



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Los satélites de media y baja resolución espacial como fuente de datos para la obtención de indicadores ambientales

Autor: Santiago Ormeño Villajos

Institución: Universidad Politécnica de Madrid
E-mail: santiago.ormeno@upm.es

Otros autores: Antonio Arozarena Villar (Instituto Geográfico Nacional); Marina Martínez Peña (Universidad Politécnica de Madrid); Marcos Palomo Arroyo (Universidad Politécnica de Madrid); Guillermo Villa Alcázar (Instituto Geográfico Nacional); Juan José Peces Morera (Instituto Geográfico Nacional); Lidia Pérez García (Universidad Politécnica de Madrid)



RESUMEN:

A mediados de los años 90, la Comisión de Desarrollo Sostenible de la ONU, la FAO y otras organizaciones comenzaron a desarrollar y perfeccionar bases de datos y sistemas de indicadores existentes hasta entonces. En 1996, el entonces Ministerio de Medio Ambiente impulsó las primeras iniciativas en España con la creación del Sistema Español de Indicadores Ambientales que culminaron con el actual Banco Público. Paralelamente al desarrollo de los sistemas de indicadores normalizados, han ido surgiendo propuestas con el fin de utilizar la información, adquirida por satélites de observación de La Tierra, en la obtención de dichos indicadores. (Wallace, J. y Campbell, N. 1996, Brown T.N. et al.,2001). La presente comunicación es consecuencia de la investigación llevada a cabo en el proyecto laTel, desarrollado entre la Universidad Politécnica de Madrid y el Instituto Geográfico Nacional. Dicho proyecto ha tenido como objetivo principal el establecimiento de la utilidad de diversos sensores, de media y baja resolución espacial, para la obtención de indicadores normalizados de carácter agroambiental. Una parte sustancial del trabajo descrito, está constituida por la selección de variables necesarias para la obtención de indicadores y su correspondencia con variables derivadas de los sensores. Se proponen modelos procesales que relacionan unas con otras, cumpliendo el requisito de que tales modelos deben de tener un carácter operativo, estableciéndose requerimientos y especificaciones técnicas de procesos y datos. También, se detalla un modelo organizativo y de consultas de documentos. Se han seleccionado 27 indicadores, en los cuáles, la teledetección por satélite puede contribuir, de una forma determinante, a su obtención y un cierto número de ellos pueden ser obtenidos totalmente mediante la citada disciplina. Se documentan, así mismo, los estándares existentes que pudieran ser de aplicación.



1. ANTECEDENTES

Los antecedentes del pensamiento ambiental se remontan a la antigüedad clásica, así Lucrecio (95-55 a.C.) ya afirmaba que “el hombre obedece a la ley natural al igual que el resto de la naturaleza”. También Francis Bacon (1561-1626) manifestaba que “La grandeza del hombre reside en su capacidad de controlar su ambiente”, y A. Von Humboldt (1769-1859) presentaba una “Relación entre vegetación y clima”.

Hacia mediados del siglo pasado con la revolución industrial, se manifestó un crecimiento de la intencionalidad del dominio de la naturaleza por parte del hombre, apoyado en el desarrollo tecnológico.

En el transcurso del tiempo, la cuestión ambiental se fue perfilando y fundamentando disciplinalmente, de tal forma que, a principios de los años setenta llega a ser un conjunto de temas científicos, sociales, ecológicos, políticos y económicos.

En 1972 se celebró la Conferencia de Estocolmo que dio lugar al Programa de Naciones Unidas Para el Medio Ambiente (PNUMA). Esta conferencia fue pionera para la mayoría de los acuerdos ambientales multilaterales (Convención de Basilea, las Convenciones sobre Biodiversidad de Montreal y sobre el Cambio Climático, etc.).

El Tratado de la Unión Europea de 1992 planteó, como uno de sus principales objetivos, promover un alto nivel de desarrollo sostenible mediante el establecimiento de una política destinada a lograr un elevado grado de protección ambiental y, además, especificó que las exigencias en tal ámbito se deberían integrar en la concepción y aplicación de las políticas sectoriales y nacionales. (Versión consolidada del Tratado de la Unión Europea, artículo 2. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2002)

Desde principios de los años 90 hemos asistido a una creciente preocupación por la tipificación de parámetros que permitan evaluar de una manera objetiva el entorno ambiental.

La incorporación de los aspectos ambientales en la formulación de las actuaciones políticas ha planteado la necesidad de disponer de datos estadísticos sobre el medio ambiente, que permitan evaluar la ejecución y el seguimiento de las medidas adoptadas (Félix Alonso Luengo, 2000). Tales esfuerzos se concretaron en diferentes propuestas por parte de organismos internacionales como la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), pionera en el desarrollo de indicadores ambientales en 1989, así como la oficina EUROSTAT (Statistical Office of the European Communities) con la publicación del documento “Headline Indicators for the European



Union”, en el año 2000 (EUROSTAT, 2008). Por parte del Ministerio de Medio Ambiente español, se presentó en el año 2000 un sistema de indicadores ambientales para España, aunque en años anteriores ya existían propuestas de indicadores para diferentes subáreas. (Ministerio de Medio Ambiente, MMA, 2006).

Un indicador ambiental (IA) es una variable que proporciona información sintética sobre un fenómeno ambiental complejo, y permite conocer y evaluar el estado, así como la evolución temporal del fenómeno. El potencial de estos indicadores reside en su facilidad para sintetizar una gran cantidad de información en un formato simple y práctico. La sencillez de estos índices integrados facilita el acceso a la información a organismos y usuarios en general. (MMA, 2000)

Se considera que gran parte de la información ambiental, obtenida por cualesquiera medios, es susceptible de ser utilizada directamente como indicador ambiental o bien, contribuir a la obtención de variables que, en un proceso posterior, permitirían obtener tal indicador.

La puesta en marcha en los últimos años de nuevos programas espaciales de observación de La Tierra amplían las posibilidades de mejorar la vigilancia ambiental, existiendo una serie de factores que condicionan las características de las variables derivadas, entre otros, la triple resolución (espacial, espectral y temporal) que nos ofrecen los satélites y la calidad de las imágenes (ausencia de ruido, nubosidad, entre otros).

En el presente trabajo, se muestran análisis y resultados, correspondientes al proyecto desarrollado entre el Instituto Geográfico Nacional y la Universidad Politécnica de Madrid (latel), algunos de cuyos objetivos son los que se mencionan a continuación.

1. Establecer la utilidad de los diversos satélites y sensores, que actualmente ofrecen los diferentes programas espaciales, para contribuir a la obtención de los distintos indicadores ambientales normalizados contemplados en los sistemas español, europeo y mediterráneo y que, así mismo, contemplen la ocupación de suelo como base fundamental de obtención de los mismos.
2. Establecer la base de los tratamientos digitales de imágenes que serían de aplicación, teniendo en cuenta el satélite, la escala y los indicadores a obtener, entre otros factores.
3. Establecer requerimientos y especificaciones técnicas correspondientes a procesos, algoritmos, sensores, formatos de distribución y almacenamiento de imágenes y datos.



