Fuente: Spectral Sensitivities of SPOT5, <http://www.spotimage.com/web/es/554-imagenes-spot.php>

En las figuras 40 y 41 se aprecia el proceso de fusión, mostrando un trozo de imagen antes de fusionar (a 10 metros), y el resultado tras la fusión (a 2,5 metros).

También se incluye el esquema del procedimiento de fusión SRF, desarrollado en la herramienta de tratamiento de imágenes y que ilustra la figura 42 y el resultado de imágenes comparadas en la figura 43.

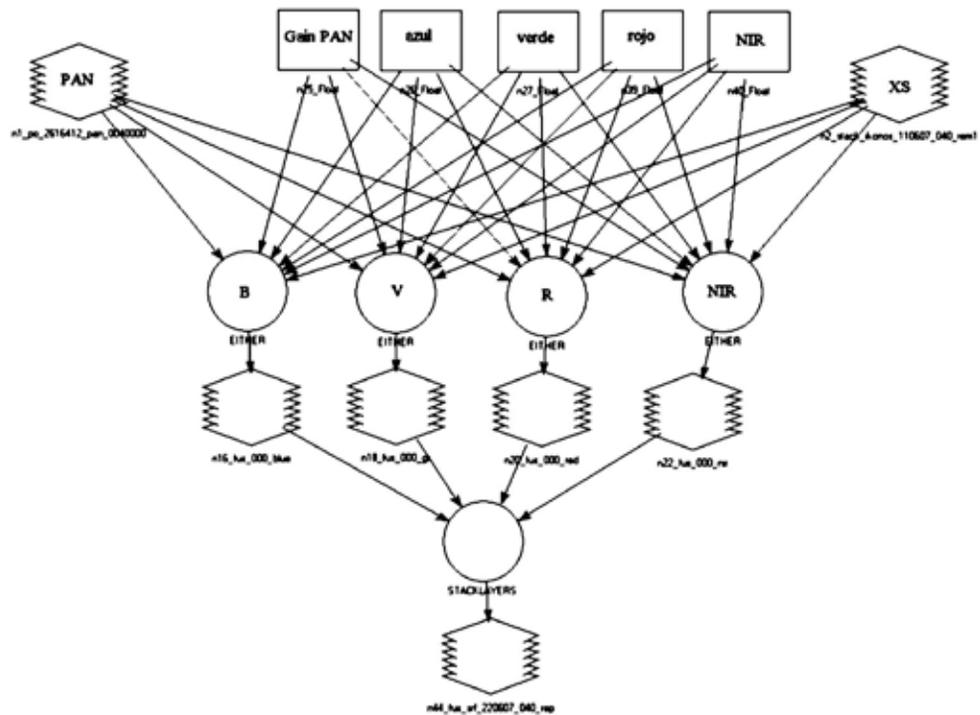
Figura 40. Composición falso color SPOT5 XS 10 m, ortorrectificada y remuestreada a 2,5 m



Figura 41. Composición falso color SPOT5 XS fusionada a 2,5 m. Método FAST-SRF



Figura 42. Esquema del procedimiento de fusión (SRF)



**Figura 43. Comparación entre la imagen SPOT5 multiespectral a 10 m (arriba), y la imagen fusionada a 2,5 m (abajo)**



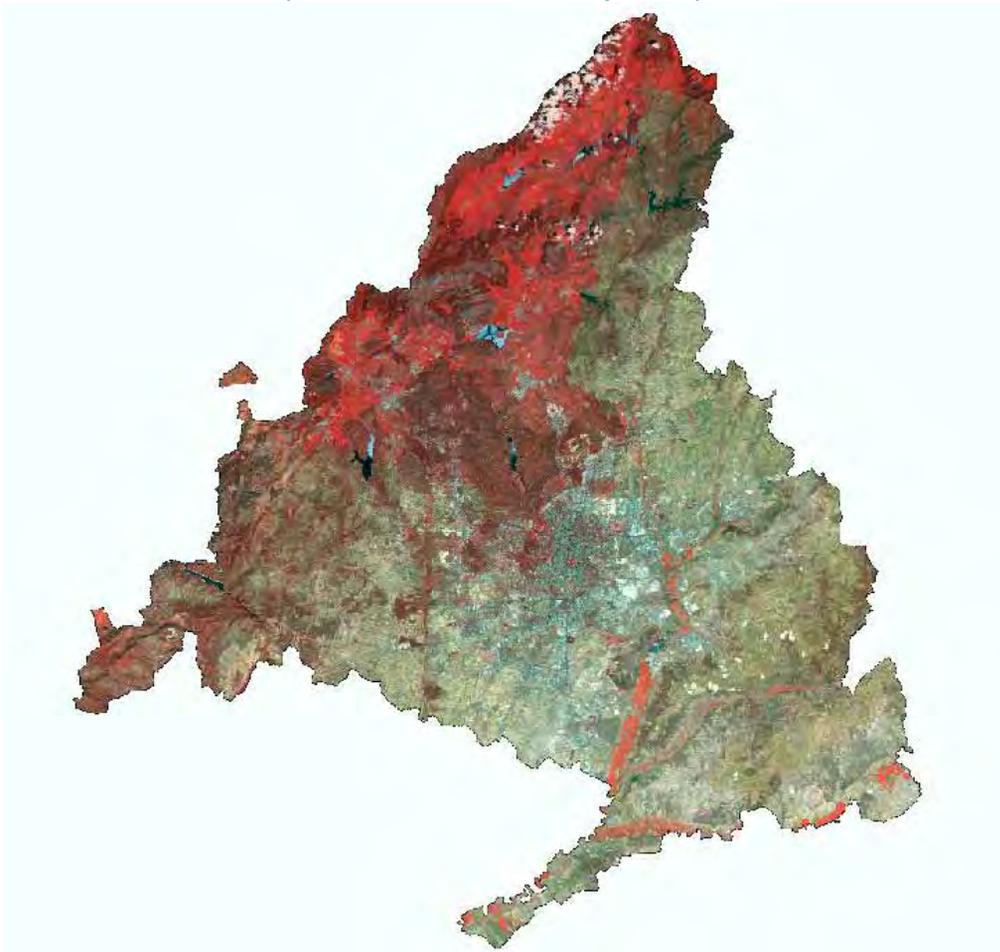
#### 4.4.1.5. Mosaico

El mosaico se considera una imagen continua formada por el conjunto de imágenes necesarias para cubrir el ámbito territorial.

Una vez procesadas cada una de las escenas SPOT5 se realiza un mosaico con todas las imágenes de la cobertura, obtenidas mediante ortorrectificación y fusión, a tamaño de píxel de 2,5 metros, para cada uno de los periodos de estudio. El mosaico se obtiene a partir de un proceso de equilibrado radiométrico aplicado a una combinación de color de tres bandas.

En la figura 44 se observa el mosaico resultante para la cobertura 2008, con la combinación de bandas NIR, rojo y verde.

**Figura 44. Mosaico escenas SPOT5 fusionadas 2,5 m de la cobertura 2008.  
(Combinación de bandas NIR, rojo, verde)**



Los resultados referentes a la ejecución del procesado básico de imágenes sobre todas las coberturas SPOT5, de la Comunidad de Madrid del proyecto, se incluyen en el capítulo 5. Resultados de la adquisición y proceso de imágenes de satélite.

#### 4.4.2. Procesos específicos del seguimiento urbano

En este apartado se desarrolla la parte de la metodología que integra la cadena de procesos orientada a la identificación y clasificación de los recintos urbanos, para su posterior integración en la base de datos cartográfica.

La cadena de procesos específicos de seguimiento urbano integra los siguientes procesos:

- Estratificación
- Detección de cambios
- Segmentación de imágenes
- Clasificación orientada a objetos

##### 4.4.2.1. Estratificación

El objetivo de la estratificación es la delimitación de zonas con un comportamiento urbano y de ocupación del suelo homogéneo, desde la perspectiva del presente proyecto. La delimitación de estratos se realiza utilizando la información del Mapa SIOSE (Sistema Información de Ocupación del Suelo Español) y las coberturas de imágenes de satélite. El mapa SIOSE refleja la ocupación de los usos del suelo a una escala 1:25.000 para el año 2005; por tanto, ha sido necesaria la actualización, una vez agrupadas las clases iniciales contempladas en el mapa en los 6 grandes grupos que engloban la estratificación, a la fecha de trabajo del proyecto, 2008. La actualización se ha realizado comparando la información de la cobertura de imágenes SPOT5, entre las fechas de 2005 (fecha de referencia del SIOSE), y 2008 (fecha de referencia del proyecto), que reflejan la realidad existente para cada una de estas fechas.

En la figura 45 se detalla el mapa con la estratificación resultante.

##### 4.4.2.2. Detección de cambios

La detección de cambios se utiliza para la actualización y delimitación de los estratos a fecha 2008, utilizando la herramienta *Delta Cue* para comparar las coberturas SPOT5 2005-2008.

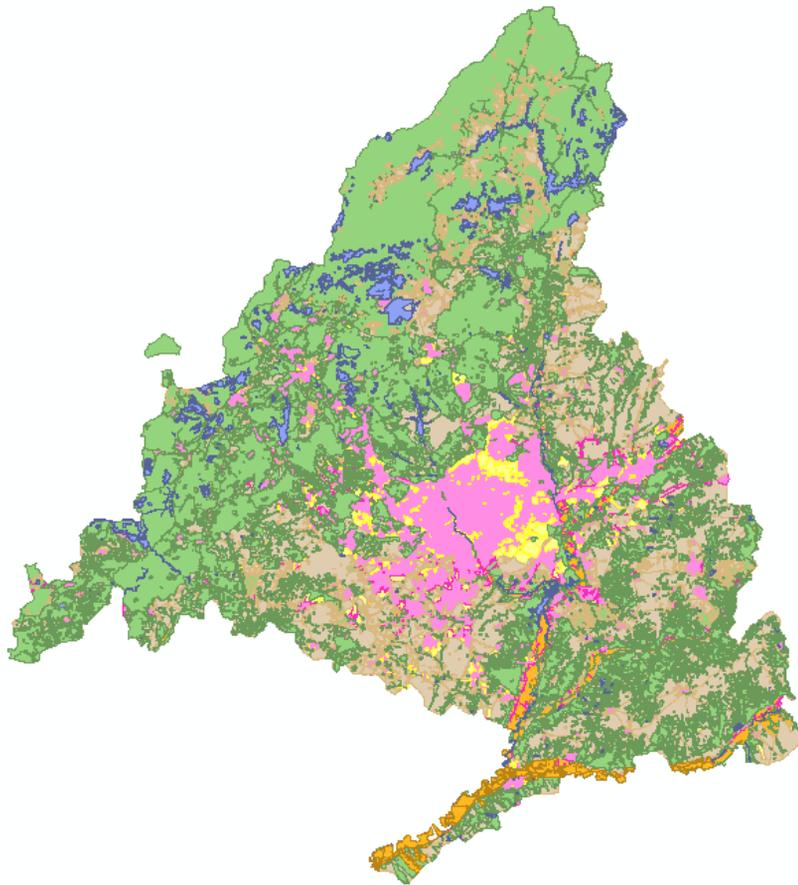
Se trata de una extensión del software de tratamiento de imágenes ERDAS, que permite realizar cálculos comparativos entre imágenes de fechas diferentes con el fin de valorar los cambios acaecidos en el territorio entre ambas fechas.

Integra un conjunto de algoritmos basados en la comparación entre las imágenes de trabajo, a partir de combinaciones de sus bandas originales o sintéticas.

Figura 45. Resultado estratificación 2008

Estrato clase

-  Suelo consolidado
-  Suelo en proceso de consolidación
-  Agrícola de secano
-  Agrícola de regadío
-  Forestal
-  Otros

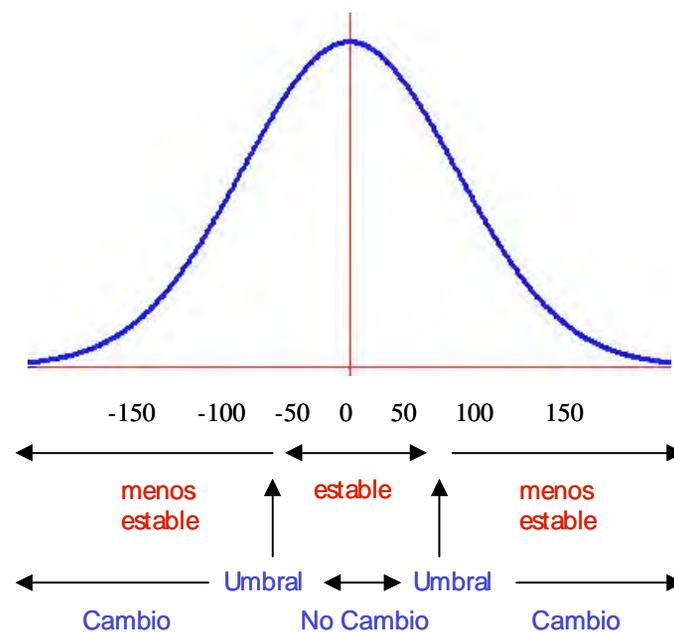


El flujo de trabajo consiste en:

- Aplicación del algoritmo de detección.
- Diferencia de bandas:
  - Diferencia magnitud.
  - Diferencia de colores primarios (R G B).
  - Diferencia entre la pendiente de bandas adyacentes.
- Estimación del valor umbral de cambio.

El resultado de esta comparativa de bandas es una imagen residual que representa el cambio entre esas dos fechas. El valor numérico de la diferencia da una idea del tipo de cambio que se está detectando. El histograma de esa imagen de cambios suele revelar un perfil gaussiano, con las máximas frecuencias para las zonas estables (en el centro del histograma), y las zonas dinámicas ocupando las colas de la distribución, pudiendo ser positivos o negativos. Figura 46.

Figura 46. Representación de las zonas de cambios en el histograma



El umbral determina el valor a partir del cual la imagen residual nos marca la presencia de cambio.

- **Filtrado de la imagen de cambio.**

Una vez aplicado el umbral, la imagen resultado de cualquiera de los algoritmos de cambio, aplicado píxel a píxel es generalmente muy ruidosa, con píxeles aislados, agujeros en medio de componentes de cambio conectados, límites dentados, etc. Esta imagen de cambios suele mejorar con filtros de medias y operaciones morfológicas para suavizar los límites. Los filtros utilizados son de varios tipos:

- Filtros espaciales. Tienen en cuenta el tamaño mínimo de las zonas de cambio valoradas mediante la superficie y la forma, que viene parametrizada por variables como compacidad, elongación y tamaño de ejes.
- Filtro de materiales.

- **Segmentación espectral.**

Muy útil para clasificaciones no supervisadas. Esta fase corresponde a la evaluación, comparación e interpretación de los resultados, apoyados en una segmentación espectral que básicamente se fundamenta en la combinación de la imagen de cambios con una clasificación no supervisada de las imágenes de ambas fechas.

El resultado final es una imagen de cambios categorizados mediante una clasificación no supervisada, por tanto las clases de cambios obtenidas son clases desde el punto de vista matemático que posteriormente hay que analizar, asociar, combinar y disgregar teniendo de referencia las clases de cambio de la leyenda definitiva.

Como resultado se obtiene una imagen de cambios entre las fechas 2005 y 2008, que se revisa y se utiliza para la delimitación de la estratificación a fecha 2008.

#### 4.4.2.3. Segmentación de imágenes

El suelo en proceso de consolidación está constituido por ámbitos en construcción (urbanizaciones y tramas), y estos a su vez, están constituidos por un conjunto de recintos urbanos que hay que delimitar y clasificar en sus diversas categorías (edificio, suelo pendiente de ejecución, vial asfaltado y vial no asfaltado), para posteriormente integrarlos en la base de datos cartográfica.

La clasificación basada en objetos tiene su referencia fundamental en la segmentación de la imagen, cuyo objetivo es la identificación de objetos en la imagen, definidos como agrupaciones de píxeles contiguos con características similares a los elementos del mundo real que modelan.

Las pruebas previas realizadas en esta fase de segmentación y clasificación, ponen de manifiesto la importancia de disponer de un catastro lo más actualizado posible. Para este proyecto se utilizó el catastro urbano de la Comunidad de Madrid del año 2009.

El análisis visual de la superposición del catastro sobre la cobertura SPOT5 2008 pone de manifiesto, que algunos ámbitos en construcción tienen su parcelación fielmente reflejada en el catastro, mientras que para otros, su parcelación real sobre la imagen o es bien diferente al reflejado en el catastro, o el catastro carece de esa información.

Respondiendo a la relación existente entre el catastro y los ámbitos a clasificar, se distinguen tres actuaciones diferentes:

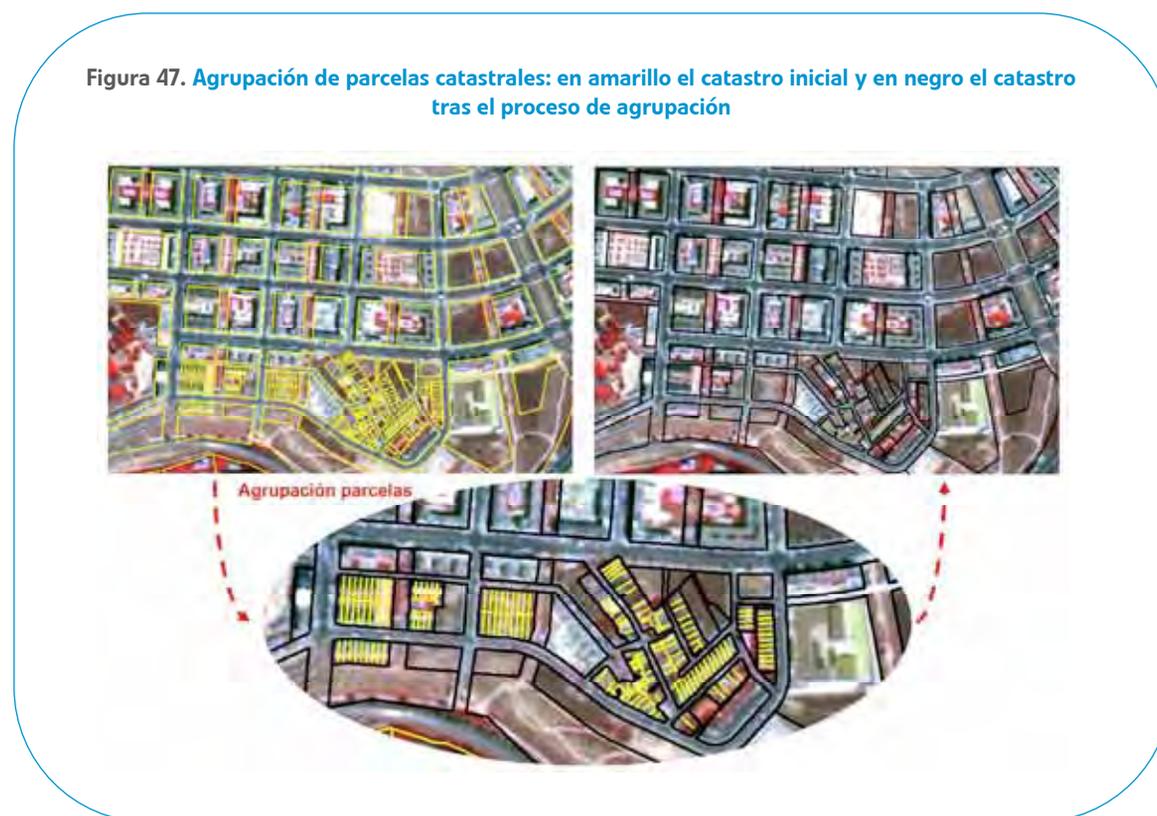
- 1) En aquellos ámbitos a clasificar y con catastro adecuado, la imagen se ha segmentado según los límites existentes en la cartografía catastral correspondientes a recintos o parcelas con un uso homogéneo. De esta forma, se consigue generar objetos en la imagen con un mayor significado geográfico que el que tienen los píxeles, que realizan una división del espacio basada en el valor de radiancia recibido por el sensor que adquiere la imagen, en lugar de por las características del territorio representado.

Teniendo en cuenta que el catastro urbano es una información elaborada con un nivel de detalle y una escala muy alta, en muchas ocasiones las parcelas catastrales, resultan muy pequeñas comparadas con la resolución espacial que proporciona la imagen SPOT5, por lo que este tipo de parcelas no son útiles para segmentar la imagen. Analizando el catastro con más detalle se estudió la posibilidad de unir parcelas pequeñas correspondientes al mismo elemento visual de la imagen SPOT5. El criterio que se ha definido para agrupar parcelas integra las siguientes normas:

- parcelas semejantes, contiguas y de superficie menor a 1500 metros cuadrados y
- las parcelas deben pertenecer a la misma manzana, mismo recinto SIOSE y mismo ámbito.

En la figura 47 se muestra un detalle del resultado del proceso de agrupación de parcelas de acuerdo al criterio definido. Sobre la imagen SPOT5 se representa en amarillo el catastro inicial, y en negro el catastro tras el proceso de agrupación.

En el detalle inferior se observa cuáles son las parcelas que resultan agrupadas.



Las figuras 48 y 49 muestran el resultado de la segmentación para los casos en que existe catastro adecuado.

**Figura 48. Imagen SPOT5 fusionada 2,5 m a nivel píxel**



**Figura 49. Imagen segmentada a partir de parcelas catastro**

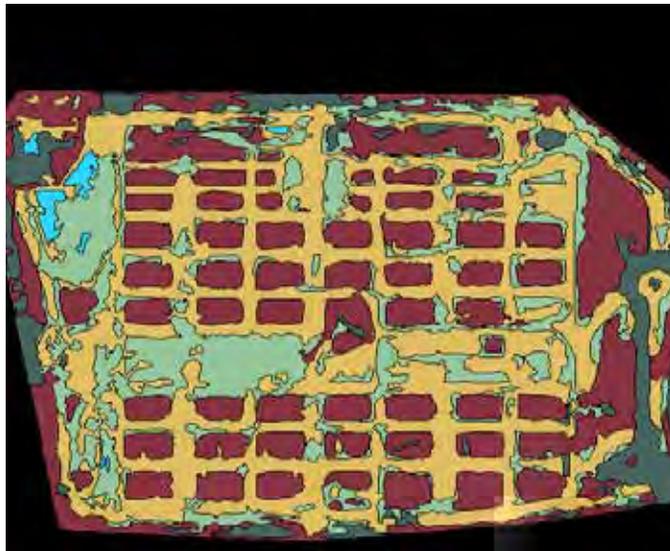


- 2) Sin embargo, para aquellos ámbitos en los que no existe catastro adecuado, se han utilizado herramientas (Feature Analyst, módulo del software ERDAS), capaces de extraer objetos basados en la signatura espectral de elementos y en información contextual, como la forma y la textura, que tienen en cuenta el entorno del píxel objeto de clasificación.

**Figura 50. Imagen SPOT5 fusionada 2,5 m a nivel píxel**



**Figura 51. Imagen segmentada (Feature Analyst)**



- 3) La tercera casuística corresponde a los ámbitos categorizados como "tramas", que como se ha indicado en el apartado 4.3, son zonas generalmente de poca superficie donde no se discriminan objetos y por tanto, se clasifican como recinto único.

#### 4.4.2.4. Clasificación orientada a objetos

Entre los métodos de clasificación que consideran la distribución espacial existente en la imagen, se incluyen los clasificadores orientados a objetos. Esta metodología de clasificación tiene en cuenta la forma, la textura y las propiedades espectrales de los objetos que forman la imagen, así como las relaciones existentes con los objetos vecinos situados en un contexto espacial más o menos cercano. Por tanto, se dispone de mucha más información numérica referente a las características descriptivas de los objetos que facilitarán su correcta clasificación. Así, la clasificación se realiza sobre los objetos y no sobre los píxeles individualmente.

Entre las herramientas de clasificación automática o semiautomática existentes, se han utilizado técnicas capaces de realizar clasificaciones supervisadas de extracción de objetos (Feature Analyst de ERDAS y Feature Extractor de ENVI).

Estas técnicas permiten distinguir elementos teniendo en cuenta el contexto espacial o el entorno del elemento a clasificar. Para ello, se utilizan diferentes patrones de búsqueda en función del elemento a representar, variando el tamaño de la ventana de búsqueda, la distribución de los píxeles analizados y el peso que tienen en la clasificación.

Además, la imagen utilizada para la clasificación puede estar integrada por información radiométrica (diferentes bandas de una imagen), imagen de texturas, imágenes reclasificadas, imagen de cambios, información auxiliar e incluso modelos digitales del terreno. Toda esta información resulta muy útil para definir la modelización en el proceso de clasificación.

Un aspecto muy interesante de estas técnicas, es que permiten realizar clasificaciones mediante técnicas de aprendizaje, utilizando procesos iterativos e interactivos. De esta manera, se puede analizar la clasificación y corregir aquellas zonas mal clasificadas o incluir aquellas que no han sido clasificadas pero pertenecen a una determinada clase. Al lanzar de nuevo la clasificación se utilizan estas correcciones para mejorar el resultado final. Este proceso se puede realizar tantas veces como se considere necesario hasta obtener una clasificación que se ajuste a los objetivos.

En las figuras 52 a 55 se muestran los resultados de clasificación de un ámbito incluido en el estrato "suelo en proceso de consolidación".

Los resultados de la clasificación son revisados por técnicos experimentados en técnicas de fotointerpretación.

Los resultados referentes al seguimiento urbano obtenido del proceso sobre las coberturas SPOT5 de la Comunidad de Madrid se incluyen en el capítulo 6. Resultados del seguimiento urbano.

Figura 52. Imagen SPOT5 fusionada a 2,5 m, a clasificar con catastro adecuado



Figura 53. Ejemplo clasificación catastro adecuado



Figura 54. Imagen SPOT5 fusionada a 2,5 m, a clasificar con catastro no adecuado



Figura 55. Ejemplo clasificación catastro no adecuado



#### 4.4.3. Procesos específicos de delimitación zona verde

La zona verde del proyecto engloba las zonas verdes urbanas o jardines, las zonas agrícolas y las zonas naturales.

El interés en conocer los distintos tipos de zona verde, se basa en los siguientes puntos:

- La delimitación de las zonas ajardinadas (zonas verdes urbanas) permite conocer la demanda de agua requerida por las zonas verdes urbanas, grandes consumidores de este recurso. En estas zonas se ha realizado un estudio más detallado clasificándolas a su vez en zonas de césped y arboladas. El escenario inicial planteado contempla la estimación de la superficie en los periodos de primavera y verano. La comparación de esta superficie verde con las zonas naturales, y la evolución de la superficie verde de primavera a verano son un indicador de si los jardines se riegan habitualmente, ocasionalmente, o por el contrario no se riegan.
- La actividad de las zonas agrícolas a partir del NDVI permite la estimación de la superficie de los cultivos en pie en primavera y verano (en caso de disponer imágenes en estos periodos) y disponer de información sobre el uso realizado de las dotaciones de agua agrícola en diferentes momentos del año y en años consecutivos.
- Por último, el comportamiento de las zonas verdes naturales a lo largo del año da información de las características del año desde el punto de vista climatológico.

La delimitación de la superficie verde se fundamenta en su peculiar comportamiento espectral, que se traduce en que la vegetación presenta un claro contraste entre las bandas del visible, especialmente la roja y el infrarrojo cercano. Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al infrarrojo cercano. Por esta razón se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda roja y la del infrarrojo cercano, que permite separar con relativa claridad la vegetación sana de otras cubiertas.

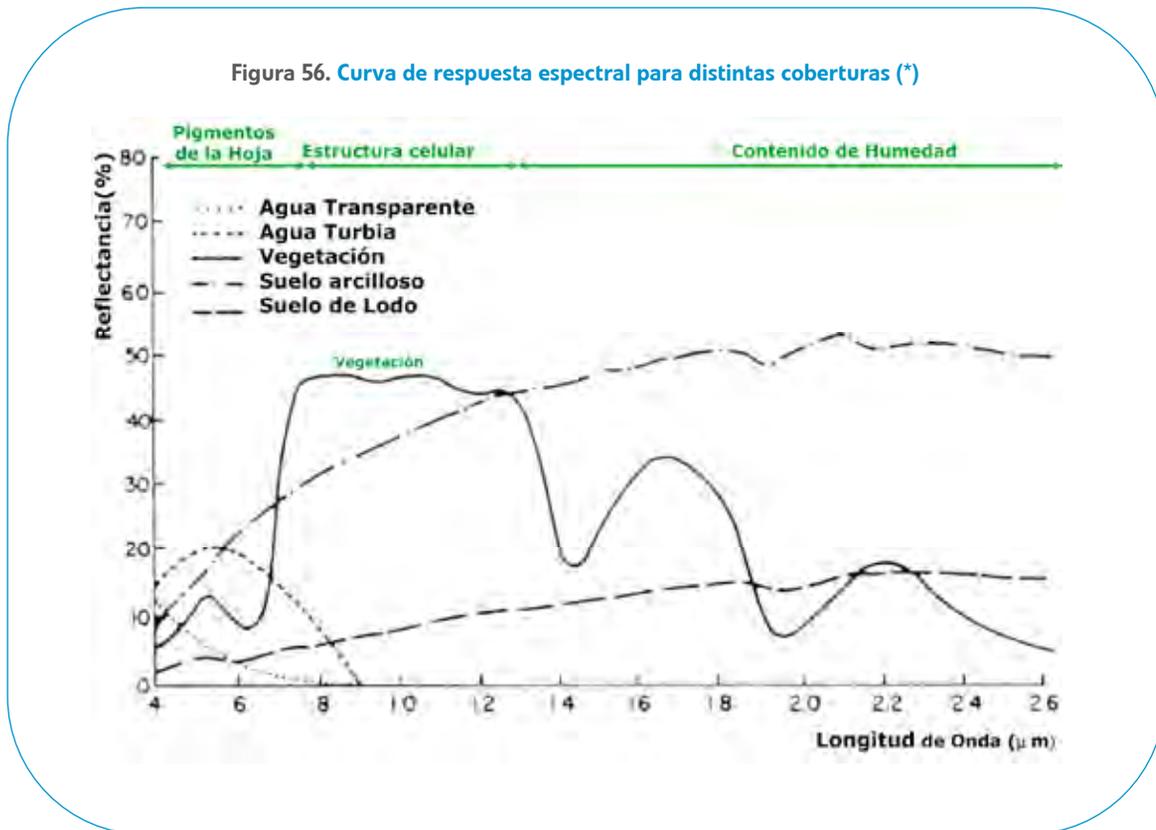
En trabajos que implican la delimitación o estudio del comportamiento de la vegetación, es obligado la utilización de índices de vegetación que se basan en este comportamiento espectral y en general, se definen como relaciones sencillas generalmente calculadas entre las bandas roja y e infrarrojo cercano, ofreciendo una medida cuantitativa del estado de la vegetación. Los índices se suelen utilizar para numerosas aplicaciones relacionadas con la dinámica de la cobertura vegetal.

Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, bien debido a plagas o sequías intensas, la reflectividad en el infrarrojo se ve notablemente disminuida, aumentando además la reflectividad en la banda roja por presentar menor absorción clorofílica. Esto permite deducir que cuanto mayor sea la diferencia entre el infrarrojo cercano y rojo, mayor vigor vegetal presenta la cubierta vegetal observada y de manera análoga, bajos contrastes indican algún problema en el desarrollo de la vegetación.

El índice de vegetación más ampliamente utilizado es el **Índice de vegetación normalizado (NDVI)**, calculado normalizando la relación entre las reflectividades de las bandas infrarroja ( $\rho_{NIR}$ ) y roja ( $\rho_R$ ), mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

En la figura 56 se puede observar el comportamiento de diferentes cubiertas terrestres frente a la radiación electromagnética.



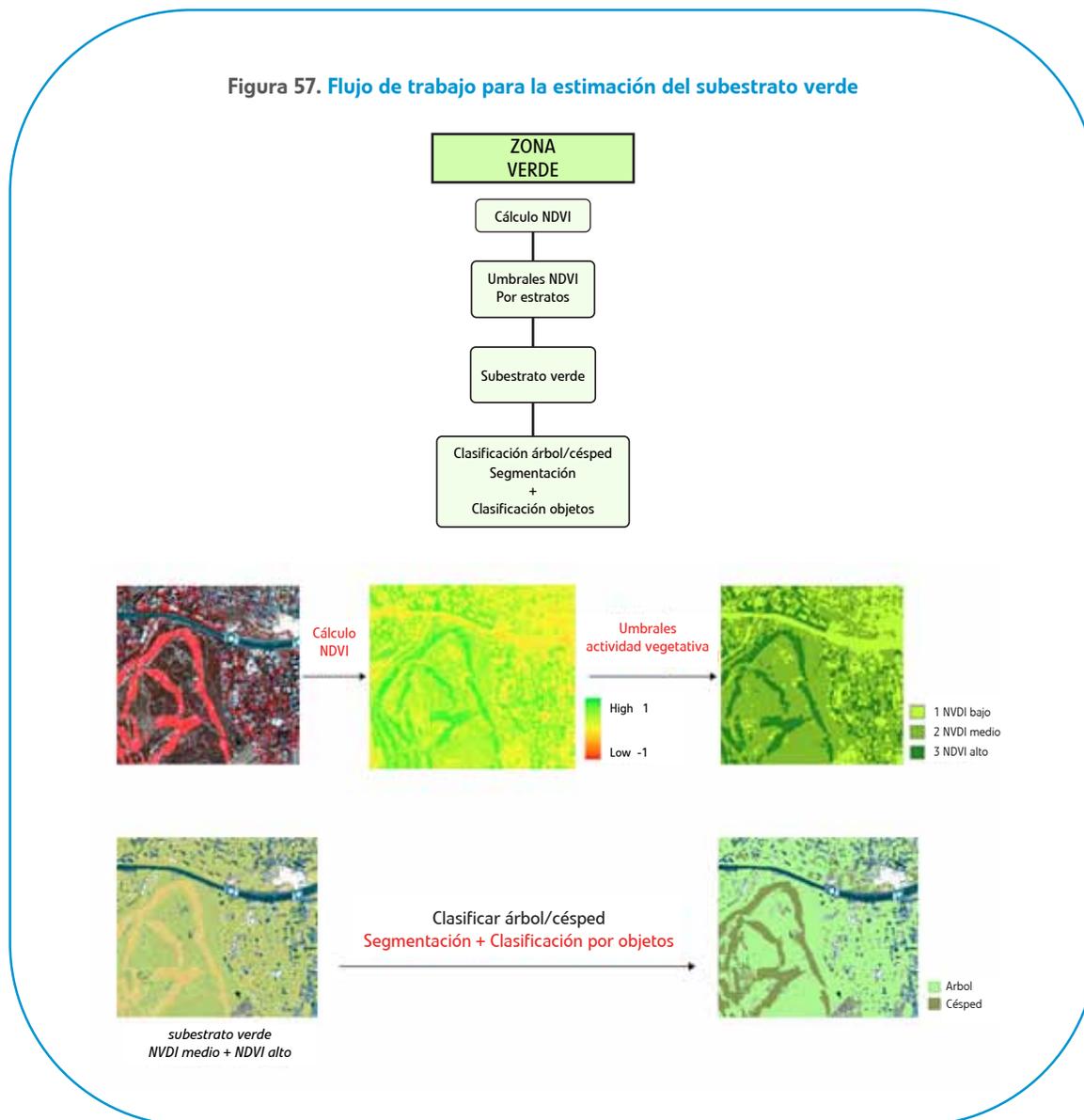
(\*) Adaptado Chuvieco E. Teledetección ambiental Ed. Ariel Ciencia 2006

Este índice presenta una alta estabilidad y permite estimar a partir del estudio de su evolución temporal, variaciones significativas en cuanto al crecimiento y actividad del cultivo en estudios estacionales o interanuales. Entre sus puntos fuertes se encuentra su fácil análisis, su cálculo sencillo, y su propia definición que reduce posibles ruidos ocasionados por diferencias de iluminación debidas a sombras, atenuación atmosférica, etc. Sin embargo, su principal inconveniente radica en la falta de linealidad y que puede saturarse con facilidad, además del efecto provocado por otros factores externos a la vegetación. Aunque diversos autores han propuesto alternativas al NDVI que tratan de paliar este efecto, el NDVI sigue siendo el más utilizado.

La delimitación y caracterización de las zonas verdes mediante generación de índices de vegetación y estudio de su comportamiento, se ha realizado conforme a las siguientes tareas:

- Cálculo del NDVI
- Definición de umbrales de actividad vegetativa para cada estrato
- Estudio más detallado y creación del subestrato verde urbano, dentro de los estratos "suelo consolidado" y "suelo en proceso de consolidación"
  - Segmentación.
  - Clasificación árbol y césped.

La figura 57 muestra el flujo de trabajo para la estimación de la superficie verde:



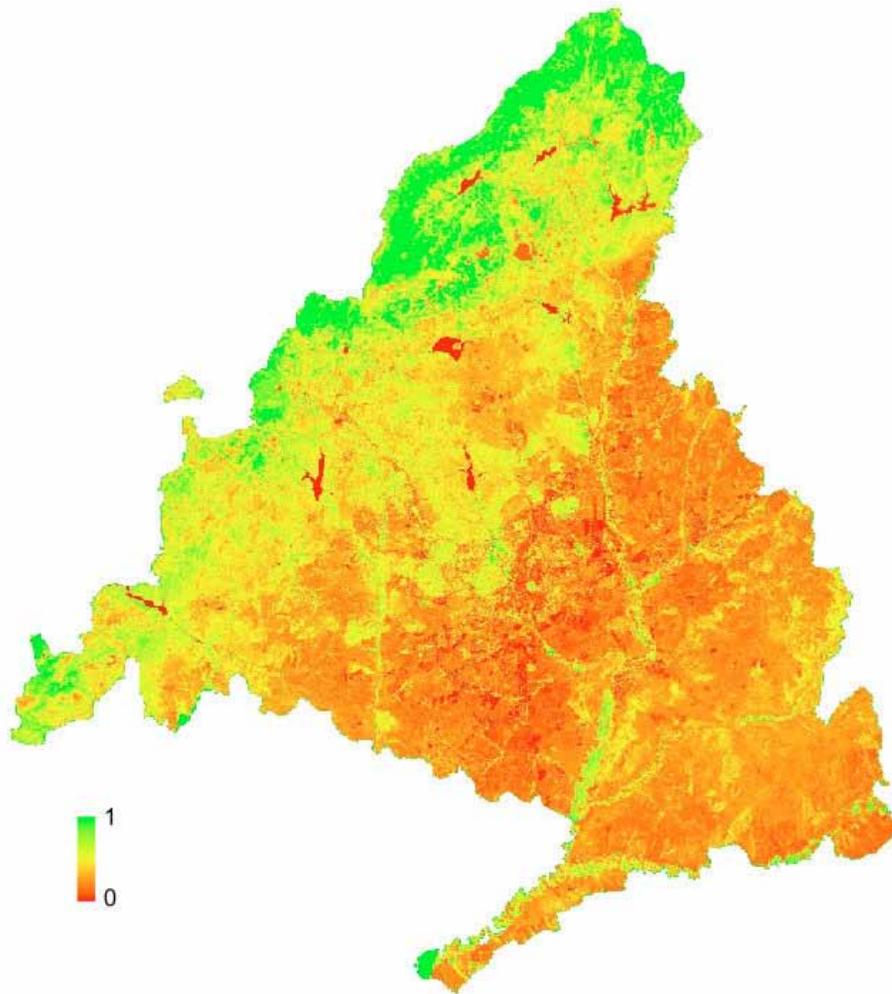
#### 4.4.3.1. Cálculo del NDVI

El cálculo del índice de vegetación se estima según los siguientes pasos:

- Normalización de los valores de reflectancias de las escenas SPOT5
- Generación del mosaico de la Comunidad de Madrid
- Cálculo del índice de vegetación NDVI

El resultado del mapa mosaico del índice de vegetación NDVI de la Comunidad de Madrid, para verano 2010, se muestra en la figura 58.

**Figura 58. Mapa de NDVI de verano 2010 de la Comunidad de Madrid**



#### 4.4.3.2. Definición de umbrales

El valor umbral del NDVI, establece el valor numérico del NDVI en la imagen a partir del cual se considera que ese píxel es vegetación.

Para establecer este valor, en primer lugar se analiza la distribución de valores del NDVI en la imagen, mediante el análisis conjunto de la distribución de sus valores digitales en el histograma y la inspección visual del mapa raster del NDVI y la imagen de partida, utilizando la composición en falso color (NIR, Rojo, Verde), en la que la banda NIR facilita la identificación de la vegetación. En este análisis previo de comportamiento del NDVI en toda la Comunidad de Madrid, se aprecia que la respuesta es diferente según el estrato que se analice. Por este motivo se concluye que no se debe definir un umbral único para toda la Comunidad, y por tanto se decide trabajar por estrato, asignando a cada estrato el número de rangos más adecuado.

Dentro de cada estrato y teniendo en cuenta sus características, se hace una primera aproximación a partir del estudio de los histogramas de valores de NDVI y se calcula un primer umbral, de tal manera que aquellas zonas que sea evidente que son vegetación, o que no lo son, sean incorporados en su rango correspondiente. Después, se intenta afinar el umbral comparando unas escenas con las otras. Una vez establecido el umbral respectivo, se comprueba que ese valor no deja fuera zonas verdes con actividad y, en caso contrario, es conveniente reajustar el valor del umbral.

A continuación se detalla el número de rangos definido para cada estrato. Las figuras 59 a 63 ilustran los diferentes estratos.

- **Suelo consolidado**  
El substrato verde inunda el suelo consolidado.  
Se separan tres rangos: No vegetación, NDVI medio y NDVI alto.
- **Suelo en proceso de consolidación**  
Se separan tres rangos: No vegetación, NDVI medio y NDVI alto.
- **Suelo forestal**  
Se separan tres rangos: No vegetación, NDVI medio y NDVI alto.
- **Suelo agrícola de secano**  
Se separa en dos rangos: No cultivo y cultivo en pie.
- **Suelo agrícola de regadío**  
Se separa en dos rangos: No cultivo y cultivo en pie.

La superficie verde obtenida para cada uno de los estratos, y para cada rango de actividad vegetativa (formato raster) se cruza con la información de municipios. El resultado obtenido se entrega en una tabla alfanumérica que contiene la superficie verde en hectáreas de cada estrato y en sus respectivos rangos por municipio.

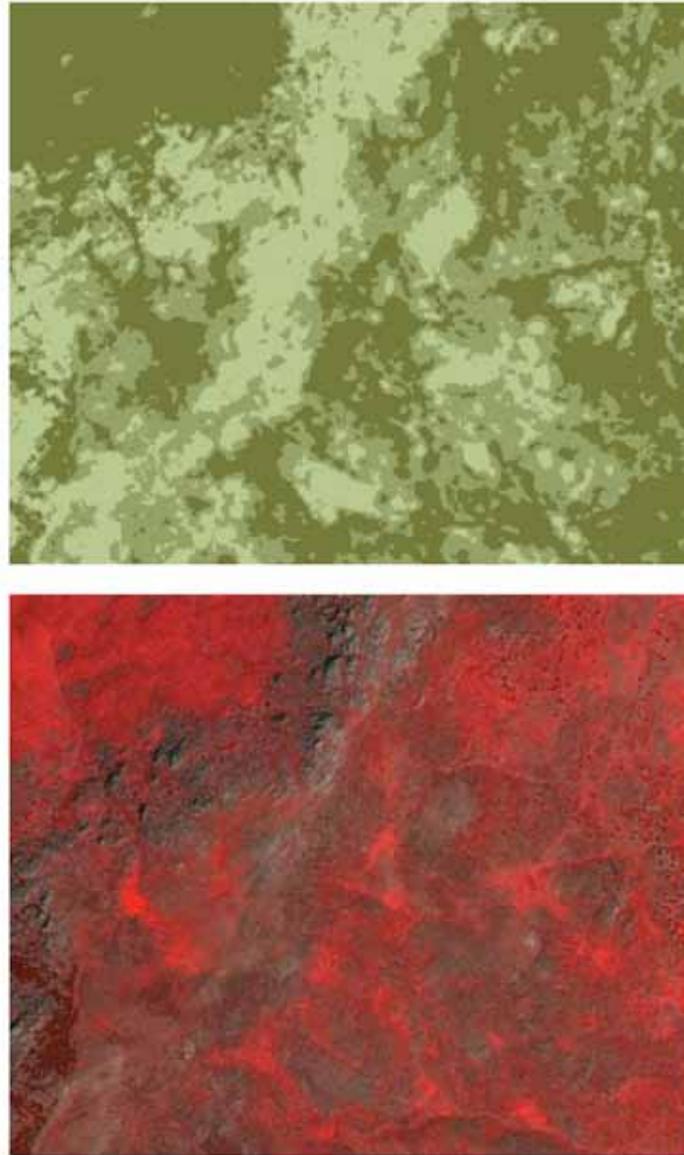
Figura 59. Delimitación del sustrato verde en el estrato suelo consolidado



**Figura 60. Delimitación del sustrato verde en el estrato suelo en proceso de consolidación**



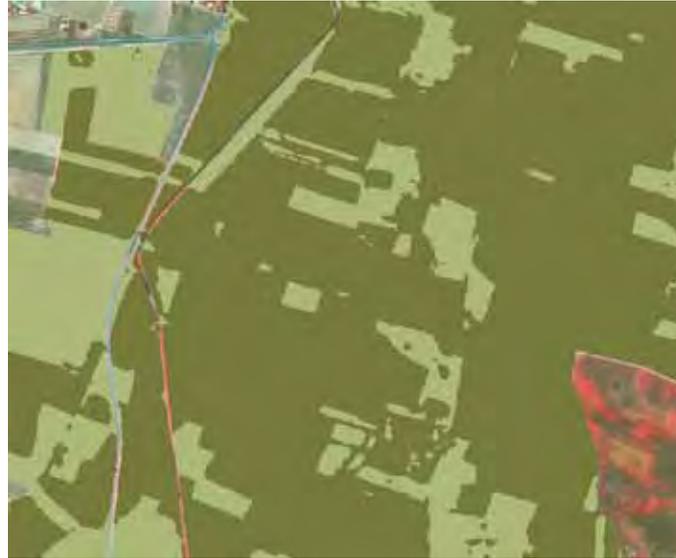
**Figura 61. Rangos del estrato forestal. (No vegetación, NDVI medio y NDVI alto)**



**Figura 62. Rangos del estrato agrícola seco (no cultivo, cultivo en pie)**



**Figura 63. Rangos del estrato agrícola regadío (no cultivo, cultivo en pie)**



#### 4.4.3.3. Generación sustrato verde

El sustrato verde integra la vegetación (NDVI medio + NDVI alto) que inunda los estratos suelo consolidado y suelo en proceso de consolidación. Debido a su gran interés se estudia con mayor detenimiento.

El sustrato verde está constituido por ámbitos verdes: a) Parques y jardines; y b) Campos de golf.

A su vez se dividen en recintos verdes: árbol y césped.

La definición de estos ámbitos verdes se apoya en la base de datos cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006.

La clasificación de los recintos verdes, se obtiene a partir de la imagen de satélite mediante procesos de segmentación y clasificación. La herramienta utilizada es Feature Analyst que, como se ha descrito en el epígrafe **4.4.2.3 Segmentación de imágenes**, previa a la clasificación orientada a objetos, permite identificar elementos teniendo en cuenta el contexto espacial o entorno del elemento a clasificar. Para ello, se utilizan diferentes patrones de búsqueda en función del elemento a representar, variando el tamaño de la ventana de búsqueda, la distribución de los píxeles analizados y el peso que tienen en la clasificación.

En una primera fase se clasifican el césped y el árbol en clasificaciones individuales, para valorar los resultados.

Una vez comprobado que las muestras tomadas son correctas, se procede a clasificar toda la imagen de manera conjunta, para identificar ambas clases.

Cabe destacar que la estimación inicial del sustrato verde urbano obtenida de la cobertura SPOT5 de 2009 sobrevaloraba la superficie, manifestándose principalmente en una mayor proporción de superficie de árboles, mientras que la zona de césped se quedaba minorada, aunque no en la misma proporción.

Se realizó un análisis y revisión del proceso para solventar el problema y ajustar la metodología. La revisión de la metodología confirma que los umbrales definidos para el NDVI son los adecuados. Sin embargo, hay que tener presente que la estimación del árbol se realiza mediante la identificación de su copa. Desde esta perspectiva, la visión de la superficie es mayor que la teóricamente medible y como consecuencia la superficie verde queda sobreestimada. Por el contrario, como el árbol imposibilita la estimación de césped bajo su copa (en caso de existir), la superficie verde de césped puede verse minorada. Además de la propia geometría de los árboles (altura-copa), la geometría de adquisición y la escala de la imagen son otros factores a tener en cuenta en la sobreestimación de la superficie arbórea que debemos corregir.

La solución propuesta para corregir la sobreestimación ha consistido en una reducción del contorno de la superficie de árbol, teniendo en cuenta, que en muchas ocasiones, la copa del árbol oculta zona de césped que no debemos eliminar. Por tanto, se ha considerado que para aquellas zonas de árbol colindantes con césped el contorno de la superficie arbórea no se podía eliminar ya que ocultaba césped y por tanto para estas casuísticas la sobreestimación del árbol se ha reasignado al césped.

Los resultados obtenidos se han contrastado con las imágenes SPOT5, Quickbird y ortofoto, y con las bases de datos cartográficas de superficie verde del año 2006, mostrando una notable coherencia. A la hora de realizar este análisis comparativo hay que tener en cuenta la escala de trabajo y el distinto método de obtención de resultados asociados con las fuentes datos de partida. La valoración y confrontación de resultados de la estimación de la superficie césped-árbol sobre las diferentes imágenes se ha realizado comparando los resultados numéricamente y mediante fotointerpretación, para toda la Comunidad de Madrid y en diferentes zonas aleatorias. Además, se ha realizado un análisis en detalle en los municipios de Aranjuez, Zarzalejo y Loeches,

por presentar diferentes estados en el grado de desarrollo urbano. La valoración de los resultados ha sido satisfactoria.

Los resultados referentes a la delimitación de la superficie verde obtenidos del proceso sobre las coberturas SPOT5 de la Comunidad de Madrid se incluyen en el capítulo **7. Resultados de la estimación de la superficie verde**.

#### **4.4.4. Procesamiento de las series de imágenes posteriores para la actualización de la base de datos cartográfica**

El proceso de series de imágenes posteriores tiene como objetivo actualizar la base de datos cartográfica. La metodología seguida queda estructurada igual que para la primera serie en:

- Procesado básico de las imágenes
- Procesado específico del seguimiento urbano:
  - Revisión de la estratificación
  - Identificación de nuevos ámbitos
  - Actualización y clasificación ámbitos
- Procesado específico del seguimiento de la zona verde

El proceso básico de imágenes y los procesos específicos de la delimitación de la zona verde son idénticos a los seguidos para la primera serie. Sin embargo, los procesos específicos de seguimiento urbano se centran en la actualización de la estratificación, respecto a la realizada en las respectivas actuaciones anteriores. En concreto, se presta especial interés en la localización de nuevos ámbitos urbanos que amplían el estrato suelo en proceso de consolidación. Esta actualización de la estratificación se realiza mediante técnicas de detección de cambios.

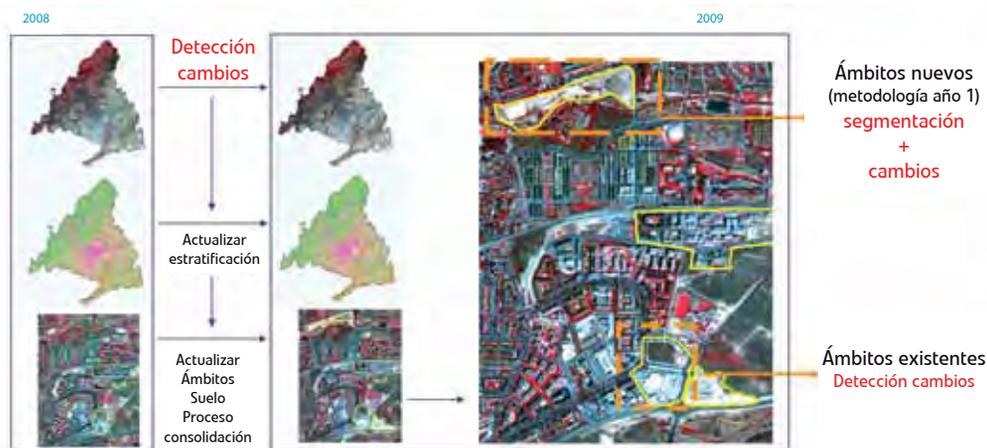
El siguiente paso es la clasificación de los recintos de los ámbitos que integran el suelo en proceso de consolidación, procediéndose de forma diferente si son ámbitos ya existentes o son ámbitos nuevos. Así, los nuevos ámbitos se clasifican como en la serie correspondiente a 2008, analizando el catastro del que se dispone y realizando la segmentación y clasificación por objeto.

Los ámbitos ya existentes en la actuación anterior, se procesan mediante detección de cambios.

Los resultados obtenidos actualizan la Geodatabase a verano 2009, primavera 2010 y verano 2010, según actuaciones.

En la figura 64 se presenta el flujo de trabajo del procesado específico de seguimiento urbano para las series posteriores de imágenes.

**Figura 64. Flujo de trabajo del procesamiento específico de seguimiento urbano para series posteriores**



#### 4.4.5. Verificación de metodología con imágenes Quickbird

Con el fin de servir de contraste y control de calidad de la metodología desarrollada en el proceso de la cobertura SPOT5, se adquiere sobre una zona piloto y para cada periodo de proceso una imagen del satélite Quickbird, en modo multiespectral (2,4 metros), y pancromática (0,6 metros), de fecha similar a la cobertura SPOT5.

Para las coberturas de los años 2008-2009 se trabaja sobre una zona piloto ubicada en Rivas Vaciamadrid. La selección de la zona responde a las áreas de interés, condicionada con la disponibilidad de imágenes de archivo de verano 2008.

Para las escenas de 2010, ya que Rivas Vaciamadrid presentó poca actividad durante el periodo 2008-2009, se eligió una nueva zona piloto en Móstoles.

La superficie de la primera escena adquirida, al ser de archivo, es de 64 kilómetros cuadrados, (para coincidir con la superficie mínima de adquisición de las imágenes programadas), mientras que las imágenes de los siguientes años, adquiridas mediante programación, son de 77 kilómetros cuadrados (superficie mínima de adquisición por programación – según criterios recientes).

La metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT5 aunque adaptada a sus características espaciales, y se estructura también en:

- Procesado básico
- Procesos específicos de seguimiento urbano
- Procesos específicos de delimitación de la zona verde

Respecto al **proceso básico**, cabe resaltar que la zona piloto de Móstoles presenta gran actividad y que su nueva altimetría no está recogida en el Modelo Digital del Terreno (en adelante MDT) utilizado. Como consecuencia de ello la ortorrectificación presenta algunos desajustes zonales (del orden de 2-3 metros) en algunas zonas de nueva edificación, donde ha habido movimientos importantes de tierra, y por tanto existen variaciones de la cota del terreno que no están contempladas en el MDT disponible. Este efecto se aprecia de forma puntual al superponer el catastro. No obstante, en el resto de la imagen el resultado presenta una precisión cartográfica muy buena.

De manera operativa la triangulación en las zonas nuevas se basa únicamente en puntos de control de calidad, escogidos principalmente en zonas donde el MDT no ha cambiado. Hay que resaltar que estos desajustes puntuales no afectan en absoluto al resultado del proyecto. Para solventar este problema en futuras actuaciones, es conveniente estudiar la viabilidad de conseguir un MDT más actual para que el resultado cartográfico visual tenga mayor precisión.

Respecto a la fusión se utiliza el algoritmo "à trous" basado en el análisis multirresolución y las transformaciones "wavelet", incorporando el detalle de la imagen pancromática a la componente principal de la imagen multiespectral. Este es el método que ofrece mejores resultados para imágenes Quickbird. Además, como las imágenes pancromáticas y multiespectrales se captan de manera simultánea, el proceso de fusión se realiza previa la ortorrectificación ya que garantiza mejores resultados.

Los **procesos específicos de seguimiento urbano** consisten en la identificación y clasificación de los recintos integrantes de los ámbitos pertenecientes al suelo en proceso de consolidación incluidos en la escena Quickbird.

La metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT5, ya que el objetivo de esta fase consistía en la validación de la metodología.

Respondiendo a la relación existente entre el catastro disponible y los ámbitos a clasificar, la metodología desarrollada contempla tres actuaciones diferentes:

- Los ámbitos a clasificar y con catastro adecuado, cuya metodología se basa en la segmentación a partir del catastro y clasificación.
- Los ámbitos a clasificar y con catastro no adecuado, cuya metodología se basa en la segmentación de recintos a partir de rasgos extraíbles de la imagen y su posterior clasificación.
- Las tramas, ámbitos en los que SPOT5 no identifica una estructura definida y se clasifican como un único recinto.

Lo más significativo es que Quickbird permite clasificar todos los recintos procedentes de las parcelas originales que proporciona el catastro; mientras que con SPOT5, debido a su menor resolución, se ha visto la conveniencia de disolver los recintos pequeños antes de segmentar y realizar la clasificación. Esta diferencia se puede apreciar en las figuras 65 y 66.

---

<sup>2</sup> MDT: Modelo Digital del Terreno

Figura 65. Recintos y clasificación SPOT5



## Leyenda

- 1. Edificios
- 2. Suelos
- 3. Vial Asfaltado
- 4. Vial No Asfaltado

Figura 66. Recintos SPOT5 vs. recintos Quickbird SPOT5 (fucsia) sobre la clasificación Quickbird



## Leyenda

- 1. Edificios
- 2. Suelos
- 3. Vial Asfaltado
- 4. Vial No Asfaltado

El proceso específico de delimitación de la zona verde se realiza a partir del cálculo del NDVI, definición de umbrales para establecer el rango de actividad de la vegetación y segmentación en árbol y césped.

Los resultados relativos a la verificación de metodología con imágenes Quickbird se incluyen en el capítulo 8.

## 4.5. Fase 5. Estimación de la demanda de agua

El objetivo de esta fase es calcular una estimación de la demanda de agua correspondiente al consumo de la consolidación de la zona urbana en desarrollo y las zonas verdes.

### 4.5.1. Estimación de la demanda de agua en la zona urbana

La hipótesis de partida para la estimación de la demanda de agua en zona urbana como producto derivado y complementario del seguimiento del desarrollo urbano en las zonas en proceso de consolidación, se apoya en las siguientes bases:

Conocimiento de la demanda de agua total esperada en dichas zonas; es decir, el consumo final previsto.

1)

Conocimiento de la superficie edificable en planta de los diferentes ámbitos de los planes urbanísticos; es

2) decir, superficie en planta a construir.

Combinando esta información con los resultados del proyecto, que proporciona la superficie construida en planta a fecha de adquisición de las imágenes, se obtendría la demanda actual esperada.

Se hace notar que la información asociada a los planes urbanísticos hace referencia a la edificabilidad total, es decir, incluye la superficie edificable de las posibles plantas que pueden construirse, sin embargo, no se dispone de la superficie total edificable en planta. Por ello es preciso realizar estimaciones para relacionar la superficie en planta detectada con la técnica empleada, utilizando imágenes de satélite con la superficie total edificable en el correspondiente ámbito de planeamiento. Otras técnicas más costosas que proporcionan información en vertical (información LIDAR<sup>3</sup>) permitirían valorar la superficie edificada en altura, aunque habría que valorar su viabilidad.

No obstante, la identificación de nuevas zonas urbanas en proceso de consolidación, que proporciona la superficie construida en planta a fecha de adquisición de las imágenes, y la evaluación de la superficie edificada en relación con la prevista en los planes urbanísticos, permite una estimación más precisa de la aparición de nuevas demandas, su distribución geográfica y velocidad de consolidación.

### 4.5.2. Estimación de la demanda de agua en zonas verdes

La estimación de la demanda de agua de las zonas ajardinadas de la Comunidad de Madrid se calcula como las necesidades de riego de las mismas, a partir de la evapotranspiración de referencia  $ET_0$  y mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

---

<sup>3</sup>LIDAR acrónimo del inglés (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Al igual que ocurre con la tecnología radar, donde se utilizan ondas de radio en vez de luz, la distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

$$NR_{mes} = \frac{ET_{c(mes)} - P_{mes}}{\text{Eficiencia Riego}}$$

Donde:

- $P_{mes}$ : precipitación acumulada mensual en milímetros
- $NR_{mes}$ : necesidades de riego mensuales en milímetros
- $ET_{c(mes)}$ : evapotranspiración del cultivo mensual en milímetros

A modo de introducción puede indicarse que la evapotranspiración real de una superficie ET en nuestras condiciones puede considerarse igual a la evapotranspiración de cultivo  $ET_c^4$ .

El cálculo de la  $ET_c$  se realiza a partir de la evapotranspiración de referencia  $ET_0$  calculada a partir de los datos obtenidos en las estaciones agroclimáticas corregido con un factor  $K_c^5$  proporcionado por un manual de la FAO<sup>6</sup>, mediante la fórmula:

$$ET_{c(mes)} = ET_0 \times K_0$$

Donde:

- $ET_0$ : es la evapotranspiración de referencia.

Se calcula según el método propuesto por Hargreaves y Samani en 1985 basado en el método del balance energético con la siguiente fórmula:

$$ET_0 = 0.0023 \times R_A \times (T - t)^{0.5} \times (t_m + 17.8)$$

<sup>4</sup>ETc El valor de la evapotranspiración real de una superficie puede coincidir con la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) para esa superficie si se dan las condiciones óptimas para ello, condición que podemos asumir que ocurre en las parcelas de riego con un buen manejo.

<sup>5</sup>Kc Es un factor corrector de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) necesario para obtener la evapotranspiración del cultivo (ETc). Depende del cultivo (especie e incluso variedad), de su ciclo vegetativo, y de su fenología, así como de las condiciones específicas del cultivo en la explotación (densidad de población, orientación de las líneas, etc.) y de las condiciones climáticas locales.

