

Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Sistemas Informáticos y Computación



Acelerando la generación automática de mapas de emisividad en el infrarrojo térmico mediante OpenCL

Trabajo Fin de Máster

Máster en Inteligencia Artificial, Reconocimiento de Formas
e Imagen Digital

Autor:

Eduardo Caselles Martí

Director:

Francisco J. Abad Cerdá

28 de junio de 2012

A mi divertida familia.

Resumen

La medida a distancia de la temperatura de la superficie terrestre desde satélites artificiales permite obtener una visión global de esta magnitud de forma continua y periódica. Esto permite el estudio de su evolución en el tiempo y el espacio, y tiene importantes aplicaciones en diversos campos científicos como la predicción meteorológica, la detección de incendios forestales, el cambio climático, etc.

El problema fundamental de realizar esta medida a partir de datos de satélite es la necesidad de corregir los efectos debidos a la absorción de la atmósfera y a la emisividad de la superficie medida. Estas correcciones se realizan empleando un algoritmo de tipo split-window, que tiene una dependencia explícita con la emisividad.

El objetivo principal del presente trabajo ha consistido en diseñar un algoritmo que combine el método de cobertura vegetal y los mapas de usos de suelo GlobCover, e implementar una aplicación que permita calcular y generar, de forma completamente automática, mapas de emisividad del territorio europeo a partir de imágenes tomadas por el sensor AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer) del satélite Envisat de la ESA. Estas imágenes se combinarán para formar composiciones mensuales, de modo que se minimice el efecto derivado de la nubosidad.

El algoritmo diseñado permite calcular la emisividad efectiva en una superficie heterogénea, a partir de los usos de suelo en dicha superficie y el porcentaje de cobertura vegetal que contiene, de forma automática, con un error menor del $\pm 1\%$ en la mayoría de superficies.

Además, debido a que éste tipo de productos forman parte de las entradas de otros procesos más costosos, en este trabajo se ha empleado la programación de propósito general en la GPU para reducir el tiempo de ejecución necesario para producir los mapas de emisividad. Se ha utilizado la tecnología OpenCL, para implementar dicha solución.

La importancia de este trabajo radica en que, hasta ahora, no existían mapas específicos para este sensor ni un algoritmo que permitiera producirlos de forma automática.

Abstract

The remote sensing measurement of land surface temperature from satellites provides a monitoring of this magnitude on a continuous and regular basis, which is a critical factor in many research fields such as weather forecasting, detection of forest fires or climate change studies, for instance.

The main problem of measuring temperature from space is the need to correct for the effects of the atmosphere and the surface emissivity. These corrections are done using a split-window algorithm.

Therefore, the goal of this work is to propose an automatic procedure based on the Vegetation Cover Method, combined with the GLOBCOVER land surface type classification to automatically obtain land surface emissivity maps for AATSR split-window bands and to develop a system which implements it.

The emissivity estimates have been compared with ground measurements in two validation cases in the area of rice fields of Valencia, Spain. The results show that the error in emissivity of the proposed methodology is of the order of $\pm 1\%$ for most of the land surface classes considered.

This type of products are part of the inputs of more complicated processes, so in this paper the general purpose programming on the GPU paradigm has been applied to reduce the execution time required to produce the emissivity maps. OpenCL technology was used to implement this solution.

The importance of this work is that no maps for this specific sensor nor an algorithm to produce them automatically were available until now.

Agradecimientos

Cuando escribía estas mismas líneas en la memoria de mi Proyecto Fin de Carrera, recuerdo pensar que entonces se cerraba *“un gran ciclo en mi vida, el final de mi educación y con ella, la vida como la he conocido estos últimos 20 años”*. Casi tres años después, me encuentro escribiendo la memoria de éste Trabajo Fin de Máster, quedando en evidencia que no podía estar más equivocado. Y es que, si algo he descubierto en éste tiempo, y cursando el Máster IARFID, es que la educación de uno mismo no es un proceso con fecha de finalización. No se deja de aprender y descubrir cosas nuevas nunca de un día para otro. La educación es un proceso que te acompaña durante toda tu vida.