2. INDICADORES AMBIENTALES. SISTEMAS.

La fase inicial de laTel consistió en la obtención de documentación sobre indicadores existentes en España, los países Mediterráneos, la Unión Europea y la ONU, así como de información sobre satélites, sensores y productos disponibles. Posteriormente se procedió a la elaboración de unos documentos estructurados (formato ficha), referidos a cada uno de los indicadores preseleccionados. Todo ello con el fin de facilitar la toma de decisiones y agilizar los procesos posteriores de revisión y actualización.

Incluido en cada ficha aparece el modelo procesal actual por el que se obtiene el indicador, así como la metodología propuesta para su obtención mediante teledetección operativa.

En el diseño de tales documentos de síntesis se consideraron los campos más representativos y definitorios de los indicadores ambientales, algunos de ellos con vista a mejoras en la cantidad de información disponible, o a la eventual revisión de los procedimientos para su obtención.

Como se muestra también en la figura 1, los campos que aparecen en dicho documento, para cada indicador ambiental, son los que se citan a continuación: código, nombre, organismo, descripción, área temática, tema, sector, relevancia ambiental, tipología, fiabilidad, intervalo de los datos, período de actualización, resolución demandada, unidades en las que se expresa, tipo de valor, tipo de dato, cobertura, tabla, mapa, gráfico, fuente, modelo procesal (metodología) actual, metodología propuesta, oferta por entidad distribuidora, disponibilidad en bases de datos, sensor, frecuencia, resolución, usuarios, diagrama de flujo de datos por teledetección, documento de referencia.

CODIGO:		Nombre:		ORGANISMO:	
15		Evolución de la superficie dedicada a invernadero		TCI	
Descripción:					
Evolución anual de la relación entre la superficie agrícola de regadío y la superficie agrícola total. Por superficie agrícola de regadío se entiende las superficies a las que voluntariamente se les proporciona agua y están destinadas a la producción de cultivos o al mantenimiento de pastos, independientemente del número de regos que se efectúan al año. Como superficie agrícola total se entiende, la superficie de cultivos, hortalizas, cultivos leñosos, barbechos y otras tierras no ocupadas.					
Área temática:		Temas:		Sector:	
Socioeconómicos y sectoriales		Agricultura		Crise	
Relevancia ambiental:					

Tipología:		Finalidad:			
Proximidad:					
Intervalo de los datos:		Período de actualización:		Resolución demandada:	
1999-2001		Porcentaje			
Tipo de valor:		Tipo de dato:		Cobertura:	
Cuantitativo		Pasa		TABLA MAPA GRÁFICO	
		C.C.A.A.		Lr Lr Lr	
Fuente:					
Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivo. Boletín mensual de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 1999, 2000 y 2001.					
Metodología procesal (metodología actual):					
Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivo. Boletín Mensual de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 1999, 2000 y 2001.					
<pre> graph TD A[Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivo. Boletín Mensual de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 1999, 2000 y 2001.] --> B[Identificación de superficie de invernadero Identificación de superficie de cultivo total] B --> C[Evolución de la superficie dedicada a invernadero] </pre>					
Metodología propuesta:					
Oferta por entidad distribuidora:		Disponibilidad en BECO:		Frecuencia:	
		SENGOR			
				Resolución:	

Figura 1. Ficha de indicador

3. ESTRUCTURA Y GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN DOCUMENTAL

Para estructurar la información recopilada, se diseñó una base de datos específicamente adaptada. La información se extrajo, entre otras fuentes, de documentos procedentes de diferentes organismos proponentes de indicadores: ONU, Red EIONet (Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente), Agencia Europea de Medioambiente (CSI 14), Tronco Común de Indicadores (TCI) del MMA, Observatorio de la Sostenibilidad de España (OSE), ONU - Plan Azul (Indicadores para el Mediterráneo).

La estructura de la base de datos, responde a la necesidad de dar respuestas muy concretas y contiene, principalmente, información sobre:

- Indicadores.
- Satélites y sensores.
- Variables de indicadores y de sensores, relación entre ellas.

En la tabla 1 se muestran la totalidad de tablas que conforman la base de datos.

TABLAS DE ENTIDADES:	TABLAS INTERMEDIAS DE RELACIÓN
Bandas	AreasT_Sect_Indicador
Documentos	Doc_Sensor
INDICADORES	Est_N_D_Indicador
Organizacion	Indicador_doc
Satelite	Indicador_vble
Tipo_var	MetodoI_vble_ext
VARIND	MetodoV_sensor
AreasT_Sectores	MetodoVble_Doc
Cobertura	Org_VARTEL
Est_Norma_Dir	SENSOR_SATELITE
MetodosV	SENSOR_SATELITE_BANDAS
REL_VARIND_VARTEL	VARIND_VARTEL
Sensor	
Variables	
VARTEL	

Tales tablas y relaciones poseen una cierta complejidad, por lo que se desarrolló una aplicación (BDIAT), que permite la extracción y análisis de información de interés, mediante consultas a la misma, de una manera organizada y operativa. Cada opción de menú soporta consultas SQL. Así, por ejemplo, si el usuario deseara conocer aquellas variables sensor que contribuyen al cálculo de un determinado indicador ambiental, la entrada a la consulta podría ser desde diferentes características del indicador. Por ello, desde el menú de la aplicación, se podría seleccionar “Por Tema”, o “Por Nombre”. A partir de una variable sensor seleccionada por el usuario, es posible obtener los indicadores ambientales que con ella están relacionados. Del mismo modo, la consulta por organizaciones permite conocer cuáles demandan u ofertan algún producto. (Figura 2)

Tabla 1. Tablas clasificadas de la base de datos



Figura 2. Diferentes consultas a la base de datos

4. PROGRAMAS ESPACIALES Y SENSORES.

Se realizó un análisis de satélites con resolución espacial media y baja, que permitiesen obtener información a una escala regional, en este caso referida al conjunto de España, y considerando, fundamentalmente, sensores multiespectrales que trabajen en el intervalo óptico e infrarrojo térmico.

Dada la resolución geométrica de interés, así como la envergadura y difusión de los diferentes programas espaciales, inicialmente se consideraron los siguientes: ENVISAT, NOAA, SPOT, TERRA, LANDSAT 7, MSG-2. Entre los correspondientes sensores se consideraron los que se muestran en la tabla 2.

	Espacial	Radiométrica	Temporal	Espectral (bandas)
MERIS	300 m	12 bits	3 días	15
AVHRR	1100 m	10-16 bits	1 días	5
ASTER	15-30-90 m	8-12 bits	16 días	14
VEGETATION	1000 m	16 bits	1 día	4
SEVIRI	1000-3000 ^(*) m	0,25 K	15 minutos	12
MODIS	250-500-1000 m	12 bits	1-2 días	36
TM	30-120 m	8 bits	16 días	7
ETM+	15-30-60-120 m	8 bits	16 días	10

^(*)En el caso de la Península Ibérica los datos multiespectrales tienen una resolución de 4 por 5 Km. aproximadamente.

Tabla 2. Resolución de diferentes sensores.

5. USUARIOS DE INDICADORES EN ESPAÑA.

Un aspecto del estudio consistió en el análisis de las entidades productoras y demandantes de variables ambientales que pudieran utilizar los recursos y metodologías propuestas en la investigación.

Para la identificación de los usuarios de IA en España, así como de sus requerimientos, y de los expertos en cada una de las áreas temáticas en las que se incluyen los indicadores seleccionados, se diseñó un modelo de encuesta, adaptado a tal finalidad, que fue cumplimentada por 25 de tales usuarios, que se distribuyen en las siguientes tipologías.