<sup>6</sup>FAO Existen curvas de  $K_c$  por cultivo desarrolladas, principalmente, por la organización Food and Agriculture Organisation, de Naciones Unidas, universalmente utilizadas, plasmadas en dos publicaciones clave, FAO24, de 1977 y FAO56 de 1998.

Donde a su vez:

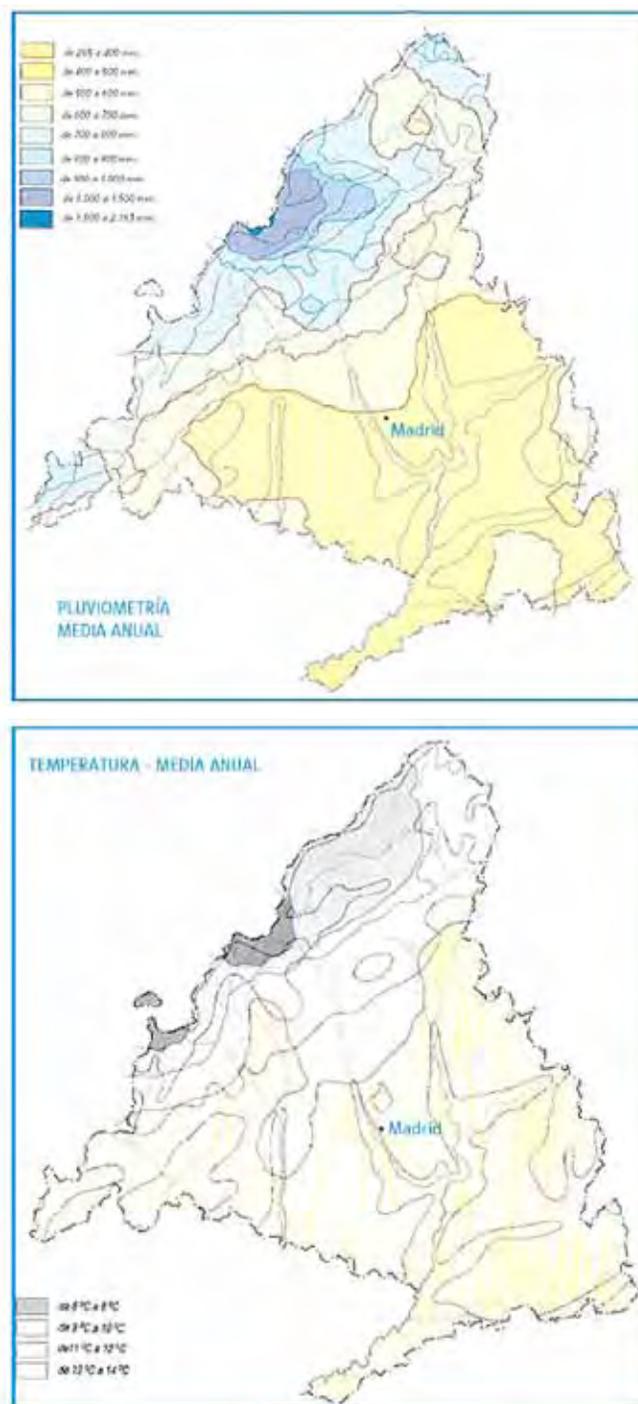
- $R_A$ : Radiación solar extraterrestre, expresada en su equivalente a agua en milímetros al día, tabulada en función de la latitud y del día del mes.
  - $T-t$ : Diferencia entre la media mensual de temperaturas máximas y la media mensual de temperaturas mínimas, en grados Celsius.
  - $t_m$ : temperatura media en grados Celsius.
- Kc: Coeficiente de cultivo. Se considera uniforme a lo largo del año y diferente para árbol o césped.
  - Eficiencia de riego: El aprovechamiento del agua en las plantas está condicionado por una serie de pérdidas debidas fundamentalmente a la evaporación, percolación profunda y escorrentía. La eficiencia con la que el agua de riego pasa a estar disponible a la planta depende fundamentalmente del tipo de riego considerado.

Los pasos realizados, en el proyecto, para la estimación la demanda de agua de la superficie verde son:

1. Establecer las zonas climáticas de la Comunidad de Madrid, sobre las que se estimará la evapotranspiración mensual media a lo largo del periodo de estudio. La delimitación de estas zonas se realiza de acuerdo a las directrices marcadas en un anterior proyecto, reseñado en el cuaderno de I+D+i nº 11: Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid, de Canal de Isabel II y utilizando como información de apoyo el MDT, el régimen pluviométrico y térmico. Así, las zonas resultantes son las detalladas a continuación y que ilustra la figura 67.
  - Zona de la sierra. Abarca la zona de la Sierra de Madrid, con temperaturas más frías, mayor humedad y mayor pluviometría
  - Zona de transición. Ocupada en su mayor parte por la ciudad de Madrid
  - Zona de la vega. Es la zona al sureste de la Comunidad de Madrid; abarca la cuenca hidrográfica del río Tajo. Es una zona algo más calurosa que la zona de transición.
2. Recopilar la información meteorológica de las estaciones distribuidas por la Comunidad de Madrid. La información requerida es la evapotranspiración y la precipitación mensual acumulada durante el periodo de estudio.

Canal de Isabel II dispone de estaciones meteorológicas en sus embalses, situados estos principalmente en la zona de la sierra. En la zona de transición tan solo se dispone de una estación, pero puede considerarse representativa de prácticamente la totalidad de esta zona. Por último, en la zona de la vega, Canal de Isabel II no dispone de datos, por lo que debe recabarse información de otros organismos.

Figura 67. Mapas de pluviosidad media anual (superior) y temperatura media anual (inferior)\*



\*Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1985.

Con el fin de tener información meteorológica representativa en las tres regiones definidas, para estimar la evapotranspiración  $ET_0$ , se han recopilado datos de 27 estaciones meteorológicas, aunque debido a su calidad se desestimaron alguna de ellas.

Las fuentes de información de datos meteorológicos recogidos, además de los procedentes de las 15 estaciones de Canal de Isabel II en la sierra de Madrid, han sido:

- Meteored, <http://www.meteored.com/>
- [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net)
- SIAR. Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla La Mancha, <http://crea.uclm.es/siar/>
- También se ha consultado la página oficial correspondiente de la Agencia Estatal de Meteorología "AEMET", <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos>, pero no proporciona ninguna información adicional respecto a la que se dispone

Se ha intentado trabajar con las mismas estaciones durante todo el periodo de estudio pero no ha resultado posible en las tres zonas climáticas.

3. Las estaciones de Canal de Isabel II, y el resto de estaciones consultadas no disponían de medida directa de la evapotranspiración, por tanto, se ha recopilado información referente a temperatura mensual (máxima, mínima y media), y precipitación, para el periodo de estudio. También ha sido necesario conocer las coordenadas geográficas referentes a la ubicación de cada estación. La radiación solar, necesaria para estimar la evapotranspiración se ha calculado en función de la latitud y del día del mes.

El aspecto de la zonificación y localización de las estaciones meteorológicas de trabajo se presentan sobre el relieve y sobre la ortoimagen de la Comunidad de Madrid, en la figura 68, que confirman la coherencia de la zonificación.

4. Cálculo de la  $ET_0$  para cada una de las estaciones, aplicando las fórmulas anteriormente descritas.
5. Estimación de la  $ET_0$  para cada zona climática. A partir de la  $ET_0$  puntual de las estaciones, se estima el mapa continuo de  $ET_0$  para la Comunidad de Madrid. Se consideró suficiente para los objetivos del estudio utilizar una metodología simplificada para la estimación del mapa de esta variable, que de forma estricta se hace por interpolación con técnicas de "Krigging"<sup>7</sup>. La simplificación propuesta, ha consistido en asociar para cada una de las zonas climáticas la  $ET_0$  mensual y la precipitación acumulada mensual, calculada como media de las estaciones de la zona.
6. Respecto a los otros parámetros que utiliza la fórmula:
  - $K_c$ : depende de las especies vegetales del jardín. Se considera uniforme a lo largo del año y diferente para árbol o césped. Para su estimación nos hemos basado en la bibliografía; en la experiencia de estudios anteriores; en la propuesta de M. Muncharaz Pou, <http://www.horticom.com/pd/imagenes/65/686/65686.pdf>; y en especial, del  $K_c$  proporcionado por el manual de la FAO.

---

<sup>7</sup> Krigging: Es un método geoestadístico (del francés krigeage) de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Calcula los pesos que se darán a cada punto de referencias usados en la valoración. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Fue desarrollada inicialmente por Daniel G. Krige a partir del análisis de regresión entre muestras, las cuales fijaron la base de la geoestadística lineal.



Para el caso de Madrid, el valor de  $K_c$  de césped según la FAO es de 0,85. Respecto a los árboles, se ha considerado que apenas se riegan, recibiendo del orden de unos pocos riegos de apoyo al año, por lo que se define un valor entre 0,1 a 0,2 en función del rango de NDVI.

$$K_c \text{ césped} = 0,85 \text{ y } K_c \text{ árbol} = 0,1 \text{ a } 0,2 \text{ en función del NDVI}$$

- Eficiencia de riego: que hace referencia al ratio entre el agua aprovechada respecto a la cantidad regada. Hay que tener en cuenta que los jardines se riegan todo el año, mientras que los árboles sólo ocasionalmente. Para el caso de la Comunidad de Madrid, se considera un riego por aspersión, y por tanto una eficiencia de riego del 0,75, utilizando como referencia el artículo anteriormente citado y la experiencia y documentación consultada en estudios anteriores.
7. Con todos los datos ya definidos se calcula la necesidad de riego para cada una de las zonas climáticas, mediante la aplicación de la fórmula anteriormente descrita.
  8. Por último se estima la demanda de agua anual, aplicando las necesidades de riego sobre las zonas verdes (césped y árbol). Recordemos que las zonas verdes se han definido a partir del NDVI y están a su vez categorizadas atendiendo a su vigor de actividad en 2 rangos, medio y alto.

Para el caso del césped se considera que la demanda potencial de una zona ajardinada es independiente del grado de vigor que tenga, especialmente teniendo en cuenta que un jardín requiere estar en condiciones óptimas, por tanto se asume que ambas categorías de NDVI presentan la misma demanda de agua, y ésta se estima aplicando un único  $K_c$  de 0,85 para el césped, independientemente del rango de NDVI. Por el contrario, a la zona arbolada se aplica el valor de 0,1 y 0,2 en función del rango del NDVI.

Para tener una visión más completa que incluya la distribución espacial de la demanda de agua anual de la Comunidad de Madrid en metros cúbicos, se sectoriza Madrid con una malla de una hectárea de superficie, estimándose para cada una de las celdas de la malla, la demanda de agua anual requerida según la superficie de césped, árbol medio, y árbol alto presente en las celdas.

Los resultados la delimitación de la superficie verde obtenidos del proceso sobre las coberturas SPOT5 de la Comunidad de Madrid se incluyen en el capítulo **9. Estimación de la demanda de agua verde.**





# 5

## Adquisición y proceso de imágenes

Previo al análisis de los resultados de actualización de la base de datos cartográfica, seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano y delimitación de la zona verde para cada periodo de estudio, se detallan los aspectos más relevantes de la adquisición de las imágenes de satélite, y de la ejecución de los correspondientes procesos básicos.

Para cada periodo de estudio, se realizó la programación de una cobertura SPOT5 para toda la Comunidad de Madrid que contempla la adquisición de imágenes en modo multispectral 10 metros, y pancromática 2,5 metros, que permite generar un producto combinado mediante fusión, idóneo para realización de seguimientos de cambios urbanísticos.

Con el fin de validar la metodología, se adquirió una imagen Quickbird sobre una zona piloto de 77 kilómetros cuadrados (64 kilómetros cuadrados para imagen de archivo), de fechas próximas a la cobertura SPOT5.

En los periodos correspondientes a verano 2008 y verano 2009 la zona piloto se localiza en Rivas Vaciamadrid, y en los periodos de primavera 2010 y verano 2010 la zona piloto se localiza en Móstoles. El producto adquirido para cada periodo de adquisición presenta las siguientes características:

- Producto Bundle, (pancromática a 0,6 metros y multispectral a 2,4 metros)
- Standard Ortho-ready
- 16 bits

A continuación se presenta para cada una de las coberturas adquiridas, un análisis referente a sus características, distribución de imágenes y fechas de adquisición.

### **Cobertura de verano 2008**

Para el periodo 2008, la cobertura SPOT5 se ha seleccionado del archivo de imágenes disponible en el buscador "Sirius on line" de SPOT Image. El conjunto de fechas de adquisición seleccionadas, que componen la cobertura, se extienden a lo largo de un periodo bastante amplio (del 18 de junio, al 6 de noviembre), que supera los 30 días que se habían establecido como objetivo, pero es la única cobertura posible para 2008. La figura 69 ilustra la distribución y cobertura de 2008.

La selección de la zona piloto para el periodo 2008, se realiza también mediante la búsqueda de imágenes Quickbird adquiridas en verano de 2008, a través del buscador o browser de Digitalglobe. Se seleccionó la zona de Rivas Vaciamadrid como la más adecuada por ser una zona con una actividad urbanística interesante y presentar las imágenes SPOT5 y Quickbird unas fechas razonablemente próximas (20 días diferencia).

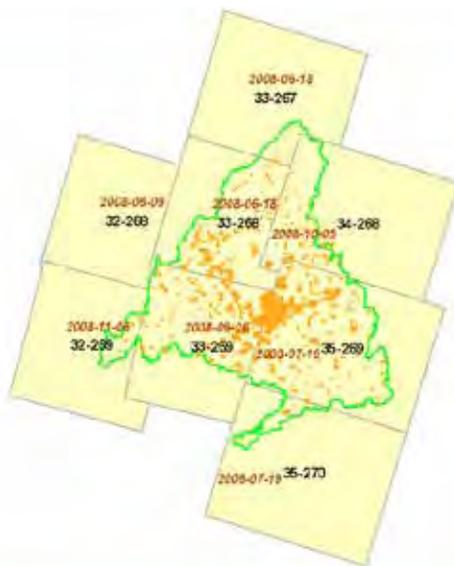
La figura 70 presenta la ubicación de la zona piloto, y el Quicklook de la imagen Quickbird, adquirida el 10 de agosto de 2008.

La imagen Quickbird cubre parcialmente los municipios de Madrid, Rivas Vaciamadrid, y algún otro en menor proporción.

En la tabla 11 se detalla la superficie que ocupa la escena Quickbird en cada uno de ellos.

Tabla 11. Relación de municipios y superficie interceptada por la escena Quickbird

Zona Piloto V2008-V2009	
Municipio	Superficie (ha)
Madrid	3.789
Rivas Vaciamadrid	2.474
Velilla de San Antonio	30
San Fernando de Henares	21
Mejorada del Campo	6
<b>Total</b>	<b>6.321</b>

Figura 69. Distribución de imágenes y fechas de adquisición.  
Cobertura de verano 2008, (cobertura PNT 2008)

Path/Row	Fecha
32/268	9-08-2008
32/269	6-11-2008
33/267	18-06-2008
33/268	18-06-2008
33/269	26-09-2008
34/268	5-10-2008
35/269	19-07-2008
35/270	19-07-2008
Escena Quickbird:18-08-2008	

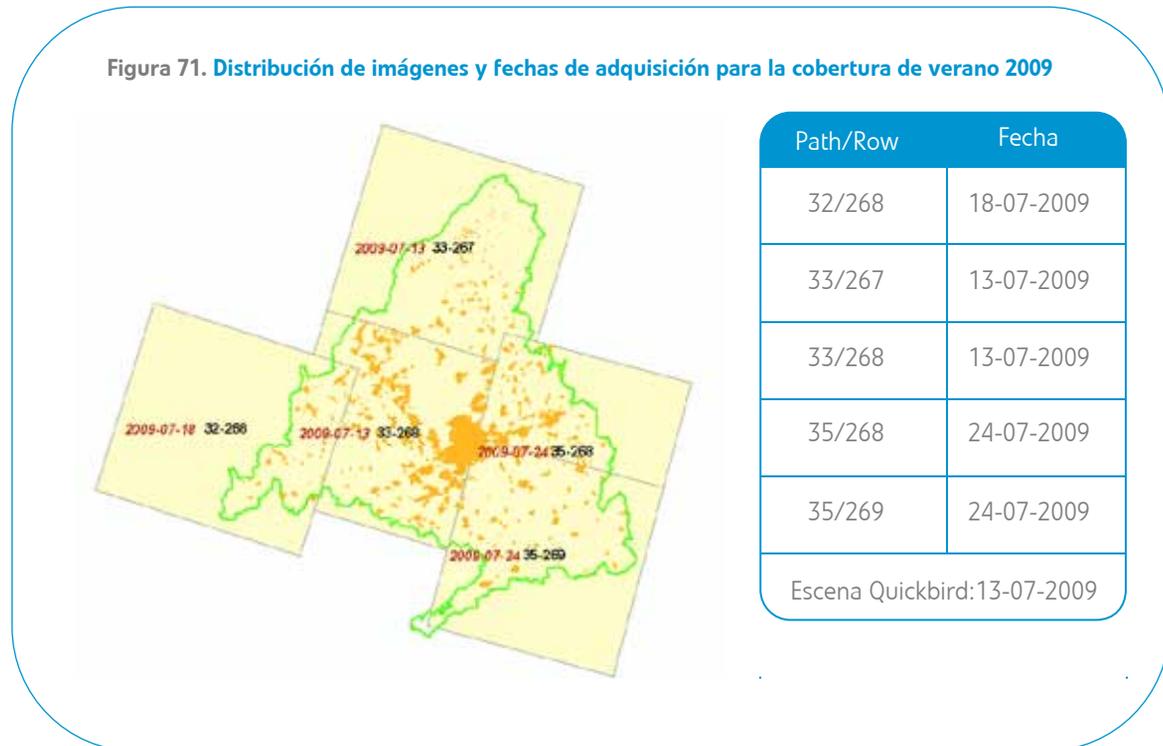
Figura 70. Ubicación de la zona piloto y Quicklook correspondiente a la escena Quickbird, Zona: Rivas Vaciamadrid, adquirida el 10 de agosto de 2008



### Cobertura de verano 2009

Se programó la adquisición de imágenes de verano de 2009, con una ventana de adquisición del 10 julio al 10 de septiembre de 2009.

La figura 71 detalla la distribución y fechas de la cobertura resultante.



El resultado de la programación ha sido muy bueno obteniéndose la adquisición completa sobre la Comunidad de Madrid para finales de julio.

Para Quickbird se abre una ventana de programación coincidente con la de SPOT5, adquiriéndose la imagen el 13 de julio de 2009, muy próxima a su correspondiente SPOT5. La figura 72 ilustra su Quicklook.

**Figura 72. Quicklook correspondiente a la escena Quickbird, zona de Rivas Vaciamadrid, adquirida el 13 de julio de 2009**



### **Cobertura de primavera 2010**

Se programó la adquisición de la cobertura SPOT5 con una ventana del 15 de marzo al 15 de mayo de 2010, acorde al estudio de factibilidad. La cobertura SPOT5 finalmente adquirida abarca el periodo temporal comprendido entre el 15 de marzo (escenas más al este) hasta el 21 de mayo (escenas centrales). Cabe señalar que la primavera siempre es un periodo muy inestable, y más complicado para adquirir imágenes en periodos cortos.

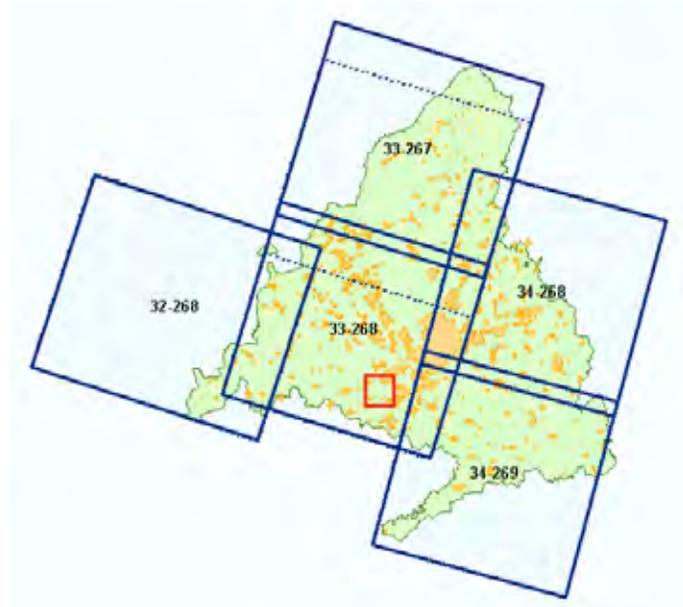
La figura 73 detalla la distribución y fechas de la cobertura SPOT5 resultante y la figura 74 el Quicklook correspondiente a la imagen Quickbird de 28 de marzo 2010 sobre Móstoles.

La escena Quickbird se adquiere mediante programación el 28 de marzo de 2010. Como se observa en el Quicklook, la escena presenta alguna nube y una neblina considerable, pero la nubosidad alta no se contabiliza como nubosidad por parte de ningún gestor satelital. Por ese motivo ha tenido que ser aceptada, ya que cumple los criterios de programación (nubosidad inferior al 20 por ciento).

La imagen Quickbird cubre parcialmente los municipios de Móstoles, Moraleja de Enmedio, Arroyomolinos y algún otro en menor proporción.

En la tabla 12 se detalla la superficie que ocupa la escena Quickbird en cada uno de ellos.

**Figura 73. Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de primavera 2010  
(escena Quickbird en rojo)**



Path/Row	Fecha
32/268	09-04-2010
33/267	21-05-2010
33/268	21-05-2010
35/268	15-03-2010
35/269	15-03-2010
Escena Quickbird 28-03-2010	

**Figura 74. Quicklook correspondiente a la escena Quickbird,  
adquirida sobre Móstoles el 28 de marzo de 2010**



**Tabla 12. Relación de municipios y superficie interceptada por la escena Quickbird, primavera 2010**

Zona Piloto 2010	
Municipio	Superficie (ha)
Móstoles	3.116
Moraleja de Enmedio	2.068
Arroyomolinos	1.887
Fuenlabrada	309
Humanes de Madrid	263
Alcorcón	58
Navalcarnero	5
<b>Total</b>	<b>7.707</b>

### Cobertura de verano 2010

La cobertura SPOT5 completa se adquiere en un intervalo de 16 días, con ángulos que varían desde “excelente” para la escena 32-268, hasta los casi 23 grados de la escena central, pasando el límite de lo recomendable. Sin embargo, es preferible tener esa gran variabilidad de ángulos en las escenas a tener un periodo temporal de adquisición amplio. La figura 75 detalla la distribución y fechas de la cobertura SPOT5.

**Figura 75. Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de verano 2010 (escena Quickbird en rojo)**



Path/Row	Fecha
32/268	23-08-2010
33/267	12-08-2010
33/268	12-08-2010
35/268	28-08-2010
35/269	28-08-2010
Escena Quickbird: 21-08-2010	

La escena Quickbird se adquiere el 21 de agosto de 2010. Es una imagen de buena calidad, captada con un ángulo respecto al nadir de 14 grados y en fecha muy próxima a la cobertura SPOT5. La figura 76 muestra el Quicklook correspondiente a la imagen Quickbird de agosto 2010 sobre Móstoles.

**Figura 76. Quicklook correspondiente a la escena Quickbird, adquirida sobre Móstoles el 21 de agosto de 2010**



Los procesos realizados en cada una de las actuaciones, tal y como se explica en la metodología, incluyen los pasos: 1) proceso básico de imágenes; 2) procesos específicos de seguimiento urbano y 3) procesos específicos de delimitación de la zona verde.

Dentro del proceso básico de imágenes se incluye la ortorrectificación de las imágenes que se ha realizado mediante triangulación en bloque, para todas las coberturas SPOT5 del proyecto. El número de puntos utilizados, para cada cobertura, han sido 97 de control, 87 de paso y 89 de chequeo.

En las zonas de solape entre escenas, se intenta que los puntos de control y de chequeo “enganchen” a las imágenes que interviene en el solape; así, de manera efectiva, un mismo punto puede ser de control o chequeo de varias escenas.

Los resultados de control de calidad de la ortorrectificación de las coberturas SPOT5, pueden considerarse muy buenos, con un error cuadrático medio (RMSE) del orden de 1 metro.



# 6

## Resultados del seguimiento urbano

Los resultados del proceso del seguimiento urbano obtenidos de cada cobertura se integran en su respectiva Geodatabase, actualizando de esta manera la base de datos cartográfica. El análisis conjunto de todas ellas permite realizar el seguimiento del grado de consolidación urbana en la Comunidad de Madrid.

En el presente apartado se revisan y comentan los resultados más significativos de todas las actualizaciones, y se proporcionan una serie de tablas que sintetizan los aspectos más relevantes del seguimiento urbano.

La primera fase de los procesos específicos de seguimiento urbano se centra en la actualización de la estratificación respecto a la realizada en el periodo anterior. En concreto, se presta especial interés a la localización de nuevos ámbitos urbanos que amplían y actualizan el estrato *suelo en proceso de consolidación*.

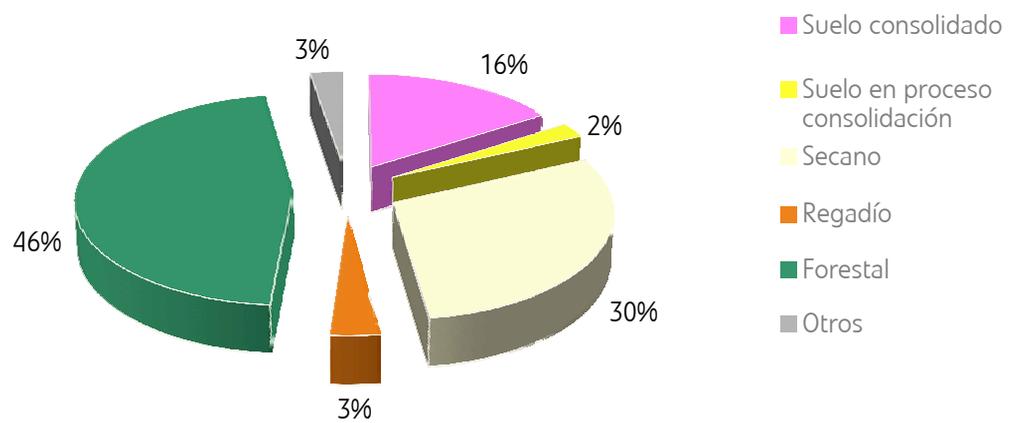
La tabla 13 detalla la distribución de la superficie ocupada por los distintos estratos que constituyen la Comunidad de Madrid, en cada uno de los periodos de estudio. Cabe resaltar que, los resultados de la actualización de la estratificación muestran que el suelo en proceso de consolidación aumenta progresivamente, pasando de 18.054 hectáreas en 2008, a 18.523 en 2009, a 19.152 hectáreas en la primavera de 2010, y a 19.347 en el verano de 2010. El incremento del **suelo en proceso de consolidación** es del orden del 2,5 al 3,3 por ciento en las actuaciones de 2009 y primavera de 2010, respectivamente; mientras que en el verano de 2010 este incremento supone el 1 por ciento.

**Tabla 13. Comparativa de superficies de los estratos de los años V2010, P2010, 2009 y 2008**

Estrato		Superficie (ha)			
	Código	V2010	P2010	2009	2008
Suelo consolidado	1	126.943	127.683	128.023	128.156
Suelo en proceso consolidación	2	19.347	19.152	18.523	18.054
Secano	3	237.542	237.620	237.908	238.144
Regadío	4	26.269	26.317	26.323	26.340
Forestal	5	372.999	371.477	371.478	371.164
Otros	6	19.505	20.357	20.351	20.747
<b>Total</b>		<b>802.605</b>	<b>802.606</b>	<b>802.606</b>	<b>802.605</b>

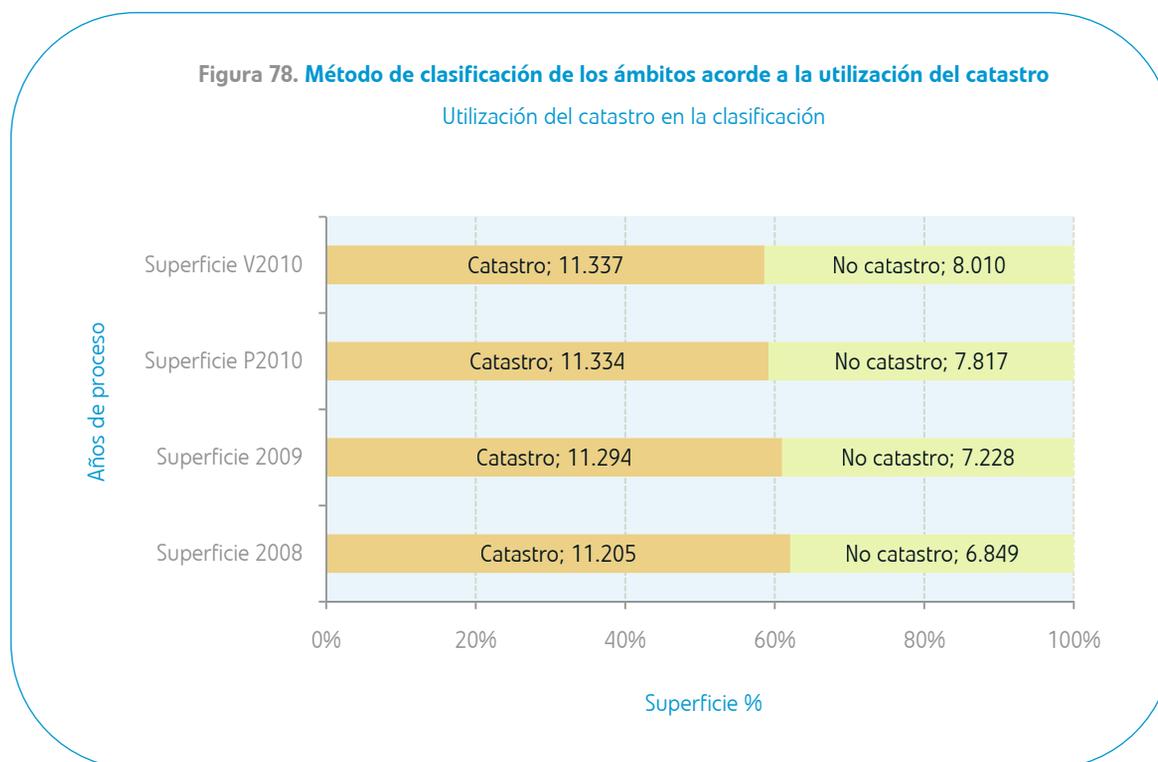
La figura 77 ilustra la distribución de la superficie de los distintos estratos de suelo de la Comunidad de Madrid con los resultados del año 2008.

**Figura 77. Distribución de la superficie de los estratos (resultados 2008)**



El estrato **suelo en proceso de consolidación**, es el más importante del proyecto y, por este motivo, la estratificación se realiza con mucho mayor detalle en este estrato durante todas las actualizaciones (V2010, P2010, 2009 y 2008). El estudio recogió, además de la relación de municipios con suelo en proceso de consolidación, aquellos municipios sin actividad.