Pero la verdad es que, si por el camino te cruzas con la gente adecuada, se convierte en algo mucho más divertido y apasionante. Por eso, quiero comenzar agradeciendo a todas las personas que me han ayudado en mayor o menor medida a estar donde estoy.

Agradecer a mi director, Paco, por las horas dedicadas a escucharme, ayudarme, aconsejarme y criticar mi trabajo. Pero sobre todo, por saber cómo motivarme desde el primer año de carrera.

A Enric, por hacerme sitio en una unidad de Investigación como la suya. Por acoger a un informático entre físicos y por saber, siempre, cómo hacer que un buen trabajo se convierta en un trabajo brillante.

Al profesor César Coll y a mis compañeros del Grupo de Teledetección Térmica: Vicent, Carolina, Mar, Juanma, María Ángeles, María, Facundo, Jorge y Xumi, por ofrecerse a echarme una mano siempre que fuera posible.

A los profesores y compañeros del Máster, por dedicar parte de su tiempo a permitirme aprender cosas nuevas con ellos.

A mis padres y hermano, por estar siempre ahí, en lo bueno y en lo malo y sobre todo, por tener siempre un consejo para ayudarme, unas palabras para animarme y una crítica para hacerme mejor persona.

A mis abuelos, por demostrarme cada día que por mucho que aprendas, siempre te quedará mucho más por aprender.

A Celia, por haberme ayudado y animado desde el primer hasta el último día, siendo

una luz brillante entre sombras. Demostrándome que uno debe luchar por conseguir lo que quiere, pase lo que pase y cueste lo que cueste. Porque, a veces, los sueños se hacen realidad.

Finalmente, a mis amigos y compañeros, por haber compartido conmigo algunos de los mejores momentos de mi vida, dentro y fuera de las aulas. Así como por haberme comprendido cuando este trabajo y esta memoria me han impedido estar con ellos.

Índice general

1. Introducción	13
1.1. Presentación del problema	14
1.2. Interés del conocimiento de la emisividad	14
1.3. Factores que afectan a la emisividad	18
1.4. Objetivo del trabajo	21
1.5. Importancia del tiempo en el cálculo de la emisividad	21
1.6. Bondades de la solución propuesta	23
1.7. Estructura de la memoria	24
2. Antecedentes	25
2.1. El modelo teórico de emisividad	26
2.2. El método de la cobertura vegetal	29
2.3. Comparación con otros modelos	31
2.4. Programación de ámbito general en la GPU	34
2.4.1. Planteamiento del problema	34
2.4.2. Introducción a la GPGPU	35
2.4.3. Estado del arte	36
2.5. Introducción a OpenCL	37
3. Metodología	41
3.1. Los datos de entrada del modelo	42
3.2. Metodología empleada por el modelo	43
3.2.1. Cálculo de la emisividad	43
3.2.2. Clasificación de usos de suelo	45

3.2.3. Detección de agua o nieve	47
3.3. Descripción del algoritmo	48
3.3.1. Flujo de la información	49
3.3.2. Algoritmos diseñados	51
3.4. Aceleración del sistema	56
3.4.1. Necesidad de acelerar los cálculos	56
3.4.2. Aceleración del algoritmo mediante el uso de la GPU	57
4. Resultados	63
4.1. Desarrollo de un ejemplo completo	64
4.1.1. Datos de entrada	64
4.1.2. Datos intermedios	67
4.1.3. Datos de salida	69
4.2. Desarrollo de una composición mensual	70
4.3. Estudio de la emisividad a nivel anual	73
4.4. Evaluación del sistema	76
4.4.1. Análisis de sensibilidad	76
4.4.2. Validación con datos de suelo	76
4.5. Análisis del rendimiento de la versión paralelizada	77
4.5.1. Preparación de los experimentos	78
4.5.2. Comparación del rendimiento de ambos algoritmos	78
5. Conclusiones	81
5.1. Conclusiones del trabajo realizado	82
5.2. Publicaciones derivadas	83
5.3. Trabajo futuro	84
Apéndice A. Lista de símbolos, siglas y abreviaturas	95
Apéndice B. Leyenda GlobCover (Western Europe)	96