- Ministerios u organismos adscritos: 14
- Confederaciones hidrográficas: 9

- Otros usuarios: 2

En la encuesta se reflejó la oferta y demanda de variables sensor. En la tabla 3 se muestra dicha oferta y demanda, agrupada por categorías.

		Nº DE USUARIOS QUE DEMANDAN	Nº USUARIOS QUE OFERTAN Y DEMANDAN
CATEGORÍAS DE VARIABLES SENSOR	Reflectividad /Radiancia /Índice de Monitorización Global del Ambiente	3	-
	Temperatura	3	1
	Índice de Vegetación	2	1
	Humedad/Aridez	8	2
	Productividad/Concentración de carbono	2	-
	Atmósfera	2	-
	Incendios	2	-
	Agua	2	1
	Ocupación del suelo	10	1
	Poblamiento	1	-
Otros	4	0	

Tabla 3. Número de usuarios que ofertan y/o demandan variables sensor (agrupadas por categorías)

6. SELECCIÓN DE INDICADORES Y VARIABLES. METODOLOGÍAS DE OBTENCIÓN.

La selección final de indicadores ambientales, que es posible obtener por teledetección operativa, se realiza en base a la relación entre las variables utilizadas para obtener el indicador y aquellas procedentes de sensores .

A partir del diagrama de flujo de variables y procesos para el cálculo de indicadores ambientales (figura 3, 4 y 5), se pudo establecer una clasificación IA según su dificultad de obtención:

- Obtención directa (OD) o inmediata.

- Obtención sencilla, que es posible en colaboración con otras entidades (OP).
- Obtención no posible con los medios disponibles (ONP) o cuya metodología no está definida.

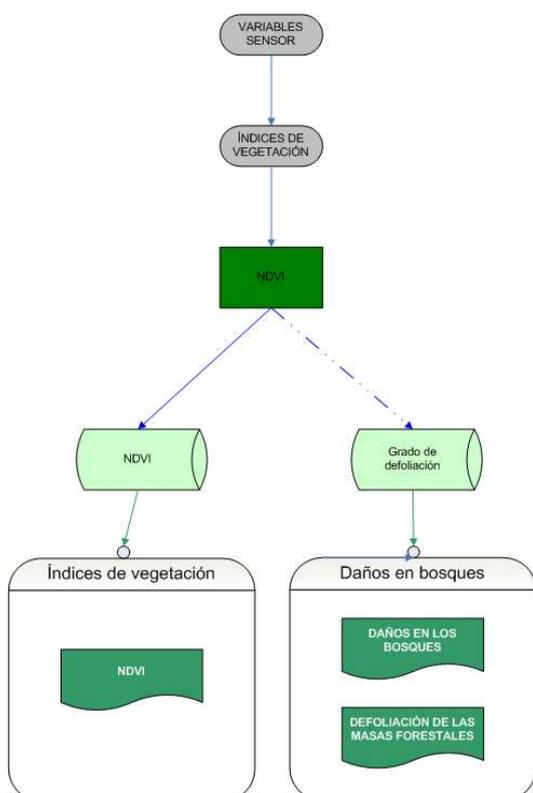


Figura 3. Flujo de datos para la obtención de diferentes indicadores

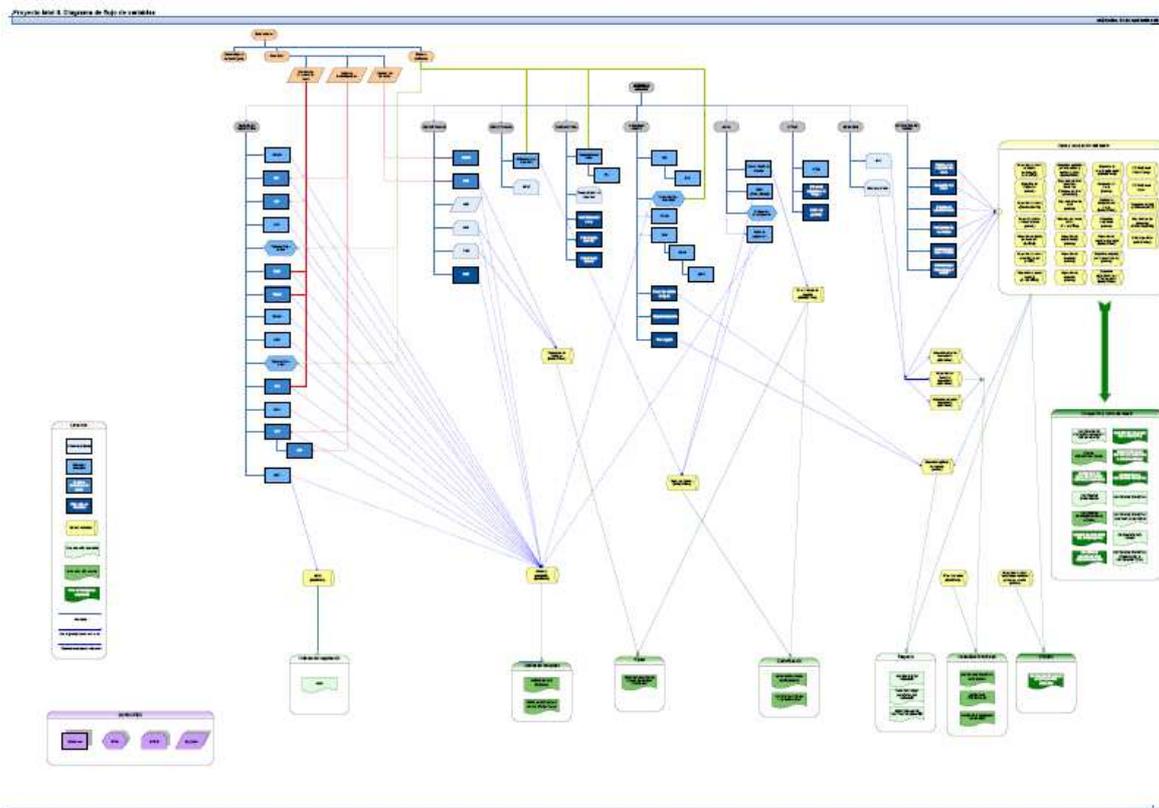


Figura 4. Diagrama de flujo de datos (variables sensor)

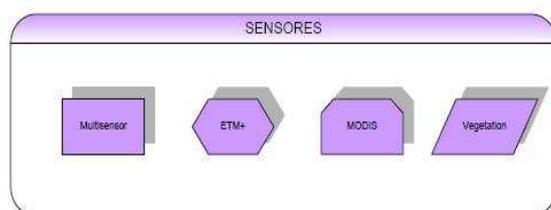


Figura 5. Tipos de sensores

En lo que respecta a los productos fuente utilizados, los indicadores ambientales, se clasificaron en las tres categorías siguientes:

I- Indicadores que pueden obtenerse a partir de documentos de uso y ocupación del suelo (SIOSE o CORINE Land Cover).