En el capítulo 3. **Metodología**, se explica el papel tan importante que juega el catastro en la definición de la metodología de clasificación, que además de facilitar el proceso implica una mejora en los resultados. Por ese motivo, en la tabla adjunta se detallan los ámbitos que disponen de catastro y que por tanto su clasificación se ha visto apoyada con esta información auxiliar. En la actualización de 2008 se dispone de catastro para un 62 por ciento de la superficie, mientras que en verano de 2010 se dispone del 59 por ciento, ya que a medida que avanza el proyecto la nueva superficie que se incorpora al estrato **suelo en proceso de consolidación** es menos probable que disponga de un catastro adecuado. La figura 78 refleja los datos referidos.



**Tabla 14. Método de clasificación utilizado en función de la disponibilidad de catastro**

Método de clasificación de los ámbitos acorde a la utilización del catastro												
Método de clasificación	Ámbitos 2008			Ámbitos 2009			Ámbitos P2010			Ámbitos V2010		
	Nº	superficie	%	Nº	superficie	%	Nº	superficie	%	Nº	superficie	%
Catastro	306	11.205	62	320	11.294	61	337	11.334	59	338	11.337	59
Sin catastro	131	5.416	30	152	5.621	30	181	6.135	32	189	6.292	32
Trama	171	1.433	8	187	1.607	9	204	1.682	9	213	1.718	9
<b>Total</b>	<b>608</b>	<b>18.054</b>	<b>100</b>	<b>659</b>	<b>18.522</b>	<b>100</b>	<b>722</b>	<b>19.152</b>	<b>100</b>	<b>740</b>	<b>19.347</b>	<b>100</b>

Los resultados del seguimiento urbano para el proyecto en su conjunto se analizan desglosados en los siguientes puntos:

1. Resumen de resultados en el total de la Comunidad de Madrid
2. Resultados de la identificación de nuevos ámbitos
3. Seguimiento de ámbitos con cambios
4. Ámbitos sin cambios en la clasificación
5. Nuevos ámbitos parcialmente incluidos dentro del suelo consolidado
6. Ámbitos finalizados
7. Cruce de los resultados de 2010 con el planeamiento urbanístico
8. Mapas temáticos
9. Relación de cambios por municipio

## 6.1. Resumen de resultados en el total de la Comunidad de Madrid

El resumen de resultados globales en la Comunidad de Madrid, para todos los periodos de estudio del proyecto incluye:

- La superficie clasificada en las distintas actuaciones, y la diferencia de superficie edificada entre dos actuaciones consecutivas
- El seguimiento en el grado de consolidación
- Municipios y superficie incluida en el suelo en proceso de consolidación
- Municipios no incluidos dentro del suelo en proceso de consolidación

Las tablas 15 y 16 presentan la superficie total de los recintos clasificados en la Comunidad de Madrid obtenida en cada uno de los periodos de estudio.

**Tabla 15. Resultados de superficie clasificada en las distintas actuaciones (verano y primavera 2010)**

Superficie clasificada en la Comunidad de Madrid (V2010-P2010)						
	Verano 2010			Primavera 2010		
	Nº recintos	Superficie (ha)	%	Nº recintos	Superficie (ha)	%
Edificio	6.397	3.516,45	18,18	6.169	3.444,32	17,98
Suelo	12.313	10.633,74	54,96	12.427	10.518,38	54,92
Vial asfaltado	1.834	4.087,01	21,12	1.856	4.026,30	21,02
Vial no asfaltado	1.768	1.110,11	5,4	1.825	1.163,19	6,07
<b>Total</b>	<b>22.312</b>	<b>19.347,31</b>	<b>100</b>	<b>22.277</b>	<b>19.152,19</b>	<b>100</b>

**Tabla 16. Resultados de superficie clasificada en las distintas actuaciones (verano 2009 y verano 2008)**

Superficie clasificada en la Comunidad de Madrid (V2009-V2008)						
	Verano 2009			Verano 2008		
	Nº recintos	Superficie (ha)	%	Nº recintos	Superficie (ha)	%
Edificio	5.566	3.195,13	17,25	5.075	2.922,32	16,19
Suelo	12.236	10.300,86	55,61	12.042	10.393,98	57,57
Vial asfaltado	1.709	3.773,96	20,37	1.551	3.210,75	17,78
Vial no asfaltado	1.345	1.252,68	6,76	1.450	1.527,24	8,46
<b>Total</b>	<b>20.856</b>	<b>18.522,62</b>	<b>100</b>	<b>20.118</b>	<b>18.054,29</b>	<b>100</b>

Así, los cambios resultantes en la Comunidad de Madrid, entre dos periodos consecutivos, en superficie edificada, superficie de suelo y en superficie de viales asfaltados y no asfaltados, se presentan en la tabla 17.

**Tabla 17. Cambios de superficie clasificada en el total de la Comunidad de Madrid entre los distintos periodos de trabajo (V2010-P2010; P2010-V2009; V2009-V2008)**

Relación de cambios en superficie clasificada en la Comunidad de Madrid				
Tipo de recintos	V2010-P2010 Superficie (ha)	P2010-V2009 Superficie (ha)	V2010-V2009 Superficie (ha)	V2009-V2008 Superficie (ha)
Superficie edificada	72,13	249,19	321,32	272,81
Suelo	115,36	217,53	332,89	-93,13
Vial asfaltado	60,71	252,34	313,05	563,21
Vial no asfaltado	-53,09	-89,49	-142,57	-274,56

Hay que destacar que en el periodo comprendido entre el verano de 2008 y verano de 2009 es cuando se detecta el mayor aumento en superficie edificada (272,81 hectáreas); mientras que en el periodo comprendido entre primavera y verano de 2010 el aumento en superficie es mucho menor (72,13 hectáreas), en parte debido a que el periodo de tiempo entre ambas actualizaciones es mucho más corto.

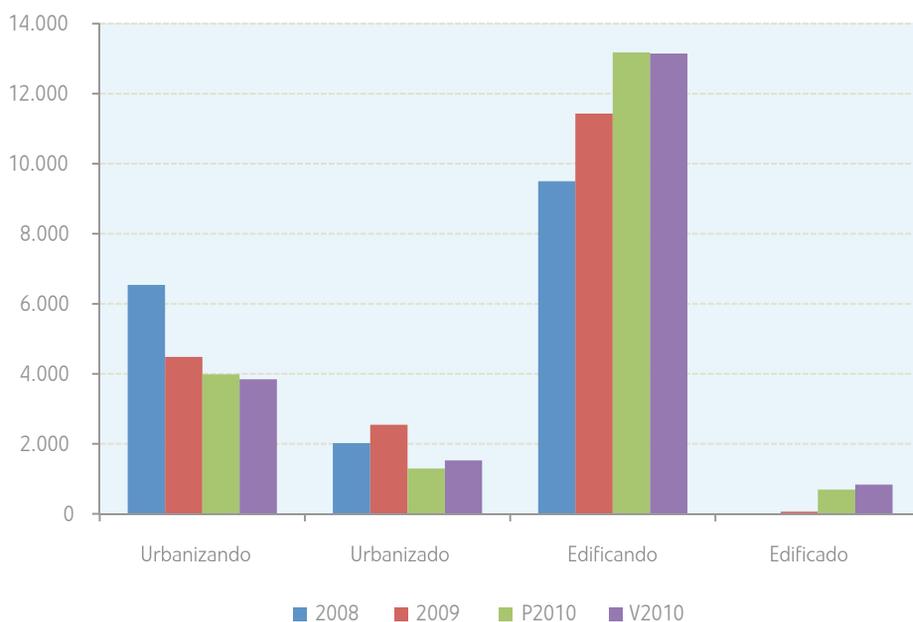
El grado de consolidación de los ámbitos hace referencia a los diferentes estados de ejecución de las obras en que se puede encontrar cada ámbito. Se contemplan distintas fases: en proceso de urbanización, urbanización finalizada, en proceso de edificación y edificación finalizada.

El resumen del grado de consolidación de los ámbitos que constituyen el **suelo en proceso de consolidación** para todos los periodos de estudio, se detallan en la tabla 18 y figura 79. De su lectura se deduce que la gran mayoría de los ámbitos se encuentran en el grado de consolidación "edificando". Además, a medida que se procesan más periodos aumenta la superficie de los ámbitos que alcanzan este grado de consolidación.

**Tabla 18. Resumen del grado de consolidación de los ámbitos (2008-2009-P2010-V2010)**

Relación de cambios en superficie clasificada en la Comunidad de Madrid								
	2008		2009		P2010		V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)						
Urbanizando	207	6.538	206	4.484	179	3.985	179	3.841
Urbanizado	64	2.015	67	2.544	40	1.294	42	1.524
Edificando	337	9.501	375	11.431	445	13.179	447	13.149
Edificado	-	-	11	63	58	693	72	833
<b>Total</b>	<b>608</b>	<b>18.054</b>	<b>659</b>	<b>18.522</b>	<b>722</b>	<b>19.152</b>	<b>740</b>	<b>19.347</b>

**Figura 79. Evolución del grado de consolidación (ha)**



En los siguientes puntos se analiza el seguimiento de los ámbitos que constituyen el suelo en proceso de consolidación en los distintos periodos de estudio. Para ello se hace una categorización según su comportamiento distinguiéndose nuevos ámbitos, ámbitos con cambios y ámbitos sin cambios en la clasificación. Estos tipos de ámbitos son excluyentes, es decir, no tienen superficie común entre ellos y la unión de todos ellos constituye el estrato suelo en proceso de consolidación. Por tanto, la suma de todos ellos coincide con la superficie total del estrato en proceso de consolidación.

Además, se han establecido otras dos categorías de ámbitos: nuevos ámbitos parcialmente incluidos dentro del suelo consolidado y ámbitos finalizados, que comparten superficie con la categorización de los ámbitos anteriores. La tabla 19 proporciona las superficies correspondientes a las distintas categorías.

**Tabla 19. Resumen del tipo de ámbitos en el suelo en proceso de consolidación durante los años del proyecto**

	V2008		V2009		P2010		V2010	
	Nº	Superficie (ha)						
Nuevos ámbitos	608	18.054	51	456	63	630	18	195
Ámbitos con cambios	-	-	194	11.665	241	10.602	122	6.609
Ámbitos sin cambios en la clasificación	-	-	414	6.401	418	7.920	600	12.543
<b>Total</b>	<b>608</b>	<b>18.054</b>	<b>659</b>	<b>18.523</b>	<b>722</b>	<b>19.152</b>	<b>740</b>	<b>19.347</b>
Ámbitos finalizados *	-	-	11	63	47	630	14	140
Ámbitos parcial o totalmente en suelo consolidado **	-	-	39	370	40	448	10	56

\* Ámbitos finalizados: considera los ámbitos finalizados en cada actualización (los datos no son acumulativos).

\*\* Ámbitos parcialmente incluidos dentro de suelo consolidados: sólo se contempla la superficie incluida en el estrato suelo consolidado

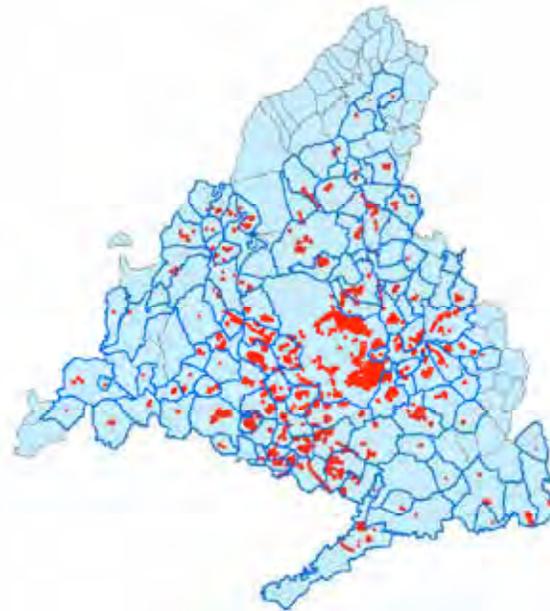
## 6.2. Resultados de la identificación de nuevos ámbitos

Según se explicó en el capítulo de metodología, en el proceso de estratificación se delimitan las zonas con comportamiento homogéneo, definiéndose los estratos de trabajo de la Comunidad de Madrid, y en concreto, el estrato *suelo en proceso de consolidación* constituido por los ámbitos de seguimiento urbano. En el primer periodo de proceso del proyecto, verano 2008, todos los ámbitos se procesan y consideran ámbitos nuevos. Esto hace que en verano de 2008 se procesen 608 ámbitos, que ocupan una superficie de 18.054 hectáreas. Los siguientes años de trabajo los procesos específicos de seguimiento urbano se centran en la actualización de la estratificación, respecto a la realizada en el proceso anterior. En concreto, se presta especial interés a la localización de nuevos ámbitos urbanos que amplían y actualizan el estrato suelo en proceso de consolidación. Los ámbitos nuevos identificados en el verano de 2009 son 51, ocupando una superficie de 456 hectáreas; en la primavera de 2010 se identifican 63 ámbitos y ocupan una superficie de 630 hectáreas y, en el verano de 2010 se identifican 18 ámbitos y ocupan una superficie de 195 hectáreas.

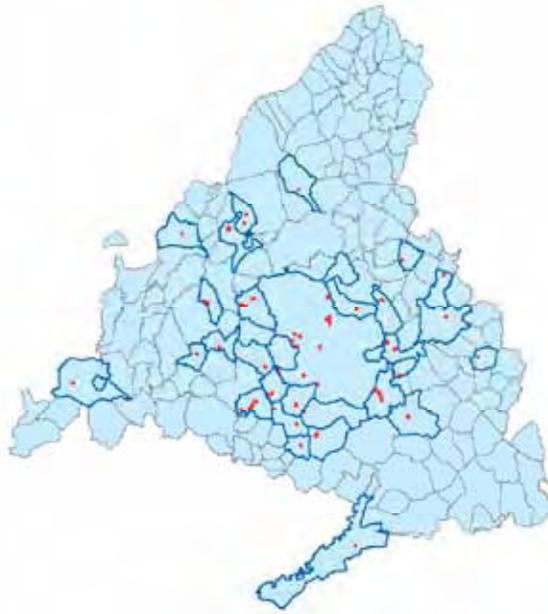
Como se ha indicado anteriormente, la ampliación del suelo en *proceso de consolidación* entre dos actualizaciones se traduce en la identificación de nuevos ámbitos y en algunas situaciones también ha supuesto un aumento de la superficie de ámbitos ya existentes. En concreto en la actualización del verano de 2009, el aumento del *suelo en proceso de consolidación* se ha materializado en la identificación de 51 nuevos ámbitos, y en el aumento de superficie en 4 ámbitos ya existentes. Se reflejan estos datos en las figuras 80 a 83 y las tablas 20 y 21, detalladas para cada periodo del proceso:

- La localización de los nuevos ámbitos
- Los recintos clasificados en los nuevos ámbitos: clase y superficie
- El grado de consolidación de los nuevos ámbitos y su superficie

**Figura 80. Localización de nuevos ámbitos en la actualización de verano 2008**



**Figura 81. Localización de nuevos ámbitos en la actualización de verano 2009**



**Figura 82. Localización de nuevos ámbitos en la actualización de primavera 2010**

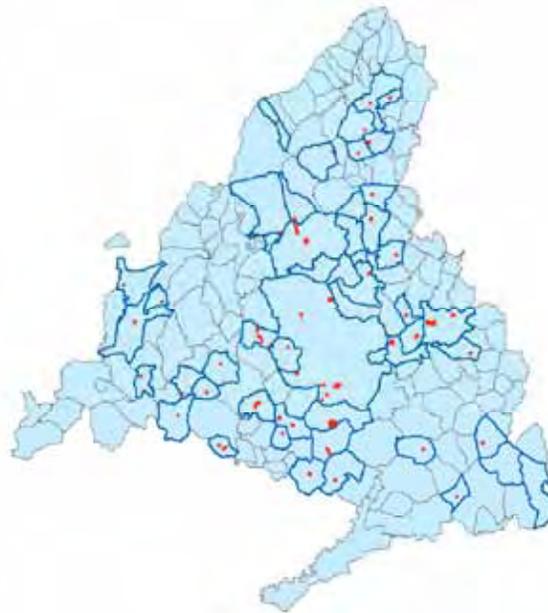


Figura 83. Localización de nuevos ámbitos en la actualización de verano 2010

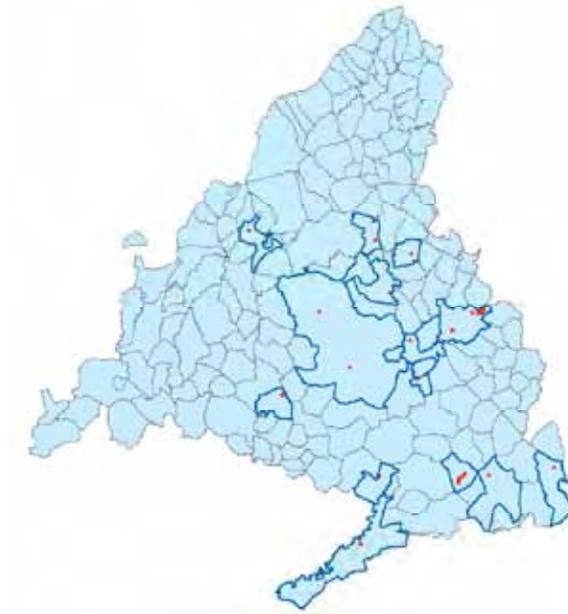


Tabla 20. Relación de recintos clasificados en los nuevos ámbitos identificados en cada actualización

	Relación de superficie clasificada en los nuevos ámbitos							
	2008		2009		P2010		V2010	
	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)
Edificio	16	2.922	5	23	5	29	4	9
Suelo	58	10.394	63	287	68	429	91	177
Vial asfaltado	18	3.211	4	17	3	21	0	1
Vial no asfaltado	8	1.527	28	129	24	151	5	9
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>18.054</b>	<b>100</b>	<b>456</b>	<b>100</b>	<b>630</b>	<b>100</b>	<b>195</b>

**Tabla 21. Relación de grados de consolidación de los nuevos ámbitos identificados en cada actualización**

Relación de grados de consolidación de nuevos ámbitos								
Grado de consolidación	V2008		V2009		P2010		V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)						
Urbanizando	207	6.538	34	340	35	441	12	85
Urbanizado	64	2.016	6	33	6	88	2	98
Edificando	337	9.501	11	83	22	101	4	12
<b>Total</b>	<b>608</b>	<b>18.054</b>	<b>51</b>	<b>456</b>	<b>63</b>	<b>630</b>	<b>18</b>	<b>195</b>

En líneas generales estos ámbitos se encuentran, como cabe esperar, en sus inicios, mayoritariamente en el grado de consolidación *urbanizando*, y *urbanizado*.

### 6.3. Resultados del seguimiento de ámbitos con cambios

En este apartado se analizan los ámbitos que presentan cambios entre dos actualizaciones consecutivas, (bien de grado de consolidación o de superficie clasificada) cuya identificación y clasificación, junto con la clasificación de los nuevos ámbitos, actualiza la base de datos cartográfica. En concreto se han identificado 194 ámbitos con un superficie de 11.665 hectáreas entre el verano de 2008 y el verano de 2009; 241 con una superficie de 10.602 hectáreas entre el verano de 2009 y la primavera de 2010; y 122 con una superficie de 6.609 hectáreas entre la primavera de 2010 y el verano de 2010.

En las tablas 22 y 23 se detallan, para cada periodo de proceso:

- La localización de los ámbitos con cambios
- Los recintos clasificados: clase y superficie
- El grado de consolidación, su superficie

**Tabla 22. Relación de recintos clasificados en los ámbitos con cambios de clasificación**

	V2008		V2009		P2010		V2010	
	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)
Edificio	-	-	17	1.995	20	2.083	21	1.407
Suelo	-	-	55	6.409	51	5.399	54	3.552
Vial asfaltado	-	-	24	2.743	26	2.721	22	1.484
Vial no asfaltado	-	-	4	519	3	399	3	167
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100</b>	<b>11.665</b>	<b>100</b>	<b>10.602</b>	<b>100</b>	<b>6.609</b>

**Tabla 23. Relación de cambios en los recintos clasificados en los ámbitos con cambios**

Ámbitos con cambios. (Relación de recintos de cambio)									
	V2008-V2009			V2009-P2010			P2010-V2010		
	Nº recintos	Superficie (ha)	%	Nº recintos	Superficie (ha)	%	Nº recintos	Superficie (ha)	%
Suelo-edificio	1.453	256,72	20	622	221,58	41	256	62,79	39
Suelo-Vial asfaltado	1.316	99,83	8	231	17,16	3	216	11,05	7
Suelo-Vial no asfaltado	944	183,59	15	219	11,32	2	245	12,31	8
Vial no asfaltado-Vial asfaltado	542	534,68	42	108	242,11	45	104	49,74	31
Otros	5.292	183,94	15	578	48,20	9	384	25,45	16
<b>Total</b>	<b>9.547</b>	<b>1.258,77</b>	<b>100</b>	<b>1.758</b>	<b>540,36</b>	<b>100</b>	<b>1.205</b>	<b>161,33</b>	<b>100</b>

El grado de consolidación de los ámbitos con cambios se presenta en la siguiente tabla, en la que se aprecia que la mayoría se encuentra en estado *edificando*.

**Tabla 24. Relación de los grados de consolidación de los ámbitos con cambios**

Relación de grados de consolidación de los ámbitos con cambios								
Grado de consolidación	V2008		V2009		P2010		V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)						
Urbanizando	-	-	21	1.525	17	620	15	888
Urbanizado	-	-	27	1.847	11	162	7	240
Edificando	-	-	135	8.229	165	9.188	86	5.341
Edificado	-	-	11	63	48	632	14	140
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>194</b>	<b>11.665</b>	<b>241</b>	<b>10.602</b>	<b>122</b>	<b>6.609</b>

#### 6.4. Ámbitos sin cambios

A lo largo del proyecto se han detectado ámbitos que no han sufrido cambios en la clasificación entre dos actualizaciones consecutivas. En concreto, se identifican 414 ámbitos con un superficie de 6.401 hectáreas entre el verano de 2008 y el verano de 2009; 418 ámbitos con un superficie de 7.920 hectáreas entre el verano de 2009 y la primavera de 2010; y 600 ámbitos con un superficie de 12.543 hectáreas entre la primavera de 2010 y el verano de 2010.

Las tablas 25 y 26 detallan los datos para cada periodo comprendido entre dos actualizaciones consecutivas de:

- Los recintos sin cambios clasificados, clase y superficie y
- El grado de consolidación y superficie de los ámbitos sin cambios en la clasificación

**Tabla 25. Relación de recintos clasificados en los ámbitos sin cambios entre dos actuaciones**

Relación de superficie clasificada en los ámbitos sin cambios						
	V2008-V2009		V2009-P2010		P2010-V2010	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Edificio	1.178	19	1.333	17	2.101	17
Suelo	3.605	56	4.690	59	6.905	55
Vial asfaltado	1.014	16	1.285	16	2.603	21
Vial no asfaltado	604	9	613	8	934	7
<b>Total</b>	<b>6.401</b>	<b>100</b>	<b>7.920</b>	<b>100</b>	<b>12.543</b>	<b>100</b>

**Tabla 26. Relación de los grados de consolidación de los ámbitos sin cambios en la clasificación**

Grado de consolidación	V2008-V2009		V2009-P2010		P2010-V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)
Urbanizando	151	2.619	127	2.924	152	2.868
Urbanizado	34	664	23	1.045	33	1.186
Edificando	229	3.119	258	3.890	357	7.796
Edificado	-	-	10	62	58	693
<b>Total</b>	<b>414</b>	<b>6.401</b>	<b>418</b>	<b>7.921</b>	<b>600</b>	<b>12.543</b>

## 6.5. Ámbitos parcialmente incluidos dentro del suelo consolidado

También se han revelado cambios que se ubican en zonas definidas en la actuación anterior como *suelo consolidado* y que pasan, debido a la detección de actividad, a *suelo en proceso de consolidación* en la siguiente actualización. Generalmente, se corresponde con demoliciones u obras dentro del entramado urbano.

A lo largo del proyecto, se han detectado:

- En 2009, 39 ámbitos de estas características, localizados en 22 municipios, que tienen 370 hectáreas en el estrato *suelo consolidado* de la actuación anterior.
- En primavera 2010, 40 ámbitos de estas características, localizados en 24 municipios, que tienen 448 hectáreas en el estrato *suelo consolidado* de la actuación anterior.
- En verano 2010, 10 ámbitos de estas características, localizados en 9 municipios, que tienen 56 hectáreas en el estrato *suelo consolidado* de la actuación anterior.

En la tabla 27 y 28 se presentan la superficie clasificada en estos ámbitos y el grado de consolidación de los mismos (hay que tener presente que en las tablas sólo se refleja la superficie del ámbito que queda incluida dentro de suelo consolidado de la actuación anterior).

**Tabla 27. Relación de recintos clasificados en los ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado de la actualización anterior**

Relación de superficie clasificada en los ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado						
	V2009		P2010		V2010	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Edificio	20	5	27	6	2	3
Suelo	217	59	304	68	53	94
Vial asfaltado	16	4	19	4	0	0
Vial no asfaltado	117	32	98	22	2	3
<b>Total</b>	<b>370</b>	<b>100</b>	<b>448</b>	<b>100</b>	<b>56</b>	<b>100</b>

**Tabla 28. Relación de los grados de consolidación de los ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado de la actualización anterior**

Grado de consolidación	V2008-V2009		V2009-P2010		P2010-V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)
Urbanizando	25	264	16	265	8	53
Urbanizado	6	31	5	88	1	2
Edificando	8	75	19	95	1	2
<b>Total</b>	<b>39</b>	<b>370</b>	<b>40</b>	<b>448</b>	<b>10</b>	<b>56</b>

## 6.6. Ámbitos finalizados

Los ámbitos finalizados son aquellos que alcanzan el grado de consolidación "Edificado". Estos ámbitos se han ido finalizando en alguna de las actuaciones correspondientes a 2008, 2009, primavera de 2010 o verano 2010 pero, una vez finalizados, siguen perteneciendo al suelo en proceso de consolidación, ya que puede haber cierta incertidumbre en cuanto a su ejecución definitiva.

En la tabla 29 se muestran la relación de ámbitos finalizados en cada una de las actualizaciones, se debe tener en cuenta que la información contenida en la tabla no refleja datos acumulados.

**Tabla 29. Relación de superficie de ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado de la actualización anterior**

Ámbitos finalizados	V2008-V2009		V2009-P2010		P2010-V2010	
	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)	Nº ámbitos	Superficie (ha)
	11	63,03	47	630,23	14	139,61

## 6.7. Cruce de los resultados del seguimiento urbano con el planeamiento urbanístico

Los resultados integrados en la base de datos cartográfica, permiten realizar un seguimiento del grado de ejecución de cada uno de los ámbitos contenidos en los planeamientos urbanísticos de los municipios. Este seguimiento, se realiza mediante el cruce de los resultados obtenidos de cada actualización contra el planeamiento vigente, en su versión más actual, y en sus diferentes categorías:

- 1) Suelo urbano consolidado y ámbitos desarrollados
- 2) Ámbitos no desarrollados con informe de viabilidad, y
- 3) Ámbitos no desarrollados sin informe de viabilidad

El resultado, para cada actualización contiene, para cada sector de planeamiento, un registro con la información correspondiente a la superficie clasificada de *edificio, suelo, vial asfaltado y vial no asfaltado*.

Como información adicional se tiene la relación de todos los sectores de planeamiento que hasta el momento de cada actualización no han registrado actividad.

También se ha detectado la existencia de recintos urbanos clasificados en zonas de *Planeamiento en revisión* e, incluso, en zonas fuera del planeamiento, donde no se esperaba que existieran.

## 6.8. Mapas temáticos

Los resultados del seguimiento de la consolidación urbana para las distintas actualizaciones, junto con la información referente a los cambios producidos entre fechas consecutivas, se integran en un mapa temático que combina la información numérica y cartográfica obtenida en la ejecución del proyecto. El resultado es un mapa temático por municipio y uno global de la Comunidad de Madrid. Esto permite analizar el seguimiento urbano a lo largo de todo el periodo procesado, desde 2008 a 2010.

La figura 84 muestra el mapa temático correspondiente al municipio de Getafe.

Los mapas temáticos de cada municipio contienen:

- **Información cartográfica**, que incluye la delimitación de los municipios y la tematización del grado de consolidación de los ámbitos que constituyen el estrato "suelo en proceso de consolidación", y los cambios detectados entre dos fechas.

Como fondo se utiliza la ortoimagen SPOT5 de verano de 2010 (combinación de bandas NIR, Rojo, Verde). El municipio en curso se resalta enmascarando la imagen con una semitransparencia.

- **Información alfanumérica**, que con los datos generales del municipio y resultados resumen de la clasificación en las distintas fechas, detallando el número total de recintos de cada clase (edificio, suelo, vial asfaltado, vial no asfaltado), su superficie en hectáreas y el porcentaje que representa sobre el total clasificado de ese municipio.





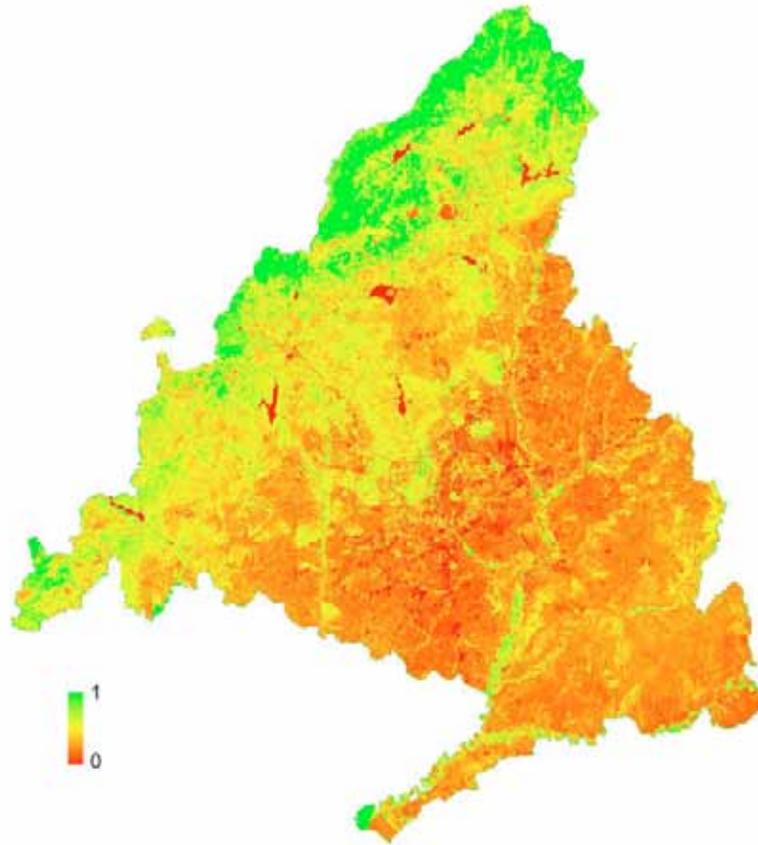
# 7

Resultados de la estimación de la superficie verde

En este apartado se presentan los resultados de la estimación de la superficie verde obtenida para cada uno de los periodos estudiados. Esta estimación se realiza a partir del mapa del NDVI del mosaico SPOT5, definiéndose para cada estrato los umbrales respectivos para establecer el rango de actividad de la vegetación.