- Superficie de cultivos anuales y permanentes (ONU). OD.
- Costa desnaturalizada (TCI). OP.
- Superficie urbanizada (OSE) OD.
- Superficie urbanizada en el litoral (OSE). OP.
- Superficie forestal como porcentaje de la superficie total (ONU) OD.
- Ocupación del suelo. Land Take (CSI 14) OD.
- Superficie forestal por tipo de especie (TCI) OD.
- Superficie forestal (I. Mediterráneo) OD.
- Cambio en la superficie forestal (ONU). ONP.
- Cambio en los usos del suelo (TCI). ONP.
- Evolución de la superficie dedicada a invernaderos (TCI). ONP.
- Cambios en los usos del suelo (ONU). ONP.

II- Indicadores que pueden obtenerse a partir de datos de satélite.

- Concentración de algas en aguas costeras (ONU) OP.
- Defoliación de las masas forestales (IAMMA). OP.
- Daños en los bosques (TCI). OP.
- Agua embalsada eutrofizada (TCI). OP.
- Eutrofización en embalses (IA MMA). OP.
- Satellite derived vegetation index (ONU) OD.



III- Indicadores que pueden obtenerse mediante fuentes diversas. Las variables indicador pueden ser obtenidas a partir de productos de satélite ó mediante documentos de ocupación del suelo.

- Superficie forestal incendiada (TCI). OP.
- Superficie quemada por año (I. Mediterráneo). OP.
- Incendios forestales (IAMMA). OP.
- Porcentaje de cultivos de regadío (ONU) OD.
- Tasa de suelo agrícola de regadío (I. Mediterráneo). OD.
- Superficie de regadío (TCI). OD.
- Superficie afectada por desertificación (ONU). ONP.
- Superficie de construcciones legales e ilegales (ONU). ONP.
- Superficie afectada por la erosión (TCI). ONP.

En las tablas 4 y 5, se listan las variables sensor necesarias para el cálculo de las variables indicador. Dichas variables conducen a la obtención de los documentos cartográficos de indicadores ambientales y de ellas se consideran los aspectos más significativos:

- **Frecuencia de obtención de la variable indicador:** periodicidad propuesta para la actualización de la variable indicador
- **Sensor utilizado para la obtención de la variable sensor:** se especifica si se obtiene a partir de datos ETM+, MODIS, SEVIRI o multisensor.
- **Grado de dificultad de obtención de la variable sensor:** *estándar* si es ofrecida al usuario por parte de una agencia distribuidora de productos de satélite (variables precalculadas); *de obtención inmediata*, si el usuario la calcula directamente a partir de los valores radiométricos de las imágenes; si requiere coeficientes de ajuste para su cálculo; y *obtención no definida* cuando no se conoce con certeza el proceso para su obtención.

Indicador (es) ambiental (es)	Variable indicador		Variable sensor		
	NOMBRE	Frecuencia de actualización	Acrónimo	Sensor utilizado	Grado de dificultad de obtención de la variable
Daños en los bosques y defoliación en las masas forestales	Grado de defoliación	Mensual	OSAVI	Multisensor	Obtención inmediata
			SVI	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			LAI	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			FGV	Multisensor	Obtención inmediata
			Tasseld Cap-Verdor	ETM+	Obtención inmediata
			GLAI	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			TSAVI	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			MSAVI	Multisensor	Obtención inmediata
			ARVI	Multisensor	Obtención inmediata
			Tasseld Cap-Verdor	ETM+	Obtención inmediata
			PVI	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			SAVI	Multisensor	Obtención inmediata
			VCI	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			NDVI	Multisensor	Obtención inmediata
NPP	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste			
Concentración de algas en aguas costeras	Producción de carbono	Semestral	NPP	Multisensor	Requiere coeficientes de ajuste
			MODIS	MODIS	Producto estándar
	PSN		MODIS	Producto estándar	
Concentración de clorofila	Semestral	Concentración de clorofila	Multisensor	Obtención inmediata	
Agua embalsada eutrofizada y eutrofización en los embalses	Índice de Carlson	Semestral	Reflectividad en superficie	Multisensor	Obtención inmediata
			Concentración de clorofila	Multisensor	Obtención inmediata
			Sedimentos en suspensión	ETM+	Obtención inmediata
	Concentración de clorofila	Semestral	Concentración de clorofila	Multisensor	Obtención inmediata
Satellite derived vegetation index	NDVI	Mensual	NDVI	Multisensor	Obtención inmediata

Tabla 4. Relación entre variables indicador y variables sensor, en indicadores ambientales procedentes de datos de satélite.

Indicador (es) ambiental (es)	Variable indicador		Variable sensor		
	NOMBRE	Frecuencia de actualización	acrónimo	Sensor utilizado	Grado de dificultad de obtención de la variable
Superficie de regadío, tasa de suelo agrícola de regadío, porcentaje de cultivo de regadío	Suelo agrícola de regadío	Anual	Píxel regado	Multisensor	Obtención no inmediata
			Contenido relativo de agua	Multisensor	Obtención no inmediata
Superficie forestal incendiada, incendios forestales, superficie quemada en un año	Superficie no arbolada incendiada	Mensual	BAI	MODIS	Obtención no inmediata
			Píxel incendiado	MODIS	Obtención no inmediata
	Superficie arbolada incendiada	Mensual	BAI	MODIS	Obtención no inmediata
			Píxel incendiado	MODIS	Obtención no inmediata

Tabla 5. Relación entre variables indicador y variables sensor, en indicadores ambientales procedentes de fuentes diversas.

Para la obtención de IA a partir de imágenes de satélite, se consideraron inicialmente los datos radiométricos del sensor, los cuales permiten la obtención de las correspondientes variables. También pueden tener por origen variables sensor precalculadas y distribuidas por las agencias, obteniéndose unos documentos cuantitativos, que son los que se analizan y sirven para el cálculo de IA agrupados por entidades territoriales. En la figura 6 se muestra el modelo global de obtención de indicadores.

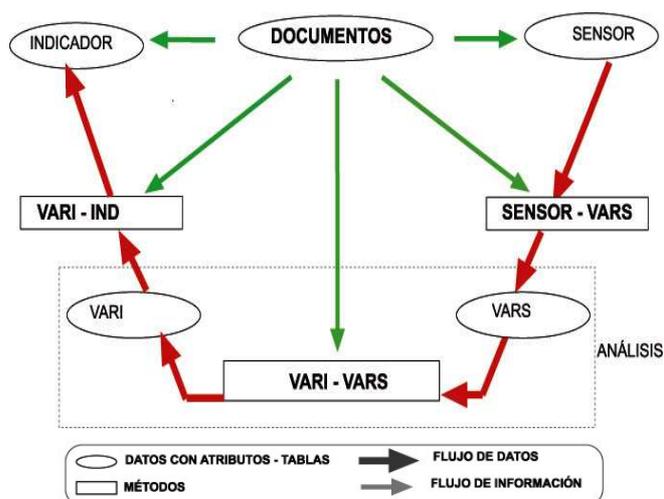


Figura 6. Modelo de relación entre IA y datos de satélite.

Para la obtención de IA, en el caso de utilizar bases documentales de usos y coberturas del suelo, el estudio se centró en dos de ellas: CORINE Land Cover 2000 y SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España).

El proyecto CORINE Land Cover 2000 (CLC2000) es el proyecto de actualización del proyecto CORINE Land Cover 1990 referida al año 2000 y tiene como objetivo fundamental la detección e interpretación de los cambios de cobertura del suelo a escala 1:100.000 en Europa durante la última década (1990-2000).

El objetivo del proyecto SIOSE es la formación de una cartografía de ocupación del suelo, con una escala de referencia de 1:25000 y una estructura de datos muy elaborada, disponiendo de grandes ventajas respecto a CORINE Land Cover 2000.

(IGN, 2008).

En el caso de utilizar las bases documentales de ocupación del suelo anteriormente citadas, el documento inicial puede ser, bien de carácter cualitativo (sólo se indica la clase de pertenencia de cada polígono) o bien cuantitativo, en este caso, indicándose valores referidos a los polígonos en cuestión, de esta última información adicional sólo se dispone en el caso de SIOSE.

Teniendo en cuenta la experiencia del Laboratorio de Teledetección de la ETSI en Topografía. G. C. de la Universidad Politécnica de Madrid y considerando la revisión de documentos, se hizo una selección de aquellas variables sensor que pueden obtenerse mediante métodos de teledetección operativa o que merecen ser consideradas especialmente, tal relación final se cita a continuación.

- Reflectividad en la Superficie.



- Función de Distribución de Reflectividad Bidireccional.
- Temperatura en la Superficie.
- Índice de Condición de Temperatura.
- Flujo Térmico del Suelo.
- Flujo Térmico Sensible.
- Flujo Térmico Latente.
- Temperatura de Brillo.
- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- Índice de Vegetación Perpendicular.
- Índice de Vegetación Ajustado al suelo.
- SAVI Modificado.
- SAVI Transformado.
- Índice de Condición de Vegetación.
- SAVI Optimizado.
- Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera.
- Índice de Área Foliar.
- Verdor Fraccional de la Vegetación.
- Índice de Área de hoja Verde.
- Tasseled Cap Índice de Verdor.
- Tasseled Cap Índice de Brillo.
- Índice de Vegetación Estandarizado.
- Índice de Verdor Relativo.
- Índice Relativo de Sequía.
- Contenido relativo de Agua (Relative Water Content In).
- Índice Global de Humedad en Vegetación.
- Evapotranspiración.
- Tasseled Cap Índice de humedad en vegetación.
- Pixel Regado.
- Concentración de humedad en Vegetación.
- Índice de Estrés de Humedad.
- Índice de Agua de Superficie Terrestre.
- Índice de Agua de Diferencia Normalizada.
- Radiación Neta.
- Fracción de Radiación Absorbida. Fotosintéticamente Activa.



- Productividad Neta Primaria.
- Productividad Bruta Primaria.
- Productividad Neta del Ecosistema.
- Fotosíntesis Total Diaria.
- Pixel incendiado.
- Índice de Área Quemada.
- Concentración de Sedimentos en Suspensión en Agua.
- Índice de Pigmentos.
- Índice de Diferencia Normalizada para la Nieve.
- Concentración de Clorofila en Agua.
- Índice de Fragmentación.
- Land Cover Índice de Fragmentación.
- Cambio de Ocupación del Suelo.
- Ocupación del Suelo.
- CORINE Land Cover.
- CORINE Land Cover Change.
- Probabilidad de Uso Urbano.
- Crecimiento Espacial Urbano.
- Índice de Monitorización Global del Ambiente.
- Diferencia espectral de la Imagen.
- Ambiental genérica.

Una vez realizada la selección de dichas variables y teniendo en cuenta las necesidades de variables indicador, se hace necesario analizar la relación entre las mismas, teniendo en cuenta la existencia de documentos que la fundamenten y la posibilidad de obtener las mismas.

A la vista de los dos tipos de variables, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se establecen diferentes tipos de relación entre ellas:

- Relación de identidad.
- Con seguridad puede obtenerse (relación documentada).
- Probablemente puede obtenerse (relación no documentada).
- No existe relación.

Establecida la relación entre variables de uno y otro tipo, se procedió a la selección final de los indicadores ambientales que, siendo de interés, podrían obtenerse con imágenes de satélite de media y baja resolución.



Se realizaron diagramas de flujo de datos y procesos (figuras 3, 4 y 5) cuyo objetivo era proporcionar una visión sintética de interrelaciones entre variables así como de los correspondientes procedimientos. En la figura 7 se muestra la simbolización y la leyenda de los mencionados diagramas.

En los diagramas aparecen datos, de carácter externo, que intervienen en el cálculo de las distintas variables sensor, entre ellos los siguientes.

- Climatológicos/meteorológicos.
- De calibración del sensor.
- Imágenes multitemporales.

Cuando se obtiene el valor de un indicador ambiental a partir de una imagen de satélite, referido a una entidad territorial, se comete un error en la estimación de las superficies de las mismas, debido a la resolución espacial de la imagen. Puesto que es necesario tener la base cartográfica a la misma resolución que la imagen, el proceso de conversión de vectorial a ráster, provoca errores en el cálculo de la superficie de las entidades.

Una estimación de dicho error viene dada por la expresión:

$$E_s = \frac{Superficie_{real} - Superficie_{calculada}}{Superficie_{real}} * 100$$

Donde el término *Superficie_{real}* se refiere a la obtenida a partir del documento cartográfico vectorial y la *Superficie_{calculada}* a la obtenida tras el proceso de conversión.

Los errores cometidos varían en función de la resolución de la imagen resultante y se encuentran recogidos en la tabla 6. En el caso más desfavorable, la diferencia de superficies es del 28.87%.

En la figura 8 se muestra, gráficamente, la influencia de la resolución de la imagen resultante, en el cálculo de la superficie de las entidades territoriales, particularmente para el término municipal de Albeta (Zaragoza), considerado el caso más desfavorable..

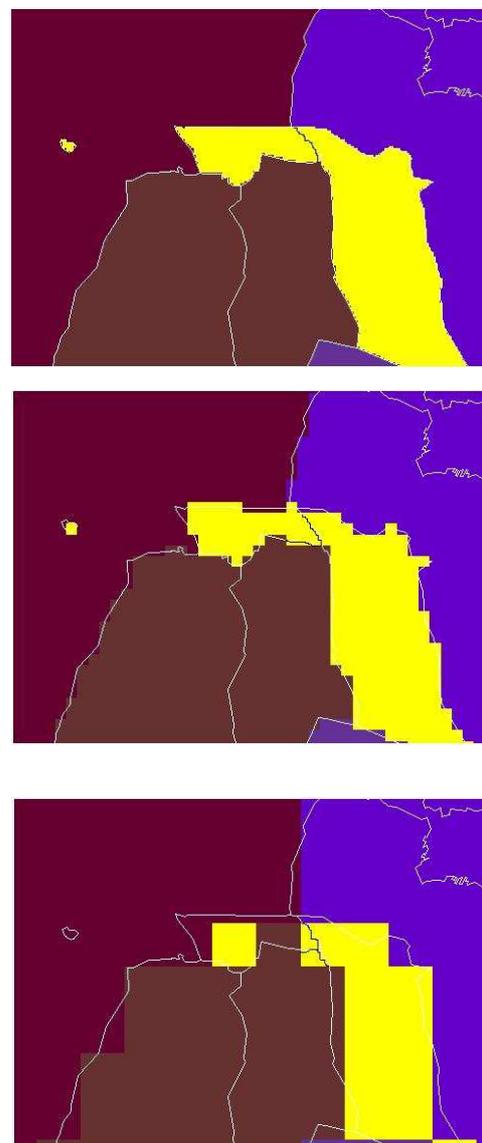
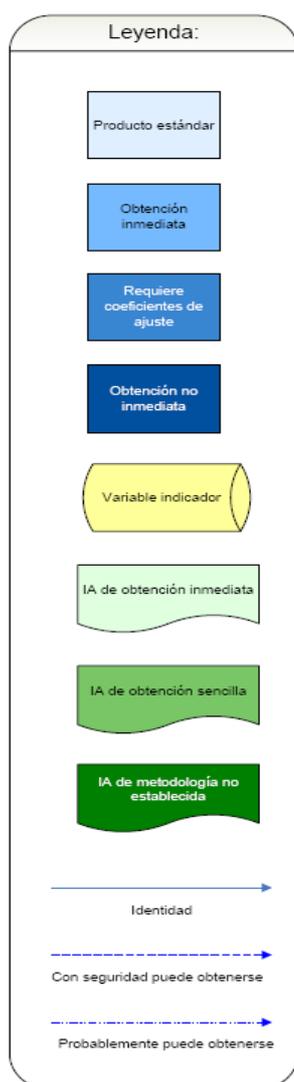