Posteriormente, sobre la superficie verde de los estratos urbanos, *suelo consolidado* y *suelo en proceso de consolidación*, se ha realizado una segmentación con el fin de clasificar los recintos de árbol y de césped.

Figura 85. Mapa NDVI de verano 2010 de la Comunidad de Madrid



Los umbrales de actividad vegetativa a partir de cada cobertura de SPOT5 delimitan el valor numérico del NDVI de la imagen, a partir del cual, se considera que ese píxel es vegetación. Este umbral se estima para cada estrato, teniendo en cuenta sus características específicas (histogramas de valores de NDVI e inspección visual).

Para cada estrato se han determinado los siguientes rangos:

- Para el sustrato verde que inunda el suelo consolidado y el suelo en proceso de consolidación: no vegetación, NDVI medio y NDVI alto
- Para el estrato agrícola seco y agrícola regadío: no cultivo y cultivo en pie
- Para el estrato forestal: no vegetación, NDVI medio y NDVI alto

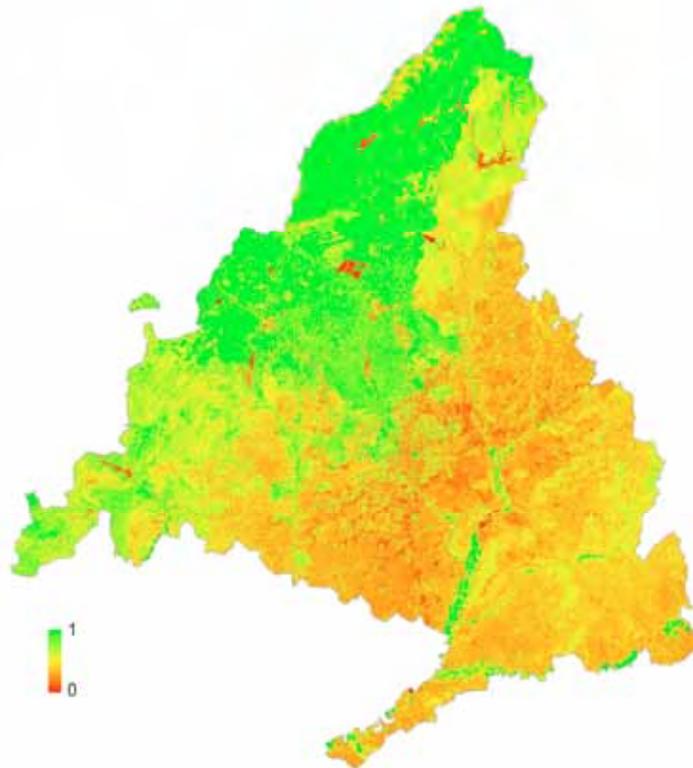
El resultado de este proceso es un raster codificado que recoge para cada estrato su rango de actividad.

### Análisis estrato verde, verano 2008

En el mosaico del NDVI de la cobertura 2008, se observa un grado de actividad vegetativa muy superior en la zona noroeste de la Comunidad de Madrid, respecto al resto de ámbito territorial, y que responde a la actividad vegetativa presente en esa zona, a fecha 18 de junio de 2008.

Cabe destacar que las escenas de la cobertura SPOT5 de 2008, son de fechas muy diferentes y abarcan un periodo muy amplio (del 18 de junio al 16 de noviembre). El mosaico de NDVI es coherente con las imágenes y fechas que componen la cobertura SPOT5, y para su interpretación es imprescindible tener en cuenta que la distribución no homogénea del grado de vigor presente en el mapa de NDVI, responde a que la imagen sea de final de primavera, de verano o de principios de otoño. Este hecho ha supuesto un problema a la hora de definir un único umbral para toda la cobertura y puede ser la causa de alguna inconsistencia detectada. Además, afecta de forma muy considerable a la fiabilidad de los resultados de la estimación de la superficie verde para 2008 y su posterior clasificación en árbol y césped. Por este motivo, en 2008, no se ha realizado la estimación de la demanda de agua correspondiente a la zona verde.

Figura 86. NDVI mosaico 2008 de la Comunidad Madrid



### Análisis estrato verde: verano 2009

El periodo de adquisición de la cobertura de imágenes SPOT5 de 2009 cubre un periodo de 11 días, comprendido entre el 13 y el 24 de agosto de 2009, por lo que el mosaico de NDVI refleja el grado de actividad correspondiente a esta época del año para toda la cobertura. Así, los resultados son coherentes, no presentando los problemas encontrados en la cobertura 2008.

Los umbrales del rango de actividad del NDVI para verano 2009 son los reflejados en la tabla 30.

**Tabla 30. Umbrales del rango de actividad vegetativa, a partir del NDVI, de la superficie verde en los diferentes estratos, para la cobertura SPOT5 de 2009**

Superficie verde	No vegetación	Vegetación	
		NDVI Medio	NDVI Alto
Subestrato verde	$NDVI \leq 0,26$	$0,26 < NDVI \leq 0,63$	$NDVI > 0,63$
Forestal	$NDVI \leq 0,33$	$0,34 < NDVI \leq 0,54$	$NDVI > 0,54$
	No cultivo	Cultivo en pie	
Agrícola seco	$NDVI \leq 0,30$	$NDVI > 0,31$	
Agrícola regadío	$NDVI \leq 0,32$	$NDVI > 0,33$	

### Análisis estrato verde: primavera 2010

En primavera suele ser complicado adquirir coberturas completas en cortos periodos de tiempo (en torno al mes), principalmente debido a las condiciones meteorológicas (época más inestable) que reduce el éxito en las adquisiciones y aumenta entonces la competencia con otras programaciones. Así, la cobertura resultante de la programación SPOT5 de primavera 2010 cubre un periodo superior a 2 meses, que abarca las fechas comprendidas entre el 15 de marzo (escenas más al este), hasta el 21 de mayo (escenas centrales).

En la tabla 31 se presentan los umbrales del rango de actividad del NDVI para la primavera 2010.

**Tabla 31. Umbrales del rango de actividad vegetativa, a partir del NDVI, de la superficie verde en los diferentes estratos, para la cobertura SPOT5 de primavera 2010**

Umbrales NDVI primavera 2010			
Superficie verde	No vegetación	Vegetación	
		NDVI Medio	NDVI Alto
Subestrato verde	$NDVI \leq 0,30$	$0,30 < NDVI \leq 0,60$	$NDVI > 0,61$
	$NDVI \leq 0,37$	$0,37 < NDVI \leq 0,63$	$NDVI > 0,63$
	$NDVI \leq 0,38$	$0,38 < NDVI \leq 0,69$	$NDVI > 0,69$
Forestal	$NDVI \leq 0,34$	$0,34 < NDVI \leq 0,60$	$NDVI > 0,60$
	No cultivo	Cultivo en pie	
Agrícola seco	$NDVI \leq 0,32$	$NDVI > 0,32$	
Agrícola regadío	$NDVI \leq 0,26$	$NDVI > 0,26$	

La estimación del *subestrato verde* no ha sido posible realizarla mediante la definición de un mismo umbral para todas las escenas, ya que este no permitía acotar la superficie verde para todo el conjunto, por la diferente actividad vegetativa asociada a las diferentes fechas de adquisición. Por tanto, para este estrato y debido a la diversidad de fechas de adquisición, ha sido necesario establecer los umbrales del NDVI, individualmente para cada fecha de adquisición, acorde al respectivo grado de actividad que presenta la vegetación en cada una de las escenas.

Es esperable que el resultado de la estimación de la superficie verde a partir de una cobertura de primavera, sea superior a la del periodo anterior, estimada sobre una cobertura de verano. El NDVI permite discriminar la superficie verde basándose en el grado de vigor vegetativo. En primavera, el aporte de agua que recibe la zona verde estimada proviene, en gran parte, de la lluvia, además del aporte correspondiente por riego que reciben específicamente las zonas denominadas ajardinadas. Por esta razón, la superficie verde resultante es mayor y además, hay que tener en cuenta que la zona verde estimada no corresponde con la superficie regada.

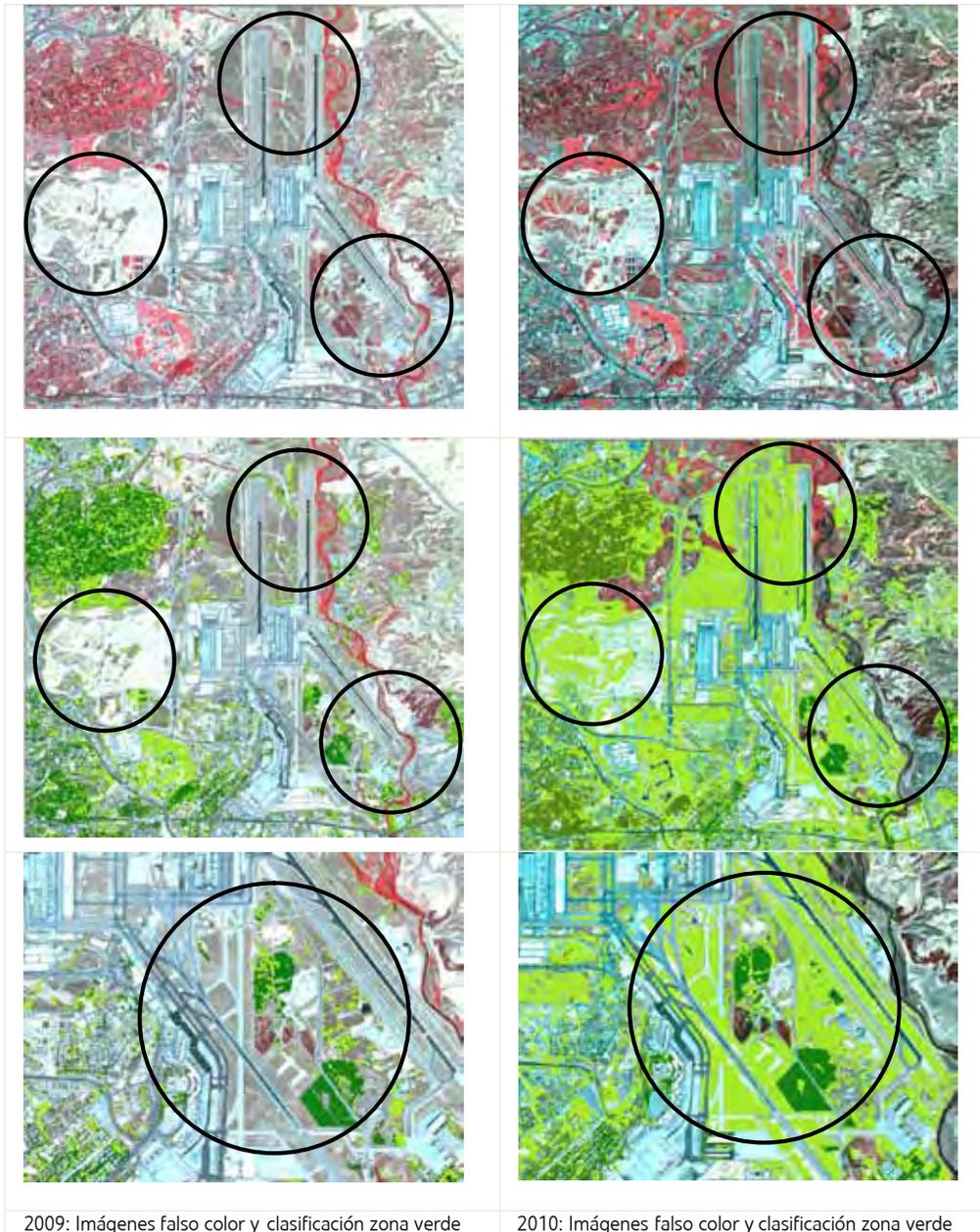
Analizando los datos numéricos de superficies, una vez realizada la segmentación de árbol y césped (ver apartado **7.2 Resultados del subestrato verde**), se observa que la superficie del árbol para ambos años presenta valores similares, mientras que la superficie de césped aumenta. Hay que matizar que en el proceso de segmentación, el árbol se estima a partir de su estructura definida por la textura, mientras que el césped se clasifica solo en función de la espectralidad. Se puede considerar en general que, para el árbol, el aporte principal de agua proviene de la lluvia y que, por tanto, la superficie de árbol estimada a partir del umbral de NDVI y clasificada a partir de la información textural, no se ve tan influenciada por la época del año. Puede tener más o menos actividad pero la superficie estimada no es mayor. Sin embargo, en primavera existe mucha más zona verde de tipo césped que la que realmente se riega. De hecho, es habitual que las superficies naturales urbanas abandonadas, que recibe un aporte considerable de lluvia a lo largo de la primavera, lleguen a alcanzar un vigor vegetativo alto contabilizándose como zona verde. Este es el argumento por el que en la identificación de zonas verdes urbanas regadas se trabaja principalmente con imágenes de satélite de verano, ya que se puede considerar que las zonas verdes que llegan al verano con una actividad vegetativa considerable han tenido un aporte extra de agua y por tanto son zonas regadas.

En las siguientes ilustraciones, al comparar las imágenes en falso color de 2009 y 2010, se observa a simple vista, cómo en esta última, la zona verde presenta una actividad vegetativa muy superior. La combinación en falso color (NIR, Rojo, Verde) utilizada, muestra en rojo la vegetación, resultando un tono rojo más intenso, cuanto más alta sea su actividad. Analizando en mayor detalle la zona del aeropuerto de Barajas, se aprecia que el resultado de la clasificación de la zona verde de primavera de 2010 incluye los campos del complejo aeroportuario como zona verde, dentro del estrato urbano, ya que tienen una actividad vegetativa alta, como respuesta a la lluvia recibida. Sin embargo, la clasificación de 2009 integra solo las zonas regadas y estos campos del aeropuerto quedan excluidos de la clasificación. Este mismo análisis se puede extender a otras zonas, como las resaltadas en la figura 87 con círculos negros.

Por otro lado, se observa un descenso de un 7 por ciento en la superficie de *árbol* clasificada en primavera de 2010, con respecto a verano de 2009. Esto en parte es debido a que la tercera parte de los estratos urbanos sobre los que se calculan las superficies de *árbol* y césped se localizan este año sobre la imagen de marzo (zona este de la Comunidad de Madrid). Al ser esta imagen muy temprana, las copas de los árboles no son tan frondosas como lo eran en el verano de 2009, apreciándose incluso en algunas zonas una ausencia de hojas. Esto implica un descenso en la superficie de *árbol* clasificado.

En la figura 88 se muestra una zona de Aranjuez en la que se aprecia claramente cómo en la imagen de verano de 2009 las copas de los árboles cubren una mayor superficie respecto de la imagen de primavera de 2010.

**Figura 87. Detalle de imágenes en falso color (IR, rojo, verde) de 2009 (izda.) y 2010 (dcha.) con sus correspondientes clasificaciones de zona verde. Zoom de detalle de la clasificación en la zona sur del aeropuerto**



**Figura 88. Detalle de imágenes en falso color (IR, rojo, verde) de julio de 2009 (arriba) y marzo de 2010 (abajo) en la zona de Aranjuez. Se aprecia el diferente estado de vigor de los árboles en diferentes épocas del año**



#### **Análisis estrato verde: verano 2010**

La cobertura SPOT5 completa se adquiere en un intervalo de 16 días, del 12 al 28 de agosto de 2010.

Los umbrales del rango de actividad del NDVI de la superficie verde urbana, del estrato forestal y de la presencia de cultivo en los estratos agrícolas de secano y regadío, para la cobertura SPOT5 de verano 2010, se detallan en la tabla 32.

**Tabla 32. Umbrales del rango de actividad vegetativa, a partir del NDVI, de la superficie verde en los diferentes estratos, para la cobertura SPOT5 de verano 2010**

Umbrales NDVI verano 2010			
Superficie verde	No vegetación	Vegetación	
		NDVI Medio	NDVI Alto
Substrato verde			
Árbol	NDVI ≤ 0,34	0,34 < NDVI ≤ 0,62	NDVI > 0,62
Césped	NDVI ≤ 0,38	0,38 < NDVI ≤ 0,62	NDVI > 0,62
Forestal	NDVI ≤ 0,35	0,35 < NDVI ≤ 0,60	NDVI > 0,60
	No cultivo	Cultivo en pie	
Agrícola seco	NDVI ≤ 0,35	NDVI > 0,35	
Agrícola regadío	NDVI ≤ 0,32	NDVI > 0,32	

El establecimiento de diferentes umbrales de NDVI para árbol y césped se corresponde con el ajuste de la metodología para solventar la sobreestimación de la superficie verde, tal y como se comenta en el apartado metodológico (4.4.3).

## 7.1. Resultados de los estratos forestal, seco y regadío

La superficie verde obtenida para cada uno de los estratos *forestal*, *seco* y *regadío* y para cada rango de actividad vegetativa (formato raster) se cruza con la información de municipios obteniendo la superficie verde en hectáreas por municipio, desglosada para cada uno de estos estratos en sus respectivos rangos de actividad.

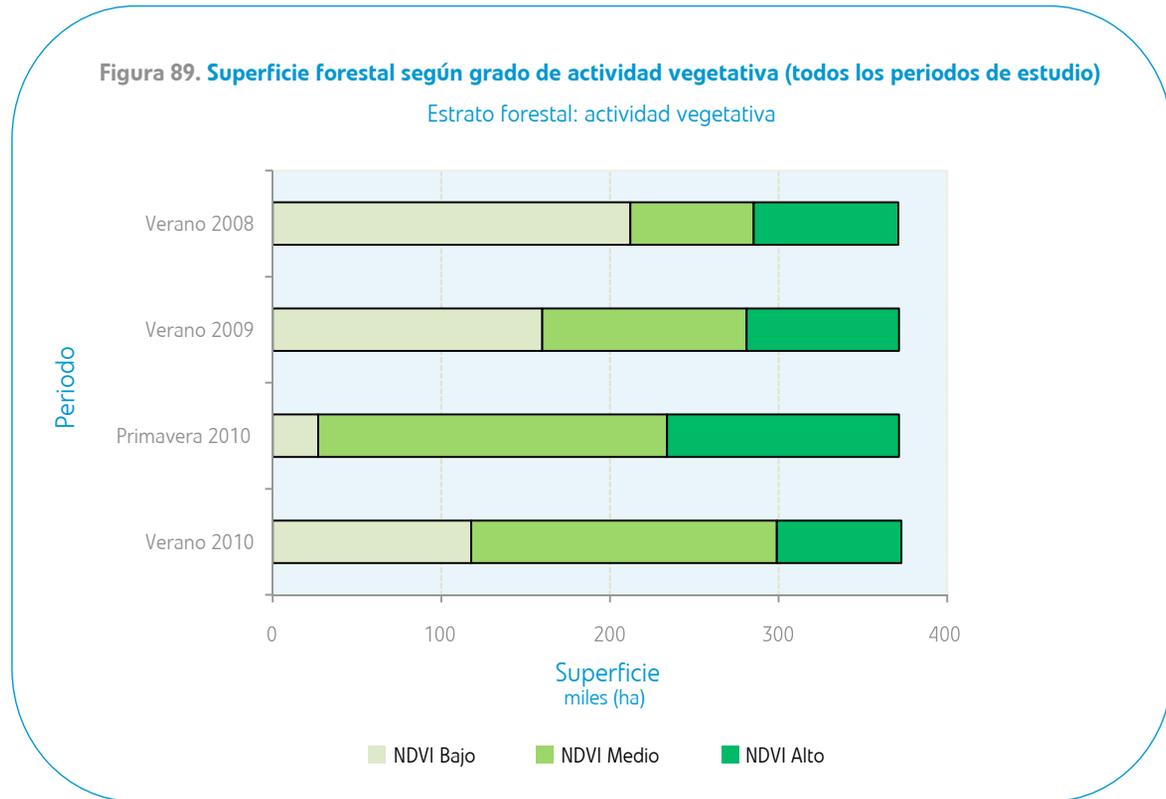
Los resultados totales de la superficie verde, para la Comunidad de Madrid, desglosados para todos los periodos de estudio según su grado de actividad, se presentan en formato numérico en las tablas 33 y 34; y en formato gráfico en las figuras 89, 90 y 91.

### Estrato forestal

**Tabla 33. Superficie forestal según su grado de actividad vegetativa para todos los periodos de estudio**

Estrato forestal				
Periodos	NDVI Bajo	NDVI Medio	NDVI Alto	Total
Verano 2010	117.771	181.211	73.891	<b>372.874</b>
Primavera 2010	26.989	206.809	137.560	<b>371.359</b>
Verano 2009	159.854	121.130	90.376	<b>371.360</b>
Verano 2008	212.115	73.065	85.866	<b>371.046</b>

## Estratos seco y regadío



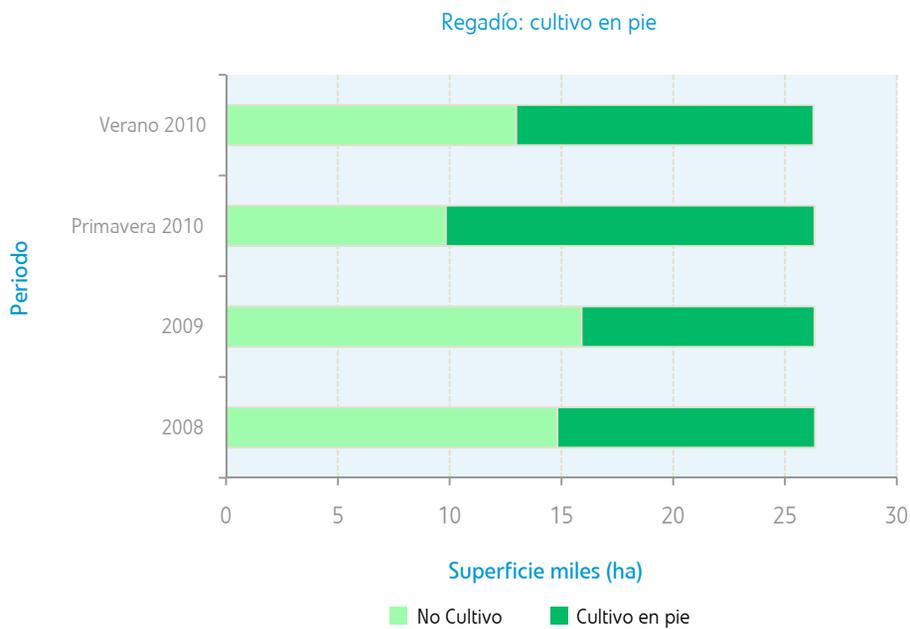
**Tabla 34. Superficie de cultivo en pie y no cultivo en los estratos de seco y regadío para todos los periodos de estudio**

	Estrato seco			Estrato regadío		
	No cultivo	Cultivo en pie	Total	No cultivo	Cultivo en pie	Total
Verano 2010	200.809	36.729	237.538	12.976	13.293	<b>26.269</b>
Primavera 2010	99.132	138.484	237.615	9.827	16.490	<b>26.317</b>
2009	211.124	26.707	237.831	15.901	10.422	<b>26.323</b>
2008	209.908	28.231	238.139	14.820	11.521	<b>26.340</b>

**Figura 90. Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo en el estrato de secano para todos los periodos de estudio**



**Figura 91. Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo en el estrato de regadío para todos los periodos de estudio**



## 7.2. Resultados del sustrato verde

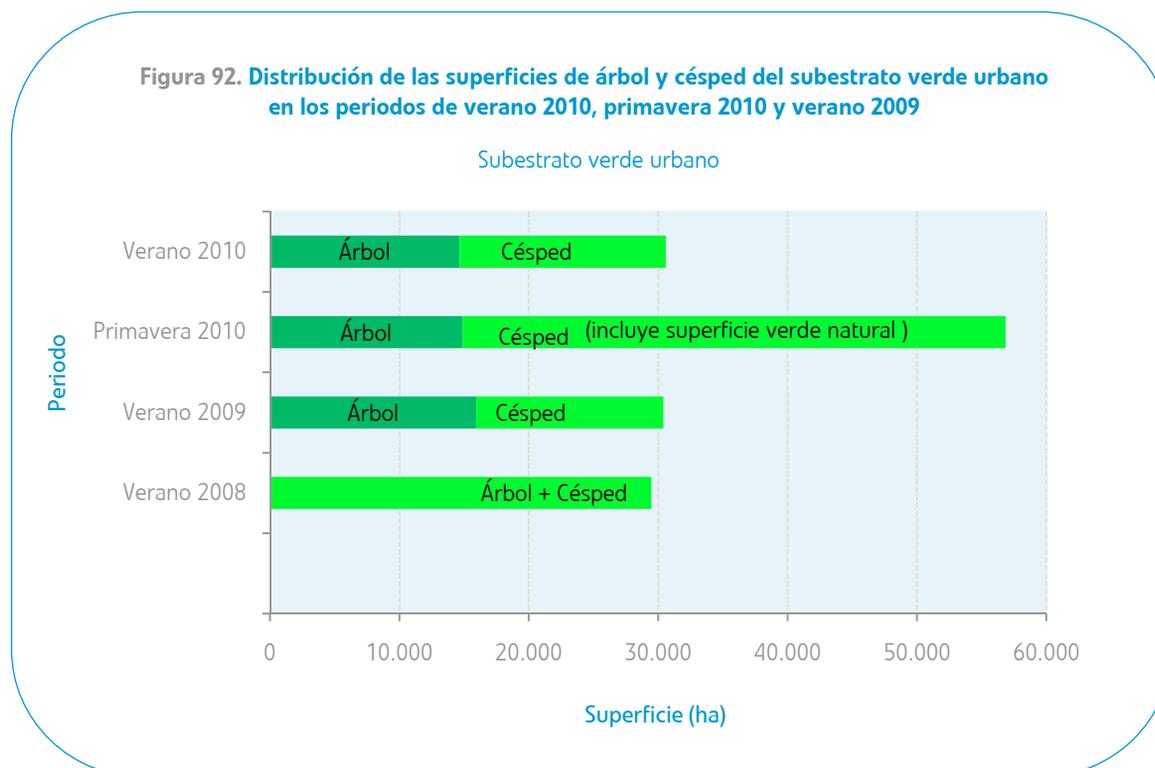
El sustrato verde incluye la vegetación (NDVI medio + NDVI alto) que inunda los estratos *suelo consolidado* y *suelo en proceso de consolidación* (zonas verdes urbanas), y está constituido por ámbitos verdes (parques y jardines, y campos de golf) que a su vez se clasifican mediante procesos de segmentación y clasificación en recintos verdes de árbol y césped.

Los resultados obtenidos para la estimación de la zona verde urbana del sustrato verde urbano, incluyendo la clasificación de árbol y césped, se presentan en la tabla 35 y la figura 92.

**Tabla 35. Superficie verde del sustrato verde urbano, estimada para todas las zonas de estudio**

Superficie del sustrato verde urbano (ha)							
Total zona verde		Total zona verde		Total zona verde		Total zona verde	
V2010		P2010		V2009		V2008	
30.461		56.846		30.397		29.468	
Césped	Árbol	Césped (incluye zona natural)	Árbol	Césped	Árbol	Césped	Árbol
15.944	14.643	41.969	14.877	14.454	15.944	-	-

**Figura 92. Distribución de las superficies de árbol y césped del sustrato verde urbano en los periodos de verano 2010, primavera 2010 y verano 2009**





# 8

Verificación de la metodología  
con imágenes Quickbird

Con el fin de servir de contraste y control de calidad de la metodología desarrollada para el proyecto, los resultados del proceso obtenidos con cada cobertura SPOT5 se validan con los resultados obtenidos sobre una zona piloto adquirida y procesada con imágenes de muy alta resolución Quickbird.

La metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT5 y se estructura también en:

- Procesado básico
- Procesos específicos de seguimiento urbano
- Procesos específicos de delimitación de la zona verde

### 8.1. Verificación seguimiento urbano verano 2008 y verano 2009, zona Rivas Vaciamadrid

La validación de la metodología SPOT5 en verano 2008 y 2009, se realiza mediante la comparación de estos resultados con los obtenidos sobre la escena piloto de la zona de Rivas Vaciamadrid, adquirida el 10 de agosto de 2008 y el 13 de julio de 2009.

La superficie de los estratos incluidos en la escena piloto Quickbird de Rivas Vaciamadrid, se presenta en la tabla 36.

**Tabla 36. Superficie de estratos cubierta por la escena Quickbird (escena piloto 2008 y 2009)**

Escena piloto 2008 - 2009		
Estratos escena Quickbird	Superficie (ha)	
	2008	2009
Suelo consolidado	2.307	2.307
Suelo en proceso de consolidación	2.400	2.428
Secano	497	479
Regadío	191	191
Forestal	914	905
Otros	11	11
<b>Total</b>	<b>6.321</b>	<b>6.321</b>

Asimismo, en la tabla 37 se desglosa la superficie de los estratos *suelo consolidado* y *suelo en proceso de consolidación*, junto con la superficie de los municipios incluidos en la escena piloto Quickbird.

**Tabla 37. Relación de superficie de municipio y estrato tipo urbano, cubierta por la escena Quickbird (1-Suelo consolidado y 2-Suelo en proceso de consolidación)**

Escena piloto 2008 - 2009				
Municipio	Superficie (ha)	Estratos urbanos	Superficie (ha) 2008	Superficie (ha) 2009
Madrid	3.789	1	1.287	1.287
		2	1.860	1.864
Rivas Vaciamadrid	2.474	1	1.011	1.011
		2	540	563
Velilla de San Antonio	30	-	-	-
San Fernando de Henares	21	1	4	4
Mejorada del Campo	7	1	4	4
<b>Total</b>	<b>6.321</b>	<b>-</b>	<b>4.708</b>	<b>4.735</b>

En la tabla 38 y la figura 93 se detallan e ilustran los ámbitos que se procesan sobre la zona piloto, incluyéndose también información referente a su superficie y método empleado para su clasificación. Se observa que un porcentaje muy elevado (75 por ciento) de superficie de *suelo en proceso de consolidación* no dispone de catastro.