Figura 7. Simbología del diagrama de flujo de datos y procesos.

Variable forma: origen de los datos .

Variable valor: dificultad de obtención.

Variable tono: tipo de variable.

Tipo de línea: relación entre variables.

Figura 8. Efecto del remuestreo en la estimación de superficies.

	Error 50m	Error 100m	Error 250m	Error 500m	Error 1000 m
Media (%)	0.0009	0.003	-0.014	0.02	-0.39
Máx (%)	3.07	8.72	23.72	56.82	61.88
Mín (%)	-2.39	-5.07	-28.87	-80.41	-384.67
Desv Est.	0.12	0.33	1.33	3.31	11.09

Tabla 6. Errores cometidos en la estimación de la superficie de la entidad territorial.

En la tabla 7, se indica el porcentaje de términos municipales, cuyo error de determinación de la superficie, es menor que el 5% al variar la resolución. A la vista de la misma, y para una resolución espacial de 250 m (resolución máxima de MODIS), puede afirmarse que, en el 99.2% de los términos municipales, la superficie calculada difiere de la real en menos de un 5% .

	50 m	100 m	250 m	500 m	1000 m
% T.M.	100	100	99.2	94.9	74

Tabla 7. Porcentaje de términos municipales cuyo error superficial es inferior al 5%

En este caso, para sensores de resolución media y baja, se observó que, aún utilizando una resolución de 500 m, el porcentaje de términos municipales cuyo error superficial es inferior al 5% es del 94.9%, porcentaje que puede ser suficiente en muchos casos.



7. ESPECIFICACIONES DE DATOS Y PRODUCTOS.

En tablas referidas posteriormente se muestran las características de diversos sensores espaciales y las de documentos cartográficos de ocupación del suelo. Así mismo, en el proyecto laTel se llevó a cabo un análisis de los formatos de almacenamiento más comunes que pueden utilizarse en la distribución de datos procedentes de satélite.

El tipo de entidad territorial de referencia, para el grupo de indicadores procedentes de datos de satélite, está determinada por el producto fuente. El resultado final para los indicadores cuya fuente de datos corresponde a imágenes ETM+ o MODIS, podrá ser un documento coroplético de términos municipales, mientras que los que utilicen como fuente imágenes SEVIRI darán lugar a un documento de provincias o comunidades autónomas.

El periodo de actualización de los documentos cartográficos de este grupo de indicadores ambientales vendrá condicionado por la resolución temporal del sensor.

En la Tabla 2 se detallan las características de los sensores más destacados, así como las especificaciones de SIOSE (Ministerio de Fomento. Instituto Geográfico Nacional, 2008) (Tabla 8), CORINE Land Cover (Tabla 9) y los formatos de almacenamiento y distribución más utilizados así como algunas de las agencias que los utilizan.(Tabla 10).

Especificación	Descripción
Cobertura geográfica	Territorio nacional: (Península, Islas Canarias e Islas Baleares).
Unidad de trabajo	Hoja 1:25.000
Sistema geodésico de referencia	ETRS89
Proyección cartográfica	UTM
Husos UTM	28, 29, 30, 31.
Tipo de entidades	Polígono
Tamaño de la Unidad Mínima Cartografiable	Superficies artificiales y láminas de agua: 1 hectárea.
	Cultivos: 2 hectáreas
	Humedales, playas y vegetación de ribera: 0,5 hectáreas.
Escala de referencia	1:25.000
Modelo de datos	Modelo conceptual normalizado, interoperable y armonizado.

Tabla 8. Especificaciones técnicas de SIOSE

Especificación	Descripción
Cobertura geográfica	Territorio nacional: (Península, Islas Canarias e Islas Baleares).
Unidad de trabajo	Hoja 1:100.000
Sistema geodésico de referencia	ED50 Para islas Canarias será REGCAN95
Proyección cartográfica	UTM
Husos UTM	27, 28, 29, 30.
Tipo de entidades	Polígono
Tamaño de la Unidad Mínima Cartografiable	25 hectáreas
Escala de referencia	1:100.000

Tabla 9. Especificaciones técnicas de CORINE Land Cover-2000

		AGENCIAS						
		NASA	IKONOS	QUICKBIRD	IRS	SPOTIMAGE	RADARSAT	EUMETSAT
FORMATOS	HDF	X						
	GeoTIFF	X	X	X	X			
	DIMAP					X		
	BIIF							
	Mr. SID							
	NOAA-AVHRR, level 1b	X						
	RADARSAT CEOS						X	
	Fast L7 (Landsat)	X						
	LRIT/HRIT							X
	Binarios Genéricos (BIL, BIP, BSQ)							
	BMP							
	JPEG							
PNG								

Tabla 10. Formato de datos



La existencia de normas y estándares que definen la estructura de almacenamiento de los datos, condicionan en cierta medida, las metodologías aplicables.

Algunas de las organizaciones que han desarrollado estándares en el ámbito de la teledetección y que se han tenido en cuenta para este estudio son: el Comité Técnico ISO211, el cuál establece los estándares sobre información geográfica; el Open GIS Consortium (OGC) con las especificaciones para la interoperabilidad de software de geo-procesamiento y servicios; el U.S. Federal Geographic Data Committee (FGDC) el cuál determina las normas U.S. federal sobre información geográfica y el U.S. Geological Survey (Liping Di. 2003).

Además de los citados, existen otros conjuntos de normas como DIGEST o EOSDIS, ambas referidas al intercambio eficaz de información. Cabe destacar, así mismo, la Directiva INSPIRE por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea. (Directiva 2007/2/CE).

Entre los formatos ráster más utilizados para almacenamiento de imágenes se encuentran TIFF, HDF, DIMAP, Binarios Genéricos y otros , con un carácter multipropósito, como BMP, JPEG o PNG.

8. APLICACIÓN DE MODELOS AL TERRITORIO ESPAÑOL

Se realizaron dos aplicaciones prácticas, referidas al territorio español, ensayando dos metodologías de proceso dependiendo del origen de los datos.

A) A partir de imágenes de satélite

Se obtuvo la variable sensor *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada* (NDVI), propuesto como IA por la ONU. A nivel de término municipal, a partir de una imagen de reflectividad del sensor MODIS con resolución de 500 m . La aplicación utilizada fue SOVMAP siguiendo el esquema de trabajo que se muestra a continuación:

- 1º- Obtención de imágenes.
- 2º- Importación de imágenes al software de proceso.
- 3º- Preparación de los datos.
- 4º- Cálculo de las variables sensor e indicador.
- 5º- Cálculo por entidades territoriales.

Se utilizaron imágenes correspondientes a una síntesis de 8 días con una resolución de 500m.

Tras el proceso de importación de los archivos HDF al entorno de trabajo de SOVMAP, se procedió a seleccionar los datos según la variable sensor que se fuera a obtener, de forma que estuvieran agrupadas en un único documento multibanda.

Dada la distribución en teselas de los datos de MODIS, se necesitaron cuatro archivos para cubrir la Península Ibérica y otro más para Canarias.

Se utilizó la capa de términos municipales en formato ráster, georreferenciada y en coordenadas UTM, huso 30 y también se georreferenció la imagen MODIS, de forma que ambas tuvieran el mismo sistema de referencia.

Una vez que se obtuvo la imagen de la zona de trabajo, se procedió al cálculo de la variable seleccionada, en este caso el NDVI, cuya expresión, particularizada al sensor MODIS es:

$$NDVI = \frac{R_{B2} - R_{B1}}{R_{B2} + R_{B1}}$$

Siendo:

R_{B1}: banda del rojo

R_{B2}: banda del infrarrojo cercano

Con la capa de entidades territoriales, se enmascaró la capa de la variable calculada, para limitarse a la zona de interés. (figuras 9 y 10)

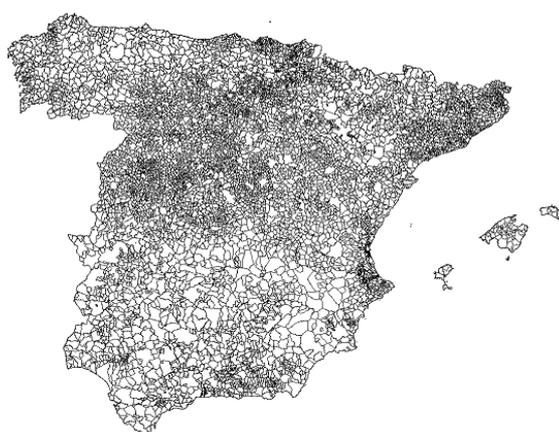


Figura 9. Términos municipales en España peninsular y Baleares.

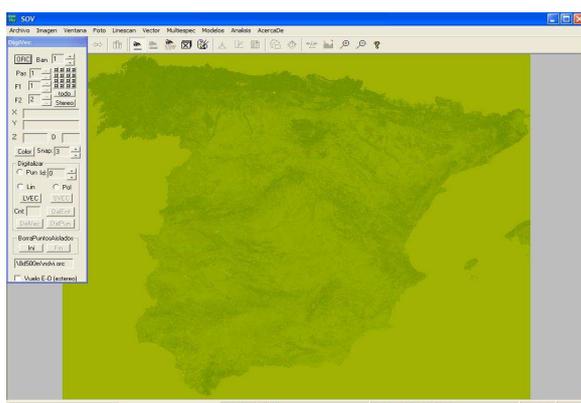


Figura 10. NDVI enmascarado.

Puesto que, en este caso, la variable sensor coincide con la variable indicador, no es necesario realizar más cálculos.

Para obtener el valor del indicador ambiental seleccionado por entidades territoriales, se obtuvo un archivo de texto, con el valor medio de la variable en cada uno de los términos municipales. (Figura 11 y 12)

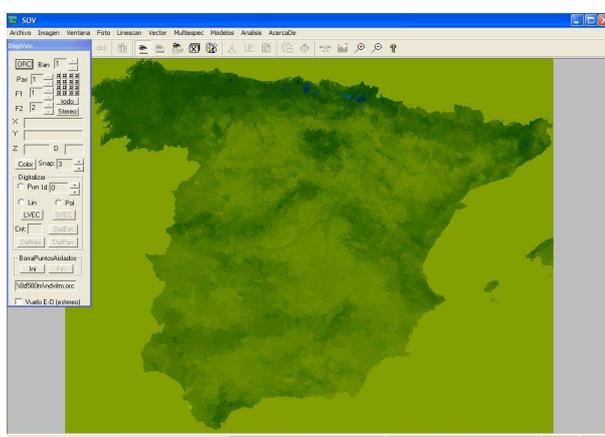


Figura 11. NDVI calculado por términos municipales.



Figura 12. Detalle de polígonos con valor de la variable.

B) A partir de bases de datos de usos y ocupación del suelo

El objetivo de este ensayo fue la obtención de indicadores ambientales agrupados por entidades territoriales, a partir de CORINE Land Cover 2000. En la realización de los cálculos necesarios para la obtención de IA se utilizó SOVMAP con el siguiente esquema de trabajo:

- 1º- Preparación de los datos de partida.
- 2º- Obtención de las variables indicador.
- 3º- Cálculo del IA por entidades territoriales.

Como dato de partida se disponía de la base de datos CORINE Land Cover 2000.

Únicamente eran de interés n clases de ocupación de suelo para el cálculo del IA seleccionado, en este caso la superficie forestal, por lo que se realizó la correspondiente reclasificación de forma que se obtuvo un documento con $n+1$ clases, asignando el valor 0 a las clases que no interesen, y 1, 2,... a las restantes. (figura 13)

Una vez obtenido el documento de clases de interés, se procedió a su conversión a ráster, para poder superponer la capa de términos municipales (Figura 9) y realizar los análisis posteriores.

Se obtuvo un archivo de texto, con los porcentajes de ocupación de cada entidad territorial por cada clase de pertenencia. (Figura 15 y figura 16)

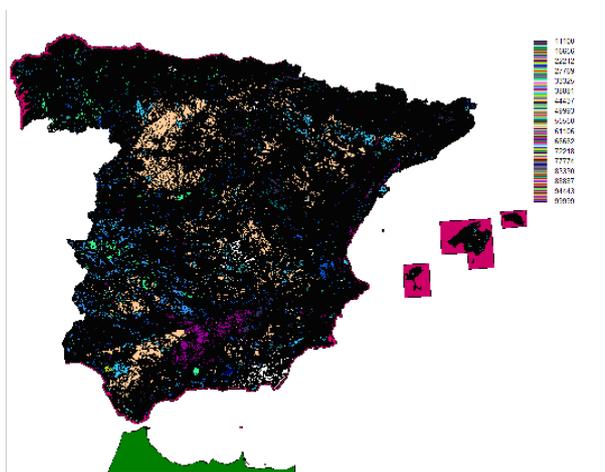


Figura 13. Documento de coberturas.