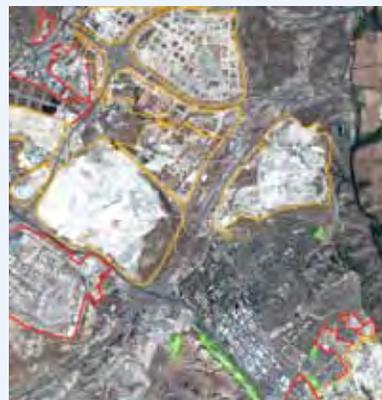
**Tabla 38. Relación de ámbitos incluidos en la escena Quickbird: superficie y método de clasificación**

Escena piloto 2008-2009			
Tipo de clasificación	Nº ámbitos	Superficie (ha) 2008	Superficie (ha) 2009
Con catastro	8-8	552,3	552,3
Sin catastro	10-10	1.843,5	1.843,5
Tramas <i>sin estructura</i>	3-5	4,7	31,8
<b>Total</b>	<b>21-23</b>	<b>2.400,5</b>	<b>2.427,6</b>



Método  
con catastro  
sin catastro  
trama

10 de agosto 2008



Método  
con catastro  
sin catastro  
trama

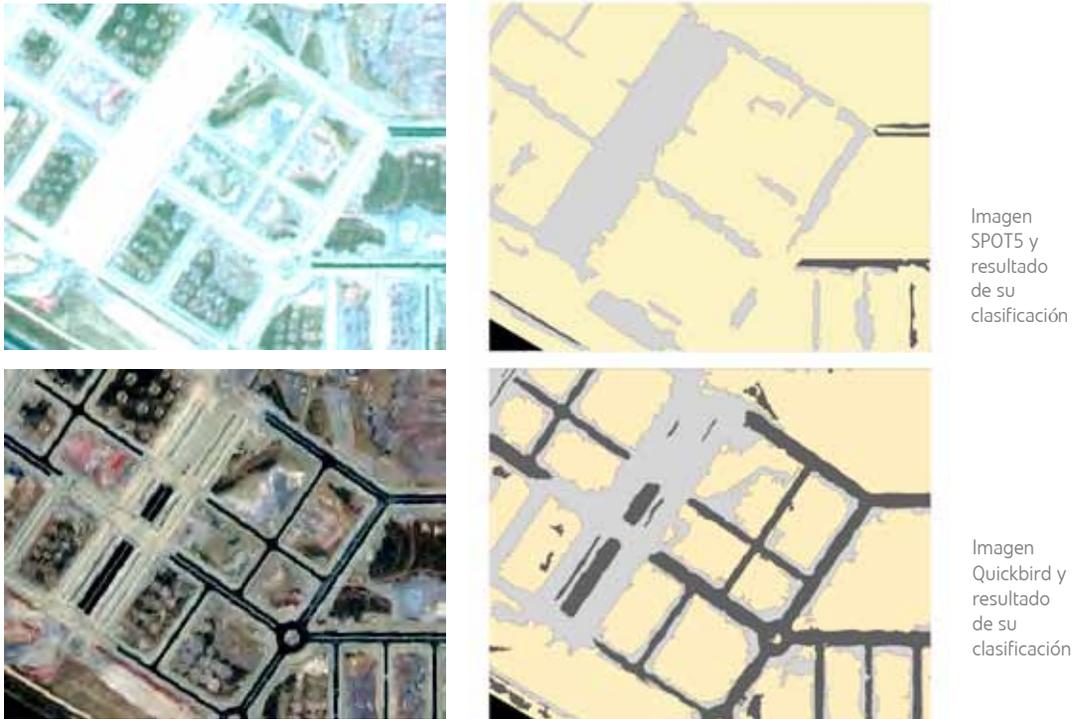
10 de julio 2009

Figura 93. Diferencias en fechas de adquisición en 2008 entre SPOT5 y Quickbird



Se observa, que en la clasificación de 2008 pueden existir diferencias atribuibles al desfase temporal entre el mosaico de imágenes SPOT5 y la imagen Quickbird, ya que, aunque la escena Quickbird se solapa con una escena SPOT5 (y parcialmente con la contigua, de fechas diferentes), el mosaico se realiza de forma que la línea de corte no divida ámbitos. Así que, de manera efectiva, la clasificación Quickbird se compara con el mosaico de dos imágenes SPOT5 adquiridas en diferentes fechas. Por esta razón, y aún tratándose de un periodo corto, existen zonas que en el mosaico SPOT5 se encuentran en un estado de construcción más avanzado, y otras en un estado más retrasado que en Quickbird. En consecuencia, las diferencias encontradas en las clasificaciones realizadas con las diferentes imágenes no corresponden necesariamente con un error de asignación de clase, sino a que, verdaderamente, ese escenario presenta diferencias en el origen, como se aprecia en la figura 94.

Figura 94. Variaciones en el estado de construcción debido a la diferencia de fechas



En la actuación correspondiente al verano de 2009 se detectan dos nuevos ámbitos que no existían en 2008 y que se resaltan en la figura 95.

**Figura 95. Ámbitos nuevos clasificados en zona piloto con Quickbird**



Para evaluar los resultados obtenidos con la metodología utilizada cuando se dispone de catastro adecuado, se presenta la siguiente tabla comparativa de las superficies clasificadas para los ámbitos ubicados dentro de la zona piloto; también se incluyen los resultados cuando no se dispone de catastro.

**Tabla 39. Comparativa de superficies clasificadas en verano 2008 y verano 2009, con catastro adecuado, utilizando Quickbird y SPOT5**

Clasificación en ámbitos con catastro adecuado									
	Verano 2008				Verano 2009				
	Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		
	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	
1-Edificio	112,19	421	107,29	158	116,95	467	114,13	170	
2-Suelo	300,78	630	305,68	471	296,02	584	298,84	459	
3-Vial asfaltado	130,73	25	111,94	17	132,25	22	133,54	17	
4-Vial no asfaltado	8,56	24	27,35	13	7,04	14	5,75	6	
<b>Total viales</b>	<b>139,29</b>	<b>49</b>	<b>139,29</b>	<b>30</b>	<b>139,29</b>	<b>36</b>	<b>139,29</b>	<b>23</b>	
<b>Total clasificado</b>	<b>552,27</b>	<b>1.100</b>	<b>552,27</b>	<b>659</b>	<b>552,27</b>	<b>1.085</b>	<b>552,27</b>	<b>652</b>	

**Tabla 40. Comparativa de superficies clasificadas en verano 2008 y verano 2009, sin catastro adecuado, utilizando Quickbird y SPOT5**

Clasificación en ámbitos sin catastro adecuado									
	Verano 2008				Verano 2009				
	Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		
	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	
1-Edificio	25,06	19	19,52	10	33,16	28	27,18	24	
2-Suelo	1.549,43	355	1.601,87	173	1.460,25	401	1.474,64	296	
3-Vial asfaltado	82,43	598	70,05	269	101,12	760	135,57	264	
4-Vial no asfaltado	186,63	959	152,11	344	249,02	804	206,16	227	
<b>Total viales</b>	<b>269,06</b>	<b>1.557</b>	<b>222,16</b>	<b>613</b>	<b>350,14</b>	<b>1.564</b>	<b>341,73</b>	<b>491</b>	
<b>Total clasificado</b>	<b>1.843,55</b>	<b>1.931</b>	<b>1.843,55</b>	<b>796</b>	<b>1.843,55</b>	<b>1.993</b>	<b>1.843,55</b>	<b>811</b>	

**Tabla 41. Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en tramas, en verano de 2008 y 2009**

Clasificación en ámbitos tipo trama								
	Verano 2008				Verano 2009			
	Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5	
	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos
1-Edificio	2,05	1	1,07	1	3,12	2	1,07	1
2-Suelo	2,64	2	3,62	2	7,04	2	9,09	3
3-Vial asfaltado	-	-	-	-	-	-	-	-
4-Vial no asfaltado	-	-	-	-	21,64	1	21,64	1
<b>Total viales</b>	-	-	-	-	<b>21,64</b>	<b>1</b>	<b>21,64</b>	<b>1</b>
<b>Total clasificado</b>	<b>4,69</b>	<b>3</b>	<b>4,69</b>	<b>3</b>	<b>31,79</b>	<b>5</b>	<b>31,79</b>	<b>5</b>

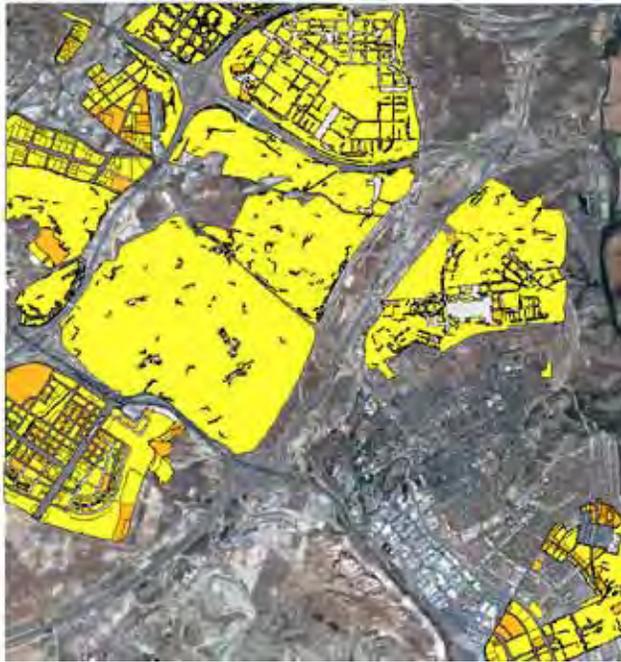
También se incluyen dos visualizaciones comparativas de la misma zona, con la representación de los recintos clasificados con SPOT5 y con Quickbird en la figura 96.

**Figura 96. Recintos clasificados 2008 – SPOT5 (izquierda) y Quickbird (derecha)**



En las figuras 97 y 98 se presentan los resultados de las clasificaciones sobre la zona piloto con Quickbird y SPOT5, para verano de 2008 y verano de 2009.

Figura 97. Resultado clasificación SPOT5 (arriba) y Quickbird (abajo), verano de 2008



- Leyenda
- 1. Edificios
  - 2. Suelos
  - 3. Vial Asfaltado
  - 4. Vial No Asfaltado



- Leyenda
- 1. Edificios
  - 2. Suelos
  - 3. Vial Asfaltado
  - 4. Vial No Asfaltado

Figura 98. Resultado clasificación SPOT5 (arriba) y Quickbird (abajo), verano de 2009



En la clasificación de la zona piloto de 2008-2009 la superficie con catastro no adecuado es la que tiene mayor extensión. Esta zona urbana se encuentra en un bajo grado de consolidación. La clasificación Quickbird identifica más superficie de vial no asfaltado que en SPOT5. El hecho de que la imagen Quickbird tenga mayor resolución,

hace que sea posible detectar elementos más estrechos y tenues que los que se diferencian con SPOT5. Por ello se clasifican los bordes de las carreteras como vial no asfaltado como se aprecia en la figura 99.

**Figura 99. Detalle de la mayor superficie vial asfaltada en clasificación Quickbird (arriba) que en la clasificación SPOT5 (abajo)**



## 8.2. Verificación seguimiento urbano primavera 2010 y verano 2010: Zona de Móstoles

Para las actualizaciones de 2010, se sugirió trabajar en otra zona piloto que permita una mayor capacidad de análisis que las de 2008-2009. De las alternativas propuestas se eligió Móstoles, como nueva ubicación de la zona piloto.

En la tabla 42 se presenta la superficie de los estratos incluidos en la escena piloto Quickbird de Móstoles adquiridas el 28 de marzo de 2010 y el 21 de agosto 2010.

**Tabla 42. Relación de superficie de estratos cubierta por la escena Quickbird**

Estratos escena Quickbird	Superficie 2010 (ha)
Suelo consolidado	2.328
Suelo en proceso de consolidación	926
Secano	3.754
Regadío	101
Forestal	598
<b>Total</b>	<b>7.707</b>

Asimismo, en la siguiente tabla se desglosa la superficie de los estratos suelo consolidado y suelo en proceso de consolidación, junto con la superficie de los municipios incluidos en la escena piloto Quickbird.

**Tabla 43. Relación de superficie de municipio y estrato tipo urbano, cubierta por la escena Quickbird (1-Suelo consolidado; 2-Suelo en proceso de consolidación)**

Municipio	Zona piloto 2010		
	Superficie (ha)	Estratos urbanos	Superficie (ha)
Móstoles	3.117	1	1.303
		2	274
Moraleja de Enmedio	2.068	1	407
		2	17
Arroyomolinos	1.887	1	315
		2	600
Fuenlabrada	309	1	179
		2	7
Humanes de Madrid	263	1	99
Alcorcón	58	1	25
		2	28
Navalcarnero	5	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>Total</b>	<b>7.707</b>		<b>3.254</b>

En la tabla e ilustración se detallan los ámbitos que se procesan sobre la zona piloto, incluyéndose también información referente a su superficie y método empleado para su clasificación.

**Tabla 44. Relación de ámbitos incluidos en la escena Quickbird: superficie y método de clasificación**

Escena piloto primavera 2010 - verano 2010				
Tipo de clasificación	N° ámbitos	Superficie (ha)	28 de marzo de 2010	21 de agosto de 2010
Con Catastro	9	770,88		
Sin catastro	10	98,74		
Tramas sin estructura	7	56,09		
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>925,70</b>		

En esta zona piloto todos los ámbitos se procesan por primera vez en la actuación de primavera 2010. En la actuación correspondiente a verano 2010 no se identifica ningún ámbito nuevo, así que se procesan los mismos ámbitos que en la actuación anterior.

A continuación, se exponen las tablas comparativas de los resultados de la clasificación sobre la zona piloto, al aplicar la metodología desarrollada sobre imágenes Quickbird y SPOT5, para cada tipo de ámbito y método de clasificación, según la disponibilidad de catastro. Estas tablas permiten analizar los cambios detectados entre ambos periodos y comparar los resultados del proceso entre la cobertura SPOT5 y la escena Quickbird.

**Tabla 45. Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en ámbitos con catastro adecuado, verano de 2008 y 2009**

	Clasificación en ámbitos con catastro adecuado							
	Primavera 2010				Verano 2010			
	Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5	
	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos	Superficie (ha)	N° recintos
1-Edificio	176,86	1.823	183,86	352	183,69	1.872	184,97	356
2-Suelo	384,14	-	377,15	-	377,31	1.369	376,03	690
3-Vial asfaltado	299,88	-	203,04	-	209,88	-	203,04	29
4-Vial no asfaltado	0,00	-	6,84	-	-	-	6,84	15
<b>Total viales</b>	<b>209,88</b>	<b>-</b>	<b>209,88</b>	<b>-</b>	<b>209,88</b>	<b>-</b>	<b>209,88</b>	<b>-</b>
<b>Total clasificado</b>	<b>770,88</b>	<b>-</b>	<b>770,89</b>	<b>-</b>	<b>770,88</b>	<b>-</b>	<b>770,88</b>	<b>-</b>

**Tabla 46. Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en ámbitos sin catastro, verano de 2008 y 2009**

Clasificación en ámbitos sin catastro adecuado									
	Primavera 2010				Verano 2010				
	Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		
	Superficie (ha)	Nº recintos	Superficie (ha)	Nº recintos	Superficie (ha)	Nº recintos	Superficie (ha)	Nº recintos	
1-Edificio	12,67	36	16,74	23	12,96	38	16,74	22	
2-Suelo	72,46	-	63,33	-	74,29	604	60,45	60	
3-Vial asfaltado	9,83	-	17,52	-	7,81	121	20,41	32	
4-Vial no asfaltado	3,78	-	1,14	-	3,69	89	1,14	41	
<b>Total viales</b>	<b>13,61</b>	<b>-</b>	<b>18,66</b>	<b>-</b>	<b>11,5</b>	<b>-</b>	<b>21,81</b>	<b>-</b>	
<b>Total clasificado</b>	<b>98,74</b>	<b>-</b>	<b>98,73</b>	<b>-</b>	<b>98,74</b>	<b>-</b>	<b>98,74</b>	<b>-</b>	

**Tabla 47. Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en tramas, en primavera y verano de 2010**

Clasificación en ámbitos tipo trama									
	Primavera 2010				Verano 2010				
	Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		Clasificación Quickbird		Clasificación SPOT5		
	Superficie (ha)	Nº recintos	Superficie (ha)	Nº recintos	Superficie (ha)	Nº recintos	Superficie (ha)	Nº recintos	
1-Edificio	3,67	1	-	-	3,67	1	-	-	
2-Suelo	52,42	-	56,09	-	13,47	4	1.714	5	
3-Vial asfaltado	-	-	-	-	-	-	-	-	
4-Vial no asfaltado	-	-	-	-	38,94	2	38,94	2	
<b>Total viales</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>38,94</b>	<b>-</b>	<b>38,94</b>	<b>-</b>	
<b>Total clasificado</b>	<b>56,09</b>	<b>-</b>	<b>56,09</b>	<b>-</b>	<b>56,09</b>	<b>-</b>	<b>56,09</b>	<b>-</b>	

Los resultados obtenidos son comparables para las distintas metodologías aplicadas según la información auxiliar disponible. Las superficies clasificadas son similares, si bien la escena Quickbird permite identificar recintos más pequeños. Por ese motivo el número de recintos identificados para la clase edificio siempre es superior en la clasificación Quickbird frente a los obtenidos con SPOT5.

Las diferencias encontradas en las superficies de cambio estimadas con Quickbird y SPOT5 son poco significativas y se deben a la mayor precisión espacial de Quickbird que permite identificar recintos más pequeños, clasificando, además, con un mayor porcentaje de aciertos.

### 8.3. Resumen verificación de la metodología

Como conclusión y resumen de los resultados obtenidos en el proceso de verificación de la metodología sobre las dos zonas piloto cabe resaltar los siguientes puntos.

Respecto a resultados observados en la metodología utilizada cuando se dispone de catastro

Quickbird permite clasificar todos los recintos procedentes de las parcelas originales que proporciona el catastro, mientras que con SPOT5, debido a su menor resolución se ha visto la conveniencia de disolver los recintos pequeños antes de segmentar y realizar la clasificación.

En la figura 100 se presenta la delimitación conjunta de los recintos Quickbird y SPOT5 sobre la clasificación Quickbird.

**Figura 100. Recintos SPOT5 vs. recintos Quickbird, SPOT5 (en fucsia) sobre la clasificación Quickbird, en la clasificación 2008**



### Respecto a resultados observados en la metodología utilizada cuando no se dispone de catastro

Las principales diferencias observadas al clasificar la escena con imagen Quickbird y con SPOT5 son achacables a las diferencias de resolución espacial (2,5 metros en SPOT5/0,6 metros en Quickbird), y de resolución radiométrica (8 bits en SPOT5/16 bits en Quickbird) que las imágenes presentan.

- Por un lado, la mayor resolución espacial de Quickbird permite delimitar elementos lineales de manera más ajustada a la realidad. En el ejemplo, se muestran los resultados obtenidos al clasificar un mismo escenario con imágenes SPOT5 y Quickbird. En la figura 101, a simple vista se observa que, mientras los viales obtenidos al clasificar con SPOT5 son discontinuos, los que se consiguen con Quickbird son continuos y de una anchura similar a la de los viales que representan.

**Figura 101. Ejemplo diferencias en resolución espacial: imágenes SPOT5 – Quickbird**

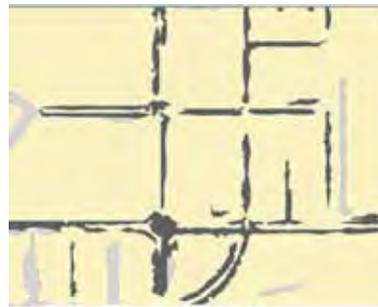
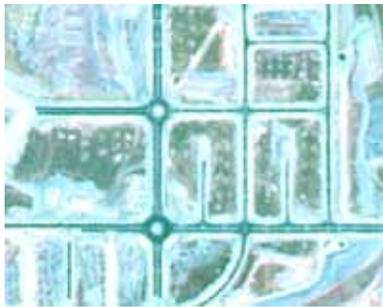


Imagen  
SPOT5  
y resultado  
de su  
clasificación

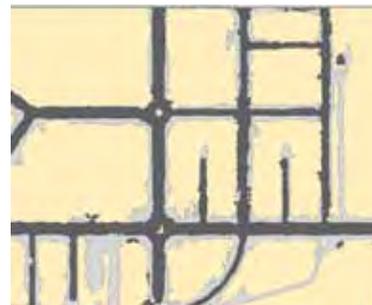


Imagen  
Quickbird  
y resultado  
de su  
clasificación

- Por otro lado, trabajar con una resolución radiométrica de 16 bits como la de Quickbird frente a la de 8 bits de SPOT5, hace posible discriminar elementos que presentan diferencias sutiles de color. Esto se evidencia claramente al tratar de detectar elementos lineales no asfaltados en un entorno de movimiento de tierras, escenario característico de las primeras fases de un ámbito en construcción, como se observa en la figura 102.

Estas mejoras en la resolución, tanto espacial como radiométrica, de Quickbird, hacen que sea posible detectar elementos más estrechos y tenuous que los que se diferencian con SPOT5, pero también ocasionan la detección de elementos pequeños dispersos como se aprecia en las siguientes ilustraciones de las figuras 103 y 104.

Figura 102. Ejemplo diferencias en resolución radiométrica: imágenes SPOT5 – Quickbird



Imagen SPOT5 y resultado de su clasificación

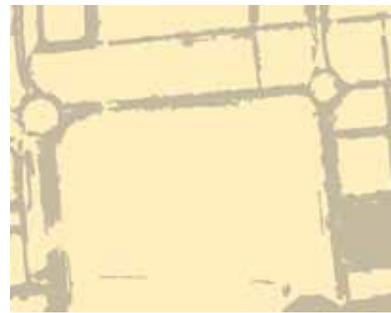


Imagen Quickbird y resultado de su clasificación

Figura 103. Quickbird identifica mejor los elementos lineales



Imagen SPOT5 y resultado de su clasificación



Imagen Quickbird y resultado de su clasificación

Figura 104. Quickbird identifica elementos no buscados



Imagen  
SPOT5  
y resultado  
de su  
clasificación



Imagen  
Quickbird  
y resultado  
de su  
clasificación

Del análisis expuesto se pueden concluir los siguientes puntos:

- Los resultados obtenidos con Quickbird son análogos a los obtenidos con SPOT5.
- La metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT5 ya que el objetivo de esta fase consistía en la validación de la metodología. Hay que resaltar que la metodología se ha personalizado a las características espaciales de SPOT5. Para obtener todo el potencial de la información Quickbird, habría que adecuar la metodología a esta resolución.
- La contribución de Quickbird al seguimiento urbano resulta más importante, cuando se analizan ámbitos con grado de consolidación alto, es decir "edificando", ya que permite identificar recintos de edificios más pequeños. Sin embargo en zonas de grado de consolidación bajo, que no suelen disponer de catastro, la alta capacidad de discriminación de Quickbird no aporta un valor importante al proceso ya que en ocasiones el exceso de información da lugar discriminaciones excesivas para el objeto del proyecto.
- Se considera que la metodología desarrollada para SPOT5 es satisfactoria, y las pruebas realizadas con Quickbird avalan esta conclusión.
- La relación coste y disponibilidad de imágenes y el tiempo de respuesta para disponer de resultados es el adecuado.

#### 8.4. Verificación de la estimación de la zona verde verano 2008 y verano 2009. Zona piloto de Rivas Vaciamadrid

La metodología utilizada para la estimación de la superficie verde sobre la zona piloto Quickbird es la misma que para SPOT5, que sigue los pasos definidos en la primera aproximación de mejoras de estimación de la superficie verde.

La comparación visual de los resultados de la estimación de vegetación a partir de SPOT5 y Quickbird no resulta tan evidente ya que los píxeles de vegetación (valores NDVI vigorosidad medio + alto) no son totalmente superponibles debido a la diferencia de la resolución, como se aprecia en la figura 105.

Figura 105. Comparación superficie verde SPOT5 – Quickbird



No obstante, en líneas generales se aprecia una razonable concordancia a nivel visual; además, los datos numéricos muestran una buena coherencia entre los resultados SPOT5 y Quickbird.

**Tabla 48. Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en tramas, primavera y verano 2010**

Estimación superficie verde 2009		
Recinto	Quickbird Superficie (ha)	SPOT5 Superficie (ha)
Árbol	92,31	117,95
Césped	228,03	208,02
Cobertura NDVI (suma)	320,34	325,97

## 8.5 Verificación de la estimación de la zona verde primavera 2010 y verano 2010. Zona piloto de Móstoles

El proceso específico de delimitación de la zona verde se realiza siguiendo los pasos del cálculo del NDVI, definición de umbrales para establecer el rango de actividad de la vegetación y segmentación en árbol y césped.

El análisis comparativo en primavera, de los resultados del NDVI obtenidos de la escena Quickbird con el NDVI correspondiente a la escena SPOT5 en la zona piloto, permite concluir que los resultados de la delimitación de la zona verde con Quickbird y SPOT5 no son comparables, ya que la imagen Quickbird es del 28 de marzo, frente a la SPOT5 adquirida el 21 de mayo, épocas en que la zona verde se ve muy influenciada por la pluviometría. Así que esta escena Quickbird, debido a la notable diferencia de fechas, no permite contrastar la metodología utilizada con SPOT5, en el caso concreto de estimación de la zona verde.

Por otro lado, la neblina y nubosidad aislada presente en la escena, afectan a la imagen de NDVI imposibilitando la definición de umbrales. Además, tal y como se discute en el apartado 7.2. Resultados del sustrato verde, la delimitación de la zona verde en primavera, no permite estimar la zona verde regada, ya que incluye la zona verde que presenta actividad por el aporte de la lluvia.

El proceso específico de delimitación de la zona verde para verano 2010 se realiza a partir del cálculo del NDVI, definición de umbrales para establecer el rango de actividad de la vegetación y segmentación en árbol y césped.

En la tabla 49 se detallan la superficie verde desglosada en árbol y césped, clasificada en la zona piloto de Quickbird y su comparación con la clasificación sobre la misma zona con la imagen SPOT5.

En las ilustraciones de la figura 106 se muestran el detalle de la clasificación de dos zonas, en donde se evidencia la diferencia en la identificación árbol y césped de la imagen Quickbird frente a la SPOT5.

**Tabla 49. Superficie verde clasificada sobre la zona piloto Quickbird- SPOT5**

Estimación superficie verde verano 2010		
Recinto	Quickbird	SPOT5
	Superficie (ha)	Superficie (ha)
Árbol	210,25	113,96
Césped	178,81	172,83
Cobertura NDVI (suma)	320,34	286,79

**Figura 106. Detalle de imagen y clasificación de zona verde. SPOT5 (izda.) y Quickbird (dcha.)  
Ejemplo 1**



Imagen SPOT5 y clasificación zona verde

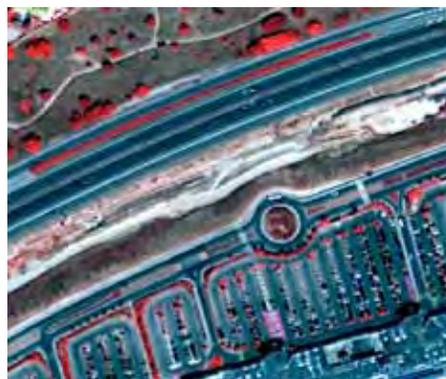
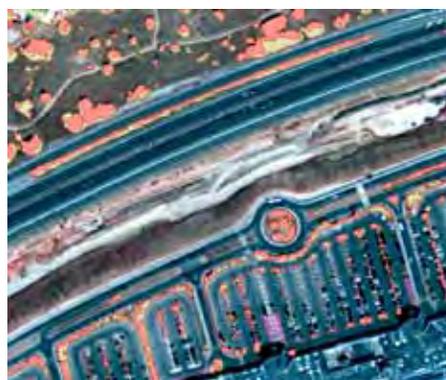


Imagen Quickbird y clasificación zona verde



La superficie de césped, estimada sobre ambas imágenes es muy similar, sin embargo la superficie de árbol clasificada con Quickbird es bastante superior a la clasificada con SPOT5. Analizando visualmente los resultados de la clasificación de árbol y césped sobre la imagen Quickbird, se comprueba una diferencia significativa debido a la presencia de hileras de árboles en el interior de urbanizaciones que con SPOT5, debido a su resolución, no es posible ni siquiera detectarlas como vegetación. Esta zona piloto tiene bastantes urbanizaciones, con zonas ajardinadas y arbolado entre calles, que Quickbird detecta, mientras que con SPOT5 no se pueden apreciar.

**Figura 107. Detalle de imagen y clasificación de zona verde. SPOT5 (izda.) y Quickbird (dcha.)  
Ejemplo 2**



Imagen SPOT5 y clasificación zona verde



Imagen Quickbird y clasificación zona verde



Los resultados de ambas clasificaciones, nos parecen coherentes, destacando que la diferencia en arbolado se debe a la diferente resolución de la imagen y al tipo de presencia y distribución del arbolado en el área de estudio.

Podemos resumir, que la metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT5 aunque adaptada a sus características espaciales. De la verificación realizada, se concluyen los puntos que siguen.

- Los resultados obtenidos con Quickbird son análogos a los obtenidos con SPOT5.
- Se considera que la metodología desarrollada para SPOT5 es satisfactoria, y queda avalada por las validaciones realizadas con Quickbird.
- Cabe destacar que los procesos de segmentación y clasificación utilizan toda la potencialidad de las imágenes Quickbird y los resultados se ven fuertemente influenciados por su mayor radiometría y su mayor detalle espacial frente al de SPOT5. Esto se evidencia en la estimación de la superficie verde (segmentación de árbol y césped), y por otro lado, en la clasificación por segmentación en los procesos de seguimiento urbano cuando no se dispone catastro. Si bien es cierto que en este último caso, al trabajar principalmente en zonas con grado de consolidación bajo esto no parece que suponga ningún beneficio, llegando a ser, en algunos casos, incluso un impedimento por exceso de información.





# 9

Estimación de la demanda de agua  
en zonas verdes

La estimación de la demanda de agua en zonas verdes, para los años 2009 y 2010, (el año 2008 no se estima por la falta de fiabilidad de sus resultados debido a la alta variabilidad de las fechas de la cobertura SPOT5) se calcula en términos de necesidad de riego según se especifica en el apartado metodológico (4.5.2).

La Comunidad de Madrid se ha dividido en tres zonas climáticas: la sierra, zona transición y la vega, estimándose para cada una de ellas la evapotranspiración de referencia a partir de datos de estaciones meteorológicas.

Las necesidades anuales para cada zona se han estimado a partir de las necesidades de riego mensuales sobre las zonas verdes de césped y árbol.

Respecto a la recopilación de información meteorológica se ha intentado trabajar con las mismas estaciones durante los dos años. No obstante, como a continuación se resume, esto no ha resultado posible en las tres zonas climáticas, así, se observan las siguientes peculiaridades:

- **Zona de la sierra**, las estaciones utilizadas son las mismas en 2009 y 2010, propiedad de Canal de Isabel II.
- **Zona de transición**, no se ha podido contar con la estación de Alovera.
- **Zona de la vega**, se ha incluido Chinchón y Armuña de Tajuña, y se ha desestimado Villamanrique de Tajo, ya que da más estabilidad y coherencia a los resultados.

En la tabla 50 se presentan las estaciones utilizadas en 2009 y 2010 para cada zona.

Tabla 50. Relación de estaciones meteorológicas utilizadas en los años 2009 y 2010

	Estaciones	Años		Fuente	Provincia
		2009	2010		
Sierra - (Zona 1)	Pinilla	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Riosequillo	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Puentes Viejas	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	El Villar	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	El Atazar	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	El Vado	2009	2010	Canal de Isabel II	Guadalajara
	Pedrezuela	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Navacerrada	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Santillana	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Navalmedio	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	La Jarosa	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Valmayor	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	La Aceña	2009	2010	Canal de Isabel II	Ávila
	Los Morales	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
Transición - (Zona 2)	Santa Engracia	2009	2010	Canal de Isabel II	Madrid
	Coslada	2009 Desestimado	2010 Desestimado	Meteored	Madrid
	Madrid/Barajas	2009	2010	tutiempo.net	Madrid
	Madrid/Getafe	2009	2010	tutiempo.net	Madrid
	Torrejón de Ardóz	2009 Desestimado	2010 Desestimado	tutiempo.net	Madrid
	Madrid/ Cuatro Vientos	2009	2010	tutiempo.net	Madrid
	Alovera	2009		SIAR	Guadalajara
Vega - (Zona 3)	Illana	2009	2010	SIAR	Guadalajara
	Villamanrique de Tajo	2009 Desestimada		Meteored	Madrid
	Magán (Toledo)	2009	2010	SIAR	Toledo
	Villarubia de Santiago	2009	2010	SIAR	Toledo
	Chinchón	2009	2010	SIAR	Madrid
	Armuña de Tajuña		2010	SIAR	Guadalajara

## 9.1. Resultados demanda de agua 2009

La estimación de la demanda de agua para el año 2009 se proporciona tomando como base las siguientes valoraciones:

- En la tabla 51 se incluye la demanda de agua anual en hectómetros cúbicos al año, obtenida al aplicar las necesidades de riego sobre las superficies de las zonas verdes (césped y árbol) de cada zona climática de la Comunidad de Madrid. Recordemos que las zonas verdes se han definido a partir del NDVI y están a su vez categorizadas atendiendo a su vigor de actividad en dos rangos: medio y alto.
- La demanda de agua de zonas verdes, en términos de necesidades de riego por la superficie existente (hectómetros cúbicos al año) y por unidad de superficie (hectómetros cúbicos al año y hectárea) para toda la Comunidad, se resume en la tabla 52.
- Gráficas de la evolución a lo largo de 2009 de la precipitación mensual acumulada y de la evapotranspiración mensual, para cada tipo de superficie verde (césped, árbol medio y árbol alto), en cada una de las zonas climáticas.
- En las figuras 108, 109 y 110 se representan las necesidades de riego mensuales (milímetros por mes) para cada tipo de superficie verde (césped, árbol medio y árbol alto), en ellas se refleja claramente cuáles son los meses en los que la precipitación cubre las necesidades de riego requeridas para cada tipo de superficie verde específica.

Respecto al césped, los cálculos indican una necesidad de agua de 10.777 metros cúbicos por hectárea y año, equivalentes a 153,45 hectómetros cúbicos al año.

Comparándolo con los datos de anteriores trabajos, publicados por Canal de Isabel II en el cuaderno de I+D+i N° 11, titulado *Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid* se observa una coherencia en los resultados, siendo algo superiores a los obtenidos para un año medio tipo seco 9515 metros cúbicos por hectárea y año, (la información de AEMET<sup>8</sup> corrobora que el año 2009 se consideró **seco** en la Comunidad de Madrid, respecto los datos medios de los últimos 30 años).

Se aprecia una evidente diferencia en lo que respecta a la demanda de agua del césped según la zona climática en la que se encuentre, siendo la zona de la sierra donde se obtiene la menor demanda de agua, con un aumento gradual de la misma según nos vamos desplazando hacia el sureste.

En la zona arbolada también se aprecia una clara diferencia en la demanda de agua según la zona climática en la que se encuentre, siendo la zona de la sierra la que requiere una menor aportación de agua, mientras que en las zonas de transición y en la zona de vega, la demanda es algo superior, siendo bastante similares entre ellas.

En lo que se refiere a la demanda total de las zonas arboladas, los datos indican que la demanda de agua es de 1536 metros cúbicos por hectárea para la zona arbórea con vigor alto; y de 526 metros cúbicos por hectárea para la zona arbórea con vigor medio.

Estos datos superan a los datos reflejados en el mencionado cuaderno de I+D+i 11 de Canal de Isabel II.

---

<sup>8</sup> AEMET: Agencia estatal de meteorología

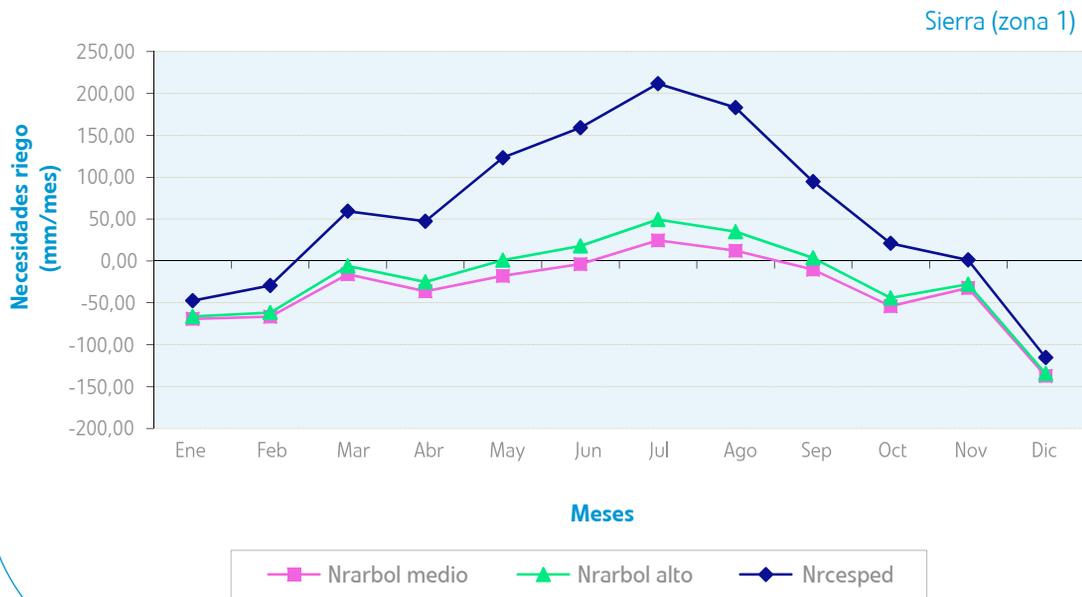
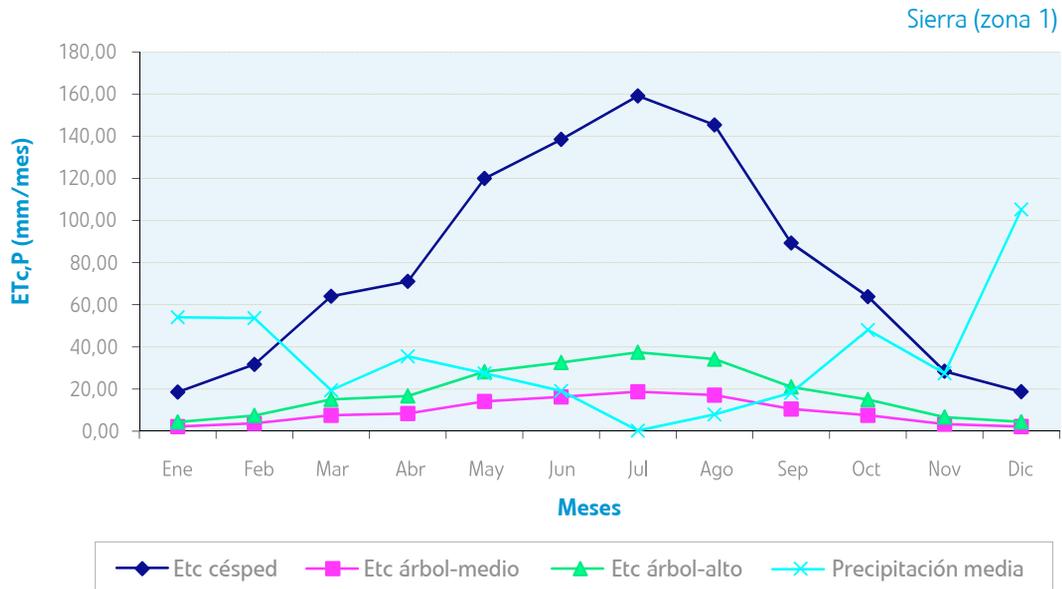
**Tabla 51. Estimación de la demanda de agua en 2009 (hm<sup>3</sup>/año)  
Zonas verdes, desglosada por zonas climáticas**

Resultados demanda de agua 2009								
	Zona Climática	Superficie (ha)	Kc	ET0 (mm/año)	Precipitación (mm/año)	Eficiencia riego	NR calculada (mm/año)	Necesidad riego (hm <sup>3</sup> /año)
Césped	Sierra	5.191	0,85	1.116	416	0,75	901	46,78
	Transición	7.840	0,85	1.269	283	0,75	1.168	91,59
	Vega	1.206	0,85	1.392	306	0,75	1.250	15,08
Árbol NDVI-alto	Sierra	1.014	0,2	1.116	416	0,75	107	1,09
	Transición	1.468	0,2	1.269	283	0,75	184	2,71
	Vega	71	0,2	1.392	306	0,75	175	0,12
Árbol NDVI-medio	Sierra	4.070	0,1	1.116	416	0,75	37	1,50
	Transición	8.542	0,1	1.269	283	0,75	60	5,10
	Vega	584	0,1	1.392	306	0,75	58	0,34
<b>Total</b>								<b>164,3</b>

**Tabla 52. Estimación de la demanda de agua (hm<sup>3</sup>/año) de las zonas verdes, para toda la Comunidad de Madrid, para el año 2009**

Resultados 2009			
	Superficie (ha)	Demanda de agua total (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda de agua por hectárea (m <sup>3</sup> /ha y año)
Césped	14.238	153.45	10.777
Árbol NDVI-alto	2.552	3.92	1.536
Árbol NDVI-medio	13.195	6.94	526
<b>Total</b>		<b>164.30</b>	<b>12.840</b>

**Figura 108. Zona climática: Sierra (zona 1). Año 2009.**  
**Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde.**  
**Precipitación mensual acumulada y Evapotranspiración mensual, (mm/mes).**  
**Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto**



**Figura 109. Zona climática: Transición (zona 2). Año 2009.**  
**Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde.**  
**Precipitación mensual acumulada y Evapotranspiración mensual, (mm/mes).**  
**Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto**



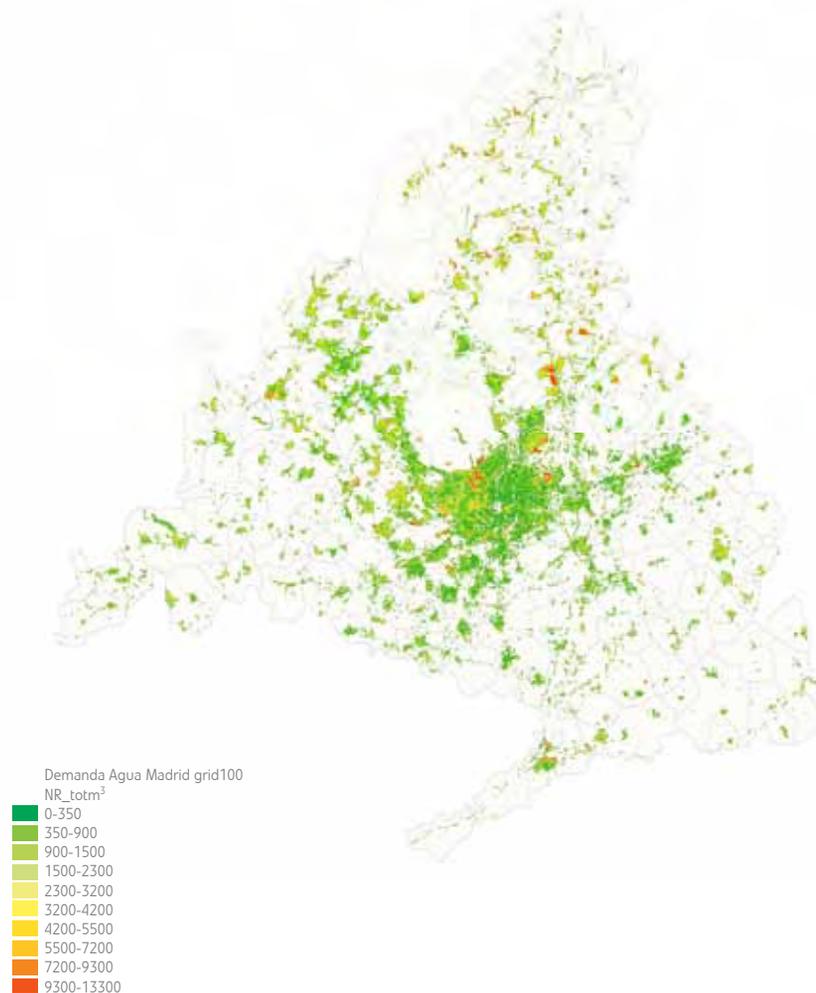
**Figura 110. Zona climática: Vega (zona 3). Año 2009.**  
**Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde.**  
**Precipitación mensual acumulada y Evapotranspiración mensual, (mm/mes).**  
**Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto**



No obstante, los resultados para árbol no son comparables, ya que en dicha publicación se marca una cifra fija de 400 metros cúbicos por hectárea y año, independiente del año meteorológico, y que es considerada como *riego de apoyo*, mientras que los resultados de las necesidades hídricas para la zona arbolada estimados en este proyecto durante el año 2009, se basan en el comportamiento meteorológico del año en curso, que se corresponde con un año seco y son, por tanto, valores referentes y no vinculantes.

Para tener una visión más completa que incluya la distribución espacial de la demanda de agua en la Comunidad de Madrid, se ha dividido la región con una malla de una hectárea de superficie por celda, estimándose para cada una de las celdas, la demanda de agua anual requerida según el tipo de superficie césped, árbol medio y árbol alto presente en las celdas. La figura 111 muestra el resultado de este proceso.

**Figura 111. Distribución espacial de la demanda de agua anual de la Comunidad de Madrid, 2009**



Demanda de agua m<sup>3</sup>/año sobre superficie de 100 m lado (año 2009)

## 9.2. Resultados demanda de agua 2010

La estimación de la demanda de agua para el año 2010 se proporciona tomando como base las siguientes valoraciones:

- Gráficas de la evolución a lo largo de 2010 de la precipitación mensual acumulada y de la evapotranspiración mensual, para cada tipo de superficie verde (césped, árbol medio y árbol alto), en cada una de las zonas climáticas.
- En las figuras 112, 113 y 114 se representan las necesidades de riego mensuales (milímetros por mes) para cada tipo de superficie verde (césped, árbol medio y árbol alto), en ellas se refleja claramente cuáles son los meses en los que la precipitación cubre las necesidades de riego requeridas para cada tipo de superficie verde específica.
- En la tabla 53 se incluye la demanda de agua anual en hectómetros cúbicos al año, obtenida al aplicar las necesidades de riego sobre las superficies de las zonas verdes (césped y árbol) de cada zona climática de la Comunidad de Madrid. Recordemos que las zonas verdes se han definido a partir del NDVI y están a su vez categorizadas atendiendo a su vigor de actividad en dos rangos: medio y alto.
- La demanda de agua de zonas verdes, en términos de necesidades de riego por la superficie existente (hectómetros cúbicos al año) y por unidad de superficie (hectómetros cúbicos al año y hectárea) para toda la Comunidad, se resume en la tabla 54.

**Tabla 53. Estimación de la demanda de agua en 2010 (hm<sup>3</sup>/año)  
Zonas verdes, desglosada por zonas climáticas**

Resultados demanda de agua 2010								
	Zona Climática	Superficie (ha)	Kc	ET0 (mm/año)	Precipitación (mm/año)	Eficiencia riego	NR calculada (mm/año)	Necesidad riego (hm <sup>3</sup> /año)
Césped	Sierra	5.760	0,85	1.024	701	0,75	603	34,75
	Transición	9.352	0,85	1.155	486	0,75	862	80,61
	Vega	314	0,85	1.287	472	0,75	944	2,97
Árbol NDVI-alto	Sierra	1.229	0,2	1.024	701	0,75	66	0,81
	Transición	1.052	0,2	1.155	486	0,75	87	0,91
	Vega	102	0,2	1.287	472	0,75	92	0,09
Árbol NDVI-medio	Sierra	2.635	0,1	1.024	701	0,75	18	0,48
	Transición	8.398	0,1	1.155	486	0,75	29	2,41
	Vega	800	0,1	1.287	472	0,75	22	0,17
<b>Total</b>								<b>123,31</b>

**Tabla 54. Estimación de la demanda de agua (hm<sup>3</sup>/año) de las zonas verdes, para toda la Comunidad de Madrid, para el año 2010**

Resultados 2010			
	Superficie (ha)	Demanda de agua total (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda de agua por hectárea (m <sup>3</sup> /ha y año)
Césped	15.426	118,33	7.671
Árbol NDVI-alto	2.383	1,81	759
Árbol NDVI-medio	11.832	3,07	259
<b>Total</b>	<b>29.642</b>	<b>123,21</b>	<b>8.689</b>

Respecto al césped, los cálculos indican una necesidad de agua de 7.671 metros cúbicos por hectárea y año, equivalentes a 118,33 hectómetros cúbicos al año.

Comparándolo con los datos de anteriores trabajos publicados por Canal de Isabel II en el referido cuaderno de I+D+i n° 11, se observa una coherencia con los resultados presentados de los valores medios de necesidades hídricas para el clima medio, con 7.725 metros cúbicos por hectárea y año.

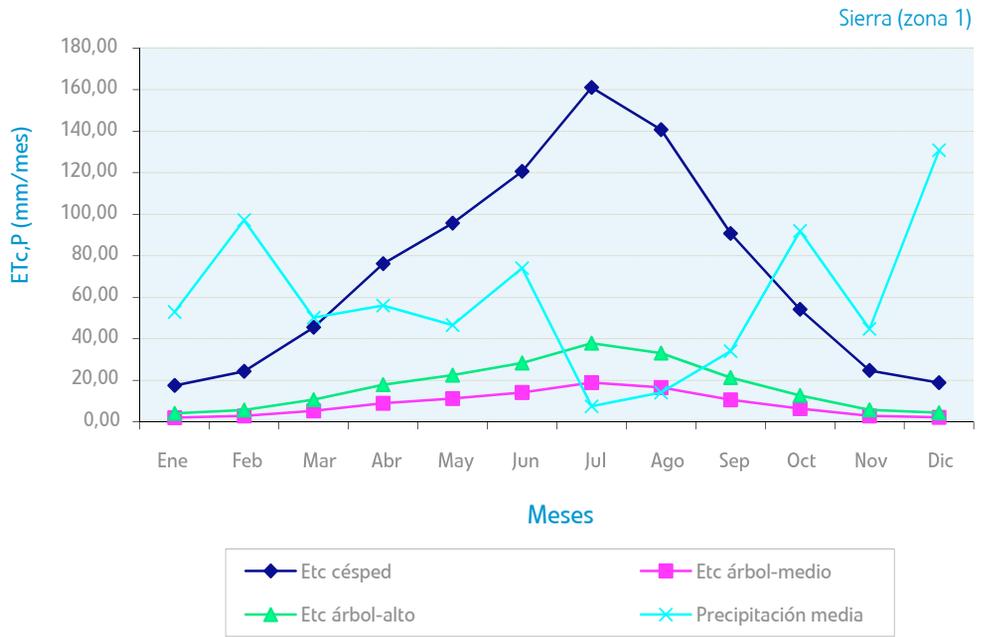
Se aprecia una evidente diferencia en lo que respecta a la necesidad de riego del césped (milímetros por año) según la zona climática en la que se encuentre, siendo la zona de la sierra donde se obtiene la menor necesidad de riego, con un aumento gradual de la misma según nos vamos desplazando hacia el sureste, debido a las condiciones meteorológicas específicas de este año para cada zona.

En lo que se refiere a las zonas arboladas, los datos indican que la demanda de agua es de 759 metros cúbicos por hectárea para la zona arbórea con vigor alto; y de 259 metros cúbicos por hectárea para la zona arbórea con vigor medio. Estos datos superan a los datos reflejados en el mencionado cuaderno de I+D+i n°11 de Canal de Isabel II. No obstante los resultados para árbol no son comparables ya que en el cuaderno se marca una cifra fija de 400 metros cúbicos por hectárea y año, independientemente del año meteorológico y que es considerada como *riego de apoyo*, mientras que los resultados de las necesidades hídricas para la zona arbolada estimados en este proyecto durante el año 2010, se basan en el comportamiento meteorológico del año en curso y son, por tanto, valores referentes y no vinculantes.

También para la zona arbórea se aprecia una diferencia en lo que respecta a la necesidad de riego (milímetros por año) según la zona climática en la que se encuentre, siendo la zona de la sierra la que requiere una menor necesidad de riego, mientras que en las zonas de transición y la vega las necesidades son algo superiores y bastante similares entre ellas.

Para tener una visión más completa que incluya la distribución espacial de la demanda de agua en metros cúbicos por año de la Comunidad de Madrid, se ha dividido la región con una malla de una hectárea de superficie por celda, estimándose para cada una de las celdas de la malla, la demanda de agua anual requerida, según el tipo de superficie: césped, árbol medio y árbol alto presente en las celdas. La figura 115 muestra el resultado de este proceso.

**Figura 112. Zona climática: Sierra (zona 1) – Año 2010**  
**Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde.**  
**Precipitación mensual acumulada y Evapotranspiración mensual, (mm/mes).**  
**Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto.**



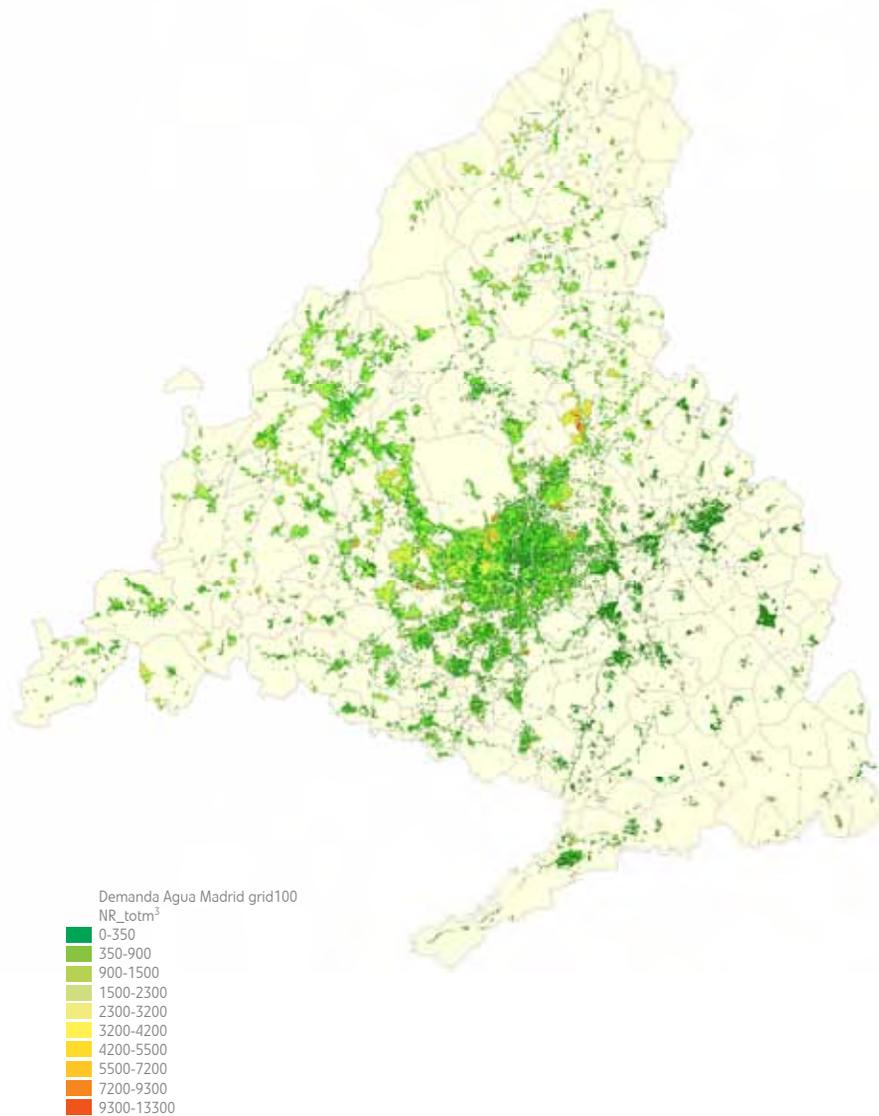
**Figura 113. Zona climática: Transición (zona 2) – Año 2010**  
**Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde.**  
**Precipitación mensual acumulada y Evapotranspiración mensual, (mm/mes).**  
**Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto.**



**Figura 114. Zona climática: Vega (zona 3) – Año 2010**  
**Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde.**  
**Precipitación mensual acumulada y Evapotranspiración mensual, (mm/mes).**  
**Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto.**



Figura 115. Distribución espacial de la demanda de agua anual de la Comunidad de Madrid, 2010



Demanda de agua m<sup>3</sup>/año sobre grid de superficie de 100 m de lado. Año 2010

En la figura 116 se compara la evolución de la evapotranspiración de referencia ET0 y de la precipitación, durante los años 2009 y 2010, para las tres zonas en las que se ha dividido la Comunidad de Madrid.

Durante 2010, para las tres zonas la precipitación fue superior a la del año 2009, siendo más acusada en la zona de la sierra.

Con respecto a la evapotranspiración, para las tres zonas, se aprecia una disminución de su valor en el año 2010, siendo esta más acusada durante los meses mayo y junio.

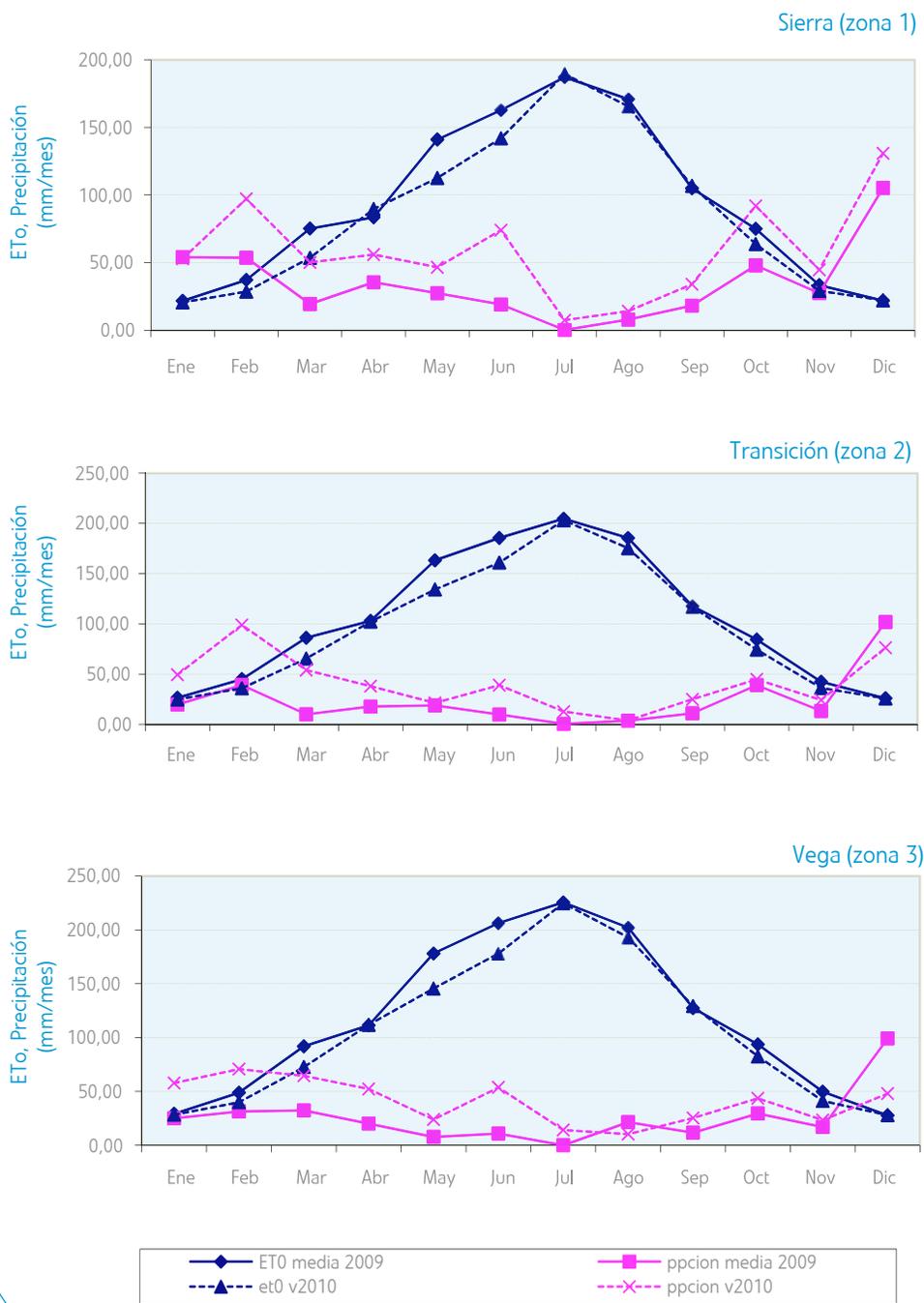
Si se comparan los datos de demanda de agua (metros cúbicos por hectárea y año) de 2009 y 2010 se observa que los datos de 2010 son inferiores a los de 2009. Esto se debe principalmente a las condiciones meteorológicas, aunque también se ve influido por la superficie y tipo (árbol y césped) estimada para cada una de las zonas consideradas.

La superficie verde, que en teoría no debería sufrir cambios sustanciales entre 2009 y 2010, se mantiene más o menos constante para la totalidad de la Comunidad de Madrid pero varía significativamente según las zonas climáticas.