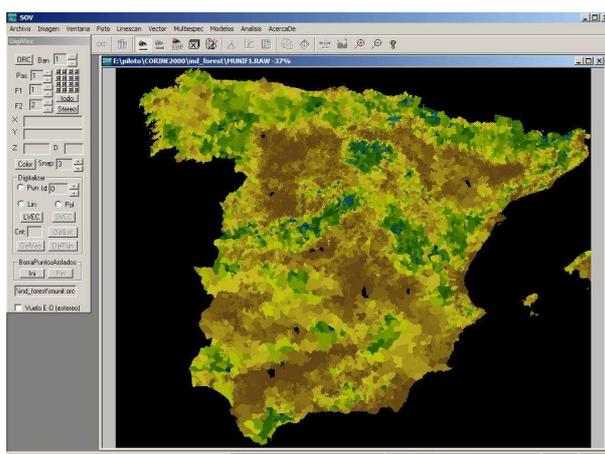


Figura 15. Porcentaje de zonas forestales por término municipal.

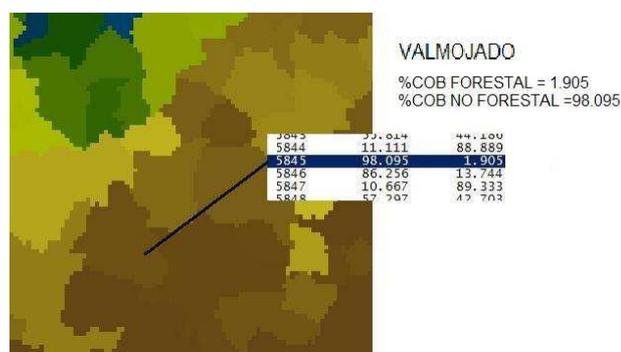


Figura 16: Detalle de polígonos con la cuantificación de la ocupación.

9. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tras el análisis de los organismos proponentes de indicadores como Naciones Unidas, Agencia Europea del Medio Ambiente, Indicadores para el Mediterráneo, Ministerio de Medio Ambiente y Observatorio de la Sostenibilidad en España, se seleccionaron finalmente 27 indicadores relativos a la ocupación del suelo.

En relación con los anteriores indicadores se seleccionaron 17 variables procedentes de sensores correspondientes a satélites de media y baja resolución con el criterio de su facilidad de obtención y el conocimiento de su metodología.



Resultó fundamental el desarrollo e implementación de la base de datos y la aplicación informática BDIAT que permitió analizar y considerar la diversidad y amplitud contextual del problema.

Tras la revisión de la información relativa a indicadores ambientales, y la definición de los usuarios potenciales y requerimientos de los mismos, se puede afirmar que un número considerable de IA tipificados (27) y de variables sensor (56), pueden obtenerse mediante métodos de *teledetección operativa*, empleando sensores de media y baja resolución espacial o, alternativamente, a partir de bases documentales de ocupación del suelo (SIOSE, CLC 2000). Los métodos propuestos tienen un planteamiento genérico, de manera que, entre otras ventajas, es posible su modificación para adaptarla a otras resoluciones, sean de tipo espacial, espectral, temporal o radiométrica.

Existen datos crudos de sensores multiespectrales, así como variables precalculadas, lo que aumenta el número de IA que es posible obtener, al mismo tiempo que simplifica la complejidad de los métodos de cálculo.

Del estudio de los potenciales usuarios se ha deducido que existe un cierto número de entidades y organismos interesados en la adquisición de los indicadores ambientales seleccionados en este trabajo.

Tras la aplicación de los modelos, se ha comprobado que la resolución de los datos de partida condiciona la entidad territorial de análisis. En el supuesto de utilizar sensores de media y baja resolución espacial, la entidad administrativa más pequeña en la que es posible calcular IA es el término municipal.

Los autores quieren agradecer su colaboración al personal del área de Teledetección del IGN, al personal administrativo de LatinGeo, a Javier Querol de la ETSI Topografía G.C. y a todas aquellas personas y entidades que de una forma u otra, han hecho posible este trabajo.



10. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Luengo, F. "El medio ambiente en la estadística española" Revista Fuentes Estadísticas. Número 41. Febrero 2000.

Bock M. "Spatial Indicators for European Nature Conservation". German Aerospace Center (DLR). Project funded by the European Community under the FP5 EESD Programme (1998-2002). 2003

Brown TN, Wolter, P., Niemi, G., Johnston C.
"Development of Environmental Indicators for the US Great Lakes Basin Using Remote Sensing Technology". NASA. 2001
<http://glei.nrri.umn.edu/default/remotsense.html>

Bruce K. "Evaluating Environmental Quality Using Spatial Data derived from Satellite Imagery and Other Sources". EPA Science Forum. USA. 2004 (18-28 pp)

Diario Oficial de las Comunidades Europeas "Versión consolidada del Tratado de la Unión Europea", artículo 2., 2002

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente.
"Perfil Ambiental de España 2006. Informe basado en indicadores". 2006. Ed., Ministerio de Medio Ambiente.
http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/perfil_ambiental_2006/

Economic and social Council, United Nations. "Remote Sensing of the Eurasian environment". 2002 (2-3 pp)

Gabrielsen, P. and Bosch. P., "Environmental Indicators." European Environment Agency. 2003

INSPIRE: 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2007, por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea.



Jimenez Herrero, L., Prieto del Campo, F., Riechmann Fernández, J. "Sostenibilidad en España 2005. Informe de primavera", noviembre 2005. Ed. MUNDI-PRENSA LIBROS, S.A.

Liping Di " The Development of Remote-Sensing Related Standards at FGDC, OGC, and ISO TC 211." 2003.

Mediterranean Strategy for Sustainable Development. Mediterranean Action Plan. United Nations Environment Programme
<http://www.planbleu.org>

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. "Tronco Común de Indicadores: Indicadores Ambientales". Ed. Ministerio de Medio Ambiente.

Ministerio de Fomento. Instituto Geográfico Nacional. CORINE Land Cover 1990. 2008

Ministerio de Fomento. Instituto Geográfico Nacional. Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España. 2008

Wallace J., Campbell N. "Evaluation of the Feasibility of Remote Sensing for Monitoring National State of the Environment Indicators". Department of Environment of Australia. 1998

Wood G.A., Loveland P.J. y Kibblewhite M.G. "The use of remote sensing to deliver soil monitoring". National Soil Resources Institute. Cranfield University, Silsoe. 2004.

Páginas Web

European Environmental Agency Página Web de la Agencia Europea de Medio Ambiente: <http://www.eea.eu.int>
(Consulta: Septiembre 2008)

EUROSTAT:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>



(Consulta: Septiembre 2008)

MODIS:

<http://www.modis.gsfc.nasa.gov/>

(Consulta: Septiembre 2008)

Naciones Unidas. Indicadores Ambientales:

<http://www.un.org>

(Consulta: Septiembre 2008)

Observatorio de la Sostenibilidad en España. "Sostenibilidad en España 2006":

<http://www.sostenibilidad-es.org>

(Consulta: Septiembre 2008)

OCDE "Key environmental indicators": <http://www.oecd.org/dataoecd/20/40/37551205.pdf>

(Consulta: Septiembre 2008)

PNUMA:

http://www.pnuma.org/sociedad_civil_n/acerca.html

(Consulta: Septiembre 2008)

SPOTIMAGE:

http://www.spotimage.fr/html/_253_255_265_275_276_.php

http://www.spotimage.fr/html/_253_311_.php

(Consulta: Septiembre 2008)

Unión Europea EIONET:

<http://www.eionet.europa.eu/>

(Consulta: Septiembre 2008)