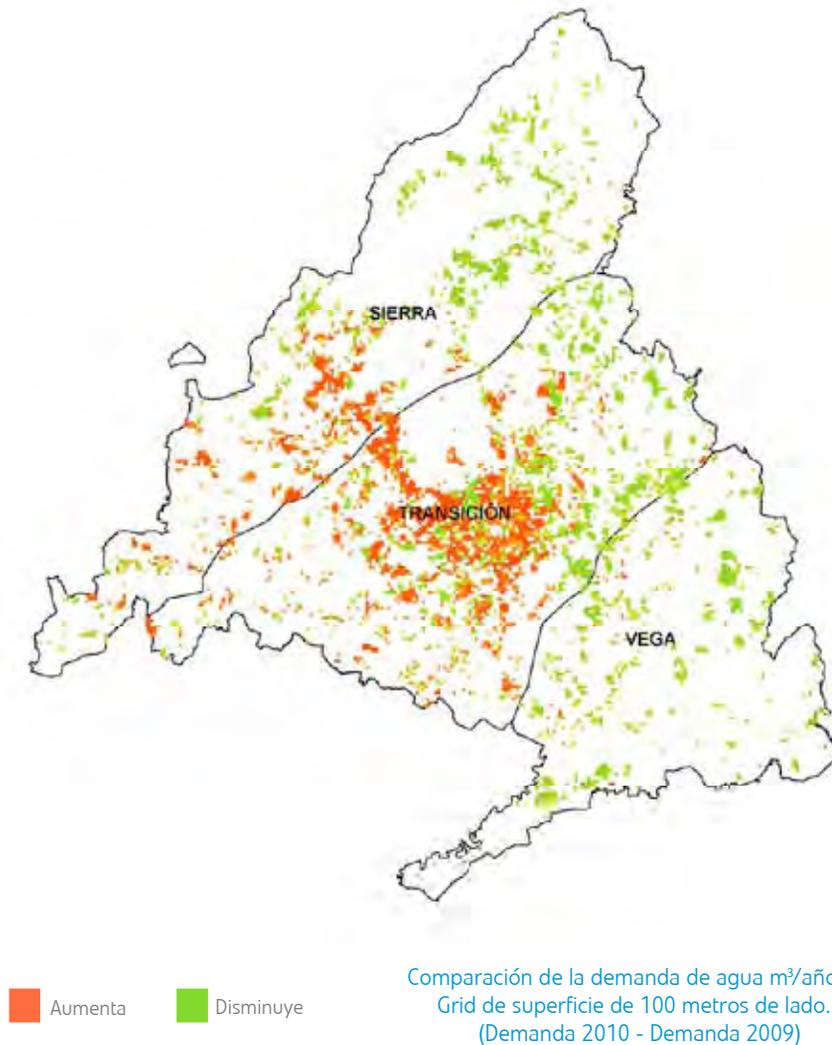
Consideramos que los ajustes metodológicos de estimación de la superficie verde para el año 2010 dan resultados más fiables, siempre teniendo en cuenta las limitaciones de la técnica empleada y los márgenes de error de las estimaciones. Este efecto se muestra en figura 117, en la que se presenta la distribución espacial de la diferencia en la demanda de agua para ambos años. Principalmente se observa un aumento significativo de la demanda de agua para la zona de transición y oeste de toda la Comunidad de Madrid, mientras que la zona de la vega y toda la zona este observa una disminución. Estos resultados son debidos a las diferencias en la superficie verde estimada para cada una de las zonas.

Aunque a nivel general en la Comunidad de Madrid la superficie verde estimada es aproximadamente la misma para ambos años, la clasificación de árbol y césped ha estimado más césped en el año 2010 y de manera particular, en el municipio de Madrid, donde encontramos mayor superficie de ambas clasificaciones. Este hecho incide en la demanda de agua de la zona de transición, ya que este municipio ocupa una gran parte de la misma.

**Figura 116. Evolución comparativa 2009 y 2010**  
**Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual (mm/mes)**



**Figura 117. Distribución espacial de la diferencia de demanda de agua anual del año 2010-2009  
Comunidad de Madrid**







# 10

## Conclusiones

Se consideran cumplidos los objetivos del proyecto; se ha desarrollado una metodología operativa que, apoyándose en imágenes SPOT5, realice el seguimiento de la consolidación urbana en la Comunidad de Madrid. Con respecto a la estimación de la demanda de agua, se ha establecido la metodología de estimación de demanda en zonas verdes con su respectiva valoración, y se han puesto las bases para el cálculo de la demanda urbana en las zonas en desarrollo.

El hecho de haber ejecutado el proyecto en 4 períodos de tiempo durante 3 años distintos ha permitido ajustar la metodología adaptándola a los objetivos del proyecto, que a su vez han sido mejor comprendidos, permitiendo identificar las necesidades y requerimientos exigidos por el proyecto.

Respecto a la **adquisición de imágenes**, se señala la importancia de realizar una programación específica para el proyecto, de acuerdo a sus objetivos. Se requiere una ventana de programación corta en el tiempo, lo cual no siempre es factible, ya que las programaciones se ven afectadas por las condiciones meteorológicas, conflictos con otras solicitudes, etc. Problemas derivados de coberturas en periodos de tiempo amplios, se traducen en la dificultad de clasificar aquellos ámbitos que abarquen varias escenas con diferente estado de construcción en cada una de ellas.

Se considera adecuado realizar el seguimiento únicamente con coberturas de verano ya que parece suficiente disponer de una serie de imágenes por año, y en esta época habitualmente las adquisiciones tienen una amplitud temporal más corta. Por otra parte la estimación de las superficies verdes en primavera se ve perturbada por las aportaciones naturales de agua.

Coberturas amplias presentan diferentes estados fenológicos en la vegetación, de forma que no se puede tratar toda la cobertura de manera homogénea, y se complica la definición de un único umbral del índice de vegetación, para la estimación de la superficie verde.

La metodología de **proceso de imágenes** requiere un tratamiento muy específico. En ella cabe destacar la robustez del método de ortorrectificación, la fusión (SRF) específica para datos SPOT5 la estratificación del territorio y su actualización, y, la idoneidad de combinar diferentes métodos de clasificación según la información auxiliar disponible.

La gran relevancia de disponer de la **información auxiliar** del SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español), imprescindible para la delimitación de zonas con un comportamiento urbano y de ocupación del suelo homogéneo, desde la perspectiva del presente proyecto. El estrato en proceso de consolidación, que es el de mayor relevancia del proyecto, se ha definido apoyándonos inicialmente en esta información.

Las pruebas previas realizadas en la fase de segmentación y clasificación, ponen de manifiesto la importancia de disponer de un **catastro** lo más actualizado posible. Su uso ha sido fundamental en la clasificación dentro del diseño y ejecución de la metodología planteada.

El uso del *planeamiento urbano* vigente en su versión más actual resulta imprescindible en este proyecto, como marco de referencia de las expectativas de crecimiento urbano.

La **validación de la metodología** realizada a partir de imágenes de alta resolución *Quickbird* pone de manifiesto los siguientes puntos:

- Los resultados obtenidos con Quickbird son análogos a los obtenidos con SPOT5.
- Se considera que la metodología desarrollada para SPOT5 es satisfactoria, y las pruebas realizadas con Quickbird avalan esta conclusión.

- La relación coste y disponibilidad de imágenes y el tiempo de respuesta para disponer de resultados es el adecuado, utilizando imágenes SPOT5.
- La identificación de edificios con imágenes QuickBird cuando se dispone de catastro se realiza de una manera mucho más precisa, llegando a identificar edificios de muy poca superficie. Esta contribución es importante cuando el grado de consolidación del ámbito es muy alto. Se puede valorar la utilización de estas imágenes a futuro en zonas concretas.

Los resultados que aporta este proyecto en relación con el grado de desarrollo de los distintos ámbitos de planeamiento, se refieren a la superficie urbanizada o construida en planta. Sin embargo, la información asociada a los planes urbanísticos hace referencia a la edificabilidad total, es decir, incluye la superficie edificable de las posibles plantas que pueden construirse, pero no se dispone de la superficie total edificable en planta. Por ello es preciso realizar estimaciones para relacionar la superficie detectada con la técnica empleada, utilizando imágenes de satélite con la superficie total edificable en el correspondiente ámbito de planeamiento. Otras técnicas más costosas que proporcionan información en vertical (información LIDAR) permitirían valorar la superficie edificada en altura, aunque sería preciso valorar su viabilidad.



Anexos

## Anexo 1. Glosario de términos

### Acrónimos

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
BdD	Base de Datos
Delta Cue	Módulo de ERDAS de procesos de detección de cambios
GAUDY	Sistema de Información Geográfico Corporativo de Canal de Isabel II
GTOPO30	Global Topographic Data
HRG	High Resolution Geometry
IGN	Instituto Geográfico Nacional
LiDAR	Light Detection and Ranging
LPS	Leica Photogrammetry Suite. Módulo de ERDAS de ortorrectificación de imágenes en bloque
MDT	Modelo digital de terreno
ND	Nivel digital
NDVI	Indice Normalizado de Vegetación
NIR	Near Infrared (Infrarrojo cercano)
PAN	Pancromática
PNT	Plan Nacional de Teledetección
RMSE	Error cuadrático medio
RPC	Rational Polynomial Coefficients
SIG o GIS	Sistema de Información Geográfico
SIOSE	Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España
SRF/FAST SRF	(Fast) Spectral Response Function
SWIR	Short-Wavelength Infrared (Infrarrojo medio)
VHR	Very High Resolution. Muy alta resolución
XS	Multiespectral

## Anexo 2. Referencias

### Agencia Andaluza del Agua. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. (2008)

Seguimiento de las medidas de ahorro de agua mediante técnicas de Teledetección y Gis en la provincia de Málaga.

[http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.d57ba3a565d2db10e849d04650525ea0/?vgnnextoid=1104fcb24550d110VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=ca87ee486a00a110VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang\\_es](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.d57ba3a565d2db10e849d04650525ea0/?vgnnextoid=1104fcb24550d110VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=ca87ee486a00a110VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es)

### Albizua; Leránoz ; Zalba (2005)

Seguimiento detallado de los cambios urbanísticos que se producen en el término municipal de Madrid, publicado en el libro del XI Congreso Nacional de Teledetección, (p. 241-244).

### Albizua; Leránoz ; Zalba (2007)

Tratamiento de imágenes del satélite SPOT5 de la zona norte de España para el Plan Nacional de Teledetección, publicado en el libro del XII Congreso Nacional de Teledetección Argentina, (p. 471-479).

### Beamonte García. C. et al. (2010)

Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid. Canal de Isabel II, cuadernos de I+D+i N° 11.

### Chavez Pat S., JR, 1989

Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Multispectral Images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol 55 N°9, (p. 1285-1294).

### Chuvioco. 2006

Teledetección Ambiental. Ed. Ariel Ciencia.

### Cubillo González, F. (2005)

Desarrollo urbano y planificación de infraestructuras y demandas.  
[http://grupo.us.es/ciberico/archivos\\_acrobat/sevilla1cubillo.pdf](http://grupo.us.es/ciberico/archivos_acrobat/sevilla1cubillo.pdf)

### FAO Irrigation and Drainage Papers (2004)

Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements (FAO56,FAO24).  
[http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries\\_id=100301](http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries_id=100301) (FAO56,FAO24)

### Gonzalez-Audicana, M.; Otazu, X.; Fors, O.; Alvarez-Mozos, J. (2006)

A low computational-cost method to fuse IKONOS images using the spectral response function of its sensors. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 44, no. 6, June 2006 (p.1683-1691).

### Ibáñez Carranza, J. C. (2007)

Accurate Assessment on Outdoor Use of Water in the Region of Madrid (Spain). Efficient 2007. 4th IWA Specialist Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply, May 2007, Jeju Island, Korea.

### Jensen, J.R. (1996)

"Introductory Digital Image processing. A Remote Sensing perspective" Segunda edición Ed. Prentice Hall.

### Leránoz; Albizua; Zalba (2008)

Seguimiento de las medidas de ahorro de agua mediante técnicas de Teledetección y Gis en la provincia de Málaga. Presentación XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica.

[Miller, Jennifer Elizabeth, Nelson, Stacy A. C. and Hess, George R.\(2009\)](#)

An Object Extraction Approach for Impervious Surface Classification with Very-High-Resolution Imagery. *The Professional Geographer*, Vol. 61:2 ,(p. 250-264).

[Yuan, F.\(2008\)](#)

Land-cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modeling, *International Journal of Remote Sensing*, 29:4, (p. 1169-1184).

## Anexo 3 Índice de figuras

Figura 1	Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de verano 2008 y verano 2009 (en rojo zona piloto Quickbird)	Pág. 13
Figura 2	Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de primavera 2010 y verano 2010 (en rojo zona piloto Quickbird)	Pág. 14
Figura 3	Distribución de estratos	Pág. 16
Figura 4	Clases de recintos urbanos	Pág. 17
Figura 5	Clasificación orientada a objetos, con catastro adecuado (imagen superior) y no adecuado (imagen inferior), sobre imagen SPOT5 fusionada 2,5 metros	Pág. 19
Figura 6	Distribución de la superficie de los estratos (resultados 2008)	Pág. 23
Figura 7	Evolución del grado de consolidación	Pág. 25
Figura 8	Seguimiento de ámbitos: relación de cambios	Pág. 26
Figura 9	Explotación de resultados: mapa temático del municipio de Getafe	Pág. 28
Figura 10	Superficie forestal según su grado de actividad vegetativa para todos los periodos de estudio	Pág. 29
Figura 11	Distribución de las superficies de árbol y césped del sustrato verde urbano en los periodos de verano 2010, primavera 2010 y verano 2009	Pág. 30
Figura 12	Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo, en el estrato de secano, para todos los periodos de estudio	Pág. 30
Figura 13	Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo, en el estrato de regadío, para todos los periodos de estudio	Pág. 31
Figura 14	Distribución espacial de la demanda de agua anual del año 2009 en la Comunidad de Madrid	Pág. 33
Figura 15	Distribución espacial de la demanda de agua anual del año 2010 en la Comunidad de Madrid	Pág. 34
Figura 16	Ámbito territorial del estudio	Pág. 50
Figura 17	Comparación de una zona urbanizada con zonas verdes. Imagen SPOT5 fusionada de 2,5 m de resolución (arriba). Imagen IKONOS de agosto de 2004 fusionadas de resolución espacial 1 m (abajo)	Pág. 66
Figura 18	Detalle de suelo consolidado en pleno centro urbano	Pág. 68
Figura 19	Detalle de suelo en proceso de consolidación. Ejemplos de nueva urbanización (arriba) y suelo edificado en pleno centro urbano (abajo)	Pág. 69
Figura 20	Detalle del estrato agrícola de secano	Pág. 70
Figura 21	Detalle del estrato agrícola de regadío	Pág. 70

Figura 22	Detalle del estrato natural forestal	Pág. 71
Figura 23	Detalle de zona rocosa (arriba) y embalse (abajo)	Pág. 71
Figura 24	Delimitación del estrado "suelo en proceso de consolidación" a partir del SIOSE	Pág. 72
Figura 25	Ámbitos en "suelo en proceso de consolidación". Urbanización (arriba) . Trama (abajo)	Pág. 73
Figura 26	Ejemplos de grado de consolidación	Pág. 75
Figura 27	Ejemplos de utilización de catastro adecuado	Pág. 76
Figura 28	Ejemplos de no utilización de catastro adecuado	Pág. 77
Figura 29	Clases de recintos urbanos	Pág. 78
Figura 30	Detalle del substrato verde	Pág. 79
Figura 31	Detalle de ámbitos verdes	Pág. 80
Figura 32	Detalle de recintos verdes	Pág. 81
Figura 33	Esquema de la base de datos cartográfica	Pág. 82
Figura 34	Ejemplos de puntos de control tomados sobre ortofoto	Pág. 86
Figura 35	Distribución de puntos de control y chequeo sobre las escenas SPOT5	Pág. 87
Figura 36	Bloque de escenas de la cobertura SPOT5 2008 con la distribución de los puntos de control, chequeo y paso	Pág. 88
Figura 37	Superposición de ortoimagen SPOT5 fusionado 2,5 m con cartografía 1:1.000	Pág. 89
Figura 38	Comparación de ortoimagen ASPOT5 2,5 m sin fusionar, con ortofoto de 50 cm de precisión	Pág. 90
Figura 39	Curva de respuesta espectral para el sensor SPOT5	Pág. 93
Figura 40	Composición falso color SPOT5 XS, 10 m, ortorrectificada y remuestreada a 2,5 m	Pág. 93
Figura 41	Composición falso color SPOT5 XS, fusionada a 2,5 m. Método FAST-SRF	Pág. 94
Figura 42	Esquema del procedimiento de fusión (SRF)	Pág. 94
Figura 43	Comparación entre la imagen SPOT5 multiespectral a 10 m (arriba) y la imagen fusionada a 2,5 m (abajo)	Pág. 95
Figura 44	Mosaico escenas SPOT5 fusionadas a 2,5 m de la cobertura 2008. (Combinación de bandas NIR, rojo y verde)	Pág. 96
Figura 45	Resultado estratificación 2008	Pág. 98
Figura 46	Representación de las zonas de cambios en el histograma	Pág. 99

Figura 47	Agrupación de parcelas catastrales: en amarillo el catastro inicial, y en negro el catastro tras el proceso de agrupación	Pág. 101
Figura 48	Imagen SPOT5 fusionada 2,5 m a nivel pixel	Pág. 102
Figura 49	Imagen segmentada a partir de parcelas catastro	Pág. 102
Figura 50	Imagen SPOT5 fusionada 2,5 m a nivel pixel	Pág. 103
Figura 51	Imagen segmentada (Feature Analyst)	Pág. 103
Figura 52	Imagen SPOT5 fusionada 2,5 m a clasificar con catastro adecuado	Pág. 105
Figura 53	Ejemplo clasificación catastro adecuado	Pág. 105
Figura 54	Imagen SPOT5 fusionada 2,5 m a clasificar con catastro no adecuado	Pág. 106
Figura 55	Ejemplo clasificación catastro no adecuado	Pág. 106
Figura 56	Curva de respuesta espectral para distintas coberturas	Pág. 108
Figura 57	Flujo de trabajo para la estimación del substrato verde	Pág. 109
Figura 58	Mapa de NDVI de verano 2010 de la Comunidad de Madrid	Pág. 110
Figura 59	Delimitación del substrato verde en el estrato suelo consolidado	Pág. 112
Figura 60	Delimitación del substrato verde en el estrato suelo en proceso de consolidación	Pág. 113
Figura 61	Rangos del estrato forestal (no vegetación, NDVI medio y NDVI alto)	Pág. 114
Figura 62	Rangos del estrato agrícola secano (no cultivo, cultivo en pie)	Pág. 115
Figura 63	Rangos del estrato agrícola regadío (no cultivo, cultivo en pie)	Pág. 116

Figura 64	Flujo de trabajo del procesamiento específico de seguimiento urbano para series posteriores	Pág. 119
Figura 65	Recintos y clasificación SPOT5	Pág. 121
Figura 66	Recintos SPOT5 vs. recintos Quickbird. SPOT5 (fucsia) sobre la clasificación Quickbird	Pág. 121
Figura 67	Mapas de pluviosidad media anual (superior) y temperatura media anual (inferior)	Pág. 125
Figura 68	Zonificación climática del área de estudio del proyecto y localización de las estaciones de trabajo 2010. En azul las estaciones desestimadas, sobre fondo de relieve (superior), y ortoimagen SPOT5 (inferior)	Pág. 127
Figura 69	Distribución de imágenes y fechas de adquisición. Cobertura de verano 2008, (cobertura PNT 2008)	Pág. 133
Figura 70	Ubicación de la zona piloto y Quickbird correspondiente a la escena Quickbird. Zona; Rivas Vaciamadrid, adquirida el 10 de agosto 2008	Pág. 134
Figura 71	Distribución de imágenes y fechas de adquisición para la cobertura de verano 2009	Pág. 135
Figura 72	Quicklook correspondiente a la escena Quickbird, zona de Rivas Vaciamadrid, adquirida el 13 de julio de 2009	Pág. 136
Figura 73	Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de primavera 2010, (escena Quickbird en rojo)	Pág. 137
Figura 74	Quicklook correspondiente a la escena Quickbird, adquirida sobre Móstoles el 28 de marzo de 2010	Pág. 137
Figura 75	Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de verano 2010, (escena Quickbird en rojo)	Pág. 138
Figura 76	Quicklook correspondiente a la escena Quickbird, adquirida sobre Móstoles el 21 de agosto de 2010	Pág. 139
Figura 77	Distribución de la superficie de los estratos (resultados 2008)	Pág. 143
Figura 78	Método de clasificación de los ámbitos acorde a la utilización del catastro	Pág. 144
Figura 79	Evolución del grado de consolidación	Pág. 148
Figura 80	Localización de nuevos ámbitos en la actualización de verano 2008	Pág. 149
Figura 81	Localización de nuevos ámbitos en la actualización de verano 2009	Pág. 150
Figura 82	Localización de nuevos ámbitos en la actualización de primavera 2010	Pág. 150
Figura 83	Localización de nuevos ámbitos en la actualización de verano 2010	Pág. 151
Figura 84	Mapa temático resultante del municipio de Getafe	Pág. 157
Figura 85	Mapa NDVI de verano 2010 de la Comunidad de Madrid	Pág. 160

Figura 86	NDVI mosaico 2008 de la Comunidad de Madrid	Pág. 161
Figura 87	Detalle de imágenes en falso color (IR, rojo, verde) de 2009 (izda.) y 2010 (dcha.), con sus correspondientes clasificaciones de zona verde. Zoom de detalle de la clasificación en la zona sur del aeropuerto	Pág. 164
Figura 88	Detalle de imágenes en falso color (IR, rojo, verde), de julio de 2009 (arriba) y marzo de 2010 (abajo) en la zona de Aranjuez. Se aprecia el diferente estado de vigor de los árboles en diferentes épocas del año	Pág. 165
Figura 89	Superficie forestal según grado de actividad vegetativa (todos los periodos de estudio)	Pág. 167
Figura 90	Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo, en el estrato de seco, para todos los periodos de estudio	Pág. 168
Figura 91	Distribución de las superficies de cultivo en pie y no cultivo, en el estrato de regadío, para todos los periodos de estudio	Pág. 168
Figura 92	Distribución de las superficies de árbol y césped del substrato verde urbano, en los periodos de verano 2010, primavera 2010 y verano 2009	Pág. 169
Figura 93	Diferencias en fechas de adquisición en 2008 entre SPOT5 Y Quickbird	Pág. 174
Figura 94	Variaciones en el estado de construcción debido a la diferencia de fechas	Pág. 174
Figura 95	Ámbitos nuevos clasificados en zona piloto con Quickbird	Pág. 175
Figura 96	Recintos clasificados 2008 – Quickbird (izquierda) y SPOT5 (derecha)	Pág. 177
Figura 97	Resultado clasificación SPOT5 (arriba) y Quickbird (abajo), verano 2008	Pág. 178
Figura 98	Resultado clasificación SPOT5 (arriba) y Quickbird (abajo), verano de 2009	Pág. 179
Figura 99	Detalle de la mayor superficie vial asfaltado en clasificación Quickbird (arriba) que en la clasificación SPOT5 (abajo)	Pág. 180
Figura 100	Recintos SPOT5 vs. recintos Quickbird. SPOT5 (en fucsia) sobre clasificación Quickbird, en la clasificación de 2008	Pág. 184
Figura 101	Ejemplo diferencias en resolución espacial: imágenes SPOT5 – Quickbird	Pág. 185
Figura 102	Ejemplo diferencias en resolución radiométrica: imágenes SPOT5 – Quickbird	Pág. 186
Figura 103	Quickbird identifica mejor los elementos lineales	Pág. 186
Figura 104	Quickbird identifica elementos no buscados	Pág. 187
Figura 105	Comparación superficie verde SPOT5 – Quickbird	Pág. 188
Figura 106	Detalle de imagen y clasificación de zona verde. SPOT5 (izquierda) y Quickbird (derecha). Ejemplo 1	Pág. 190
Figura 107	Detalle de imagen y clasificación de zona verde. SPOT5 (izquierda) y Quickbird (derecha). Ejemplo 2	Pág. 191

Figura 108	Zona climática: Sierra (zona 1). Año 2009. Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual, (mm/mes). Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto	Pág. 200
Figura 109	Zona climática: Transición (zona 2). Año 2009. Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual, (mm/mes). Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto	Pág. 201
Figura 110	Zona climática: Vega (zona 3). Año 2009. Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual, (mm/mes). Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto	Pág. 202
Figura 111	Distribución espacial de la demanda de agua anual de la Comunidad de Madrid, 2009	Pág. 203
Figura 112	Zona climática: Sierra (zona 1). Año 2010. Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual, (mm/mes). Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto	Pág. 206
Figura 113	Zona climática: Transición (zona 2). Año 2010. Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual, (mm/mes). Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto	Pág. 207
Figura 114	Zona climática: Vega (zona 3). Año 2010. Evolución de las necesidades hídricas, por tipo de superficie verde. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual, (mm/mes). Necesidades de riego mensuales (mm/mes) para césped, árbol medio y árbol alto	Pág. 208
Figura 115	Distribución espacial de la demanda de agua anual de la Comunidad de Madrid, 2010	Pág. 209
Figura 116	Evolución comparativa 2009 y 2010. Precipitación mensual acumulada y evapotranspiración mensual (mm/mes)	Pág. 211
Figura 117	Distribución espacial de la diferencia de demanda de agua anual del año 2010-2009 Comunidad de Madrid	Pág. 212

## Anexo 4 Índice de tablas

Tabla 1	Superficie clasificada en la Comunidad de Madrid	Pág. 24
Tabla 2	Resumen del grado de consolidación de los ámbitos en todos los periodos de estudio	Pág. 25
Tabla 3	Resumen del tipo de ámbitos en el suelo en proceso de consolidación durante los años del proyecto	Pág. 26
Tabla 4	Relación de cambios en los recintos clasificados en los ámbitos con cambios	Pág. 27
Tabla 5	Relación de los grados de consolidación de los ámbitos con cambio	Pág. 27
Tabla 6	Estimación de la demanda de agua de zonas verdes urbanas para toda la Comunidad de Madrid	Pág. 31
Tabla 7	Características de la información cartográfica para toda la Comunidad de Madrid	Pág. 55 - 60
Tabla 8	Satélites operativos en 2008 de resolución espacial en torno a 10 m	Pág. 62
Tabla 9	Características del satélite SPOT5	Pág. 63
Tabla 10	Comparativa de las características de las distintas imágenes de alta resolución	Pág. 65
Tabla 11	Relación de municipios y superficie interceptada por la escena Quickbird	Pág. 133
Tabla 12	Relación de municipios y superficie interceptada por la escena Quickbird, primavera 2010	Pág. 138
Tabla 13	Comparativa de superficies de los estratos de los años V2010, P2010, 2009 y 2008	Pág. 142
Tabla 14	Método de clasificación utilizado en función de la disponibilidad de catastro	Pág. 144
Tabla 15	Resultados de superficie clasificada en las distintas actuaciones (verano y primavera 2010)	Pág. 146
Tabla 16	Resultados de superficie clasificada en las distintas actuaciones (verano 2009 y verano 2008)	Pág. 146
Tabla 17	Cambios de superficie clasificada en el total de la Comunidad de Madrid entre los distintos periodos de trabajo (V2010-P2010; P2010-V2009; V2009-V2008)	Pág. 147
Tabla 18	Resumen del grado de consolidación de los ámbitos (2008-2009-P2010-V2010)	Pág. 147
Tabla 19	Resumen del tipo de ámbitos en el suelo en proceso de consolidación durante los años del proyecto	Pág. 148

Tabla 20	Relación de recintos clasificados en los nuevos ámbitos identificados en cada actualización	Pág. 151
Tabla 21	Relación de grados de consolidación en los nuevos ámbitos identificados en cada actualización	Pág. 152
Tabla 22	Relación de recintos clasificados en los ámbitos con cambios de clasificación	Pág. 152
Tabla 23	Relación de cambios en los recintos clasificados en los ámbitos con cambios	Pág. 153
Tabla 24	Relación de los grados de consolidación de los ámbitos con cambios	Pág. 153
Tabla 25	Relación de recintos clasificados en los ámbitos sin cambios entre dos actuaciones	Pág. 154
Tabla 26	Relación de los grados de consolidación de los ámbitos sin cambios en la clasificación	Pág. 154
Tabla 27	Relación de recintos clasificados en los ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado de la actualización anterior	Pág. 155
Tabla 28	Relación de los grados de consolidación de los ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado de la actualización anterior	Pág. 155
Tabla 29	Relación de superficie de ámbitos parcialmente incluidos en el suelo consolidado de la actualización anterior	Pág. 155
Tabla 30	Umrales del rango de actividad vegetativa, a partir del NDVI, de la superficie verde en los diferentes estratos, para la cobertura SPOT5 de 2009	Pág. 162
Tabla 31	Umrales del rango de actividad vegetativa, a partir del NDVI, de la superficie verde en los diferentes estratos, para la cobertura SPOT5 de 2010	Pág. 162
Tabla 32	Umrales del rango de actividad vegetativa, a partir del NDVI, de la superficie verde en los diferentes estratos, para la cobertura SPOT5 de verano 2010	Pág. 166
Tabla 33	Superficie forestal según su grado de actividad vegetativa para todos los periodos de estudio	Pág. 166
Tabla 34	Superficie de cultivo en pie y no cultivo, en los estratos de secano y regadío, para todos los periodos de estudio	Pág. 167
Tabla 35	Superficie verde del sustrato verde urbano estimada para todas las zonas de estudio	Pág. 169
Tabla 36	Superficie de estratos cubierta por la escena Quickbird (escena piloto 2008 y 2009)	Pág. 172
Tabla 37	Relación de superficie de municipio y estrato tipo urbano, cubierta por la escena Quickbird	Pág. 173
Tabla 38	Relación de ámbitos incluidos en la escena Quickbird: superficie y método de clasificación	Pág. 173
Tabla 39	Comparativa de superficies clasificadas en verano 2008 y verano 2009, con catastro adecuado, utilizando Quickbird y SPOT5	Pág. 176

Tabla 40	Comparativa de superficies clasificadas en verano 2008 y verano 2009, sin catastro adecuado, utilizando Quickbird y SPOT5	Pág. 176
Tabla 41	Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en tramas, en verano de 2008 y 2009	Pág. 177
Tabla 42	Relación de superficie de estratos cubierta por la escena Quickbird	Pág. 181
Tabla 43	Relación de superficie de municipio y estrato tipo urbano, cubierta por la escena Quickbird	Pág. 181
Tabla 44	Relación de ámbitos incluidos en la escena Quickbird: superficie y método de clasificación	Pág. 182
Tabla 45	Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en ámbitos con catastro adecuado, verano de 2008 y 2009	Pág. 182
Tabla 46	Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en ámbitos sin catastro, verano de 2008 y 2009	Pág. 183
Tabla 47	Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en tramas, en primavera y verano de 2010	Pág. 183
Tabla 48	Comparativa de superficies clasificadas con Quickbird y SPOT5, en tramas, primavera y verano 2010	Pág. 189
Tabla 49	Superficie verde clasificada sobre la zona piloto Quickbird-SPOT5	Pág. 190
Tabla 50	Relación de estaciones meteorológicas utilizadas en los años 2009 y 2010	Pág. 197
Tabla 51	Estimación de la demanda de agua ( $\text{hm}^3$ /año) de las zonas verdes, desglosada por zonas climáticas, 2009	Pág. 199
Tabla 52	Estimación de la demanda de agua ( $\text{hm}^3$ /año) de las zonas verdes, desglosada por zonas climáticas, para toda la Comunidad de Madrid, para el año 2009	Pág. 199
Tabla 53	Estimación de la demanda de agua ( $\text{hm}^3$ /año) de las zonas verdes, desglosada por zonas climáticas, 2010	Pág. 204
Tabla 54	Estimación de la demanda de agua ( $\text{hm}^3$ /año) de las zonas verdes, desglosada por zonas climáticas, para toda la Comunidad de Madrid, para el año 2010	Pág. 205

Canal de  Isabel II

Canal de  Isabel II

[www.cyii.es](http://www.cyii.es)

Canal de Isabel II  
Santa Engracia, 125. 28003 Madrid