Índice de figuras

1.1.	Transmisividad atmosférica espectral para tres atmósferas estándar típicas.	16
1.2.	Curvas espectrales de emisividad para tres superficies naturales típicas: roca (piedra arenisca), suelo (aridisol) y vegetación (pino blanco) (Salisbury y D'Aria, 1992 y 1994).	19
1.3.	Variación angular de la emisividad para tres superficies típicas: mar (Masuda et al., 1988), suelo (Labeled y Stoll, 1991) y vegetación (Norman et al., 1994).	20
1.4.	Corrección de emisividad en términos de la longitud de onda para las mismas superficies de la Ilustración I.2: (a): 3,4-4,2 μm , (b) 8,0-9,5 μm y (c) 10,0-12,5 μm (Valor, 1997).	22
2.1.	Esquema de radiancias directas y primeras reflexiones que tienen lugar dentro de las cavidades definidas entre dos elementos de vegetación contiguos.	28
2.2.	Modelo de cajas lambertianas infinitas propuesto por Sutherland y Bartholic (1977) para el cálculo de los factores de forma.	29
2.3.	Comparación de los resultados obtenidos en el análisis de los tres algoritmos estudiados.	32
3.1.	Diagrama de flujo principal del sistema encargado de producir los mapas de emisividad.	50
3.2.	Ejemplo de píxel de 1km de resolución interpolado en píxeles de 300m, según el algoritmo de interpolación por proporción de áreas ocupadas.	55
3.3.	Diagrama de flujo con las partes procesadas por la GPU marcadas en amarillo.	61
4.1.	Imagen AATSR de la Comunidad Valenciana (20/07/2007), con las reflectividades en el rojo (canal de 650 nm).	65

4.2. Imagen AATSR de la Comunidad Valenciana (20/07/2007), con las reflectividades en el infrarrojo próximo (canal de 865 nm).	65
4.3. Imagen AATSR de la Comunidad Valenciana (20/07/2007), con las reflectividades en el verde (canal de 555 nm).	66
4.4. Imagen GlobCover para Europa Occidental (ver la leyenda regional asociada en el Apéndice B)	66
4.5. Mapa de usos de suelo, según clasificación GLC (ver la leyenda regional asociada en el Apéndice B) de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).	67
4.6. Mapa de NDVI de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).	68
4.7. Mapa de cobertura vegetal (P_v) de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).	68
4.8. Mapa de emisividad media (canales 11 y 12 μm) de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).	69
4.9. Banda de confianza generada (píxeles válidos en blanco) para el producto de emisividad de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).	70
4.10. Mapa de Europa en el que se muestra la superficie medida por el sensor AATSR en una pasada del satélite Envisat por Europa (07/07/07 10:27).	71
4.11. Mapa de cobertura vegetal (P_v) de Europa (julio de 2007).	72
4.12. Mapa de emisividad media (canales 11 y 12 μm) de Europa (julio de 2007).	72
4.13. Banda de confianza (píxeles válidos en blanco) generada para el producto compuesto de Europa (julio de 2007).	73
4.14. Mapas mensuales de cobertura vegetal de la superficie europea durante el año 2007. Los píxeles en blanco corresponden a superficies con agua o nubes.	74
4.15. Mapas de emisividad mensuales de la superficie europea durante el año 2007 para el canal de 11 μm del sensor AATSR.	75
4.16. Comparación del tiempo de ejecución (en milisegundos) de cada una de las versiones (secuencial y paralelizada) del algoritmo principal del sistema, en función del número de píxeles de la imagen procesada.	79
B.1. Leyenda GlobCover con la clasificación regional de usos de suelo para Europa occidental.	97

Índice de tablas

3.1. Tabla de emisividades según usos de suelo, con los valores de los parámetros del modelo para los canales 11 y 12 μm (Caselles et al., 2009a).	45
3.2. Correspondencias entre las clases del producto GlobCover para Europa Occidental y las clases de la Tabla de emisividades (Caselles et al. 2009a).	46
3.3. Ejemplo de ejecución del algoritmo de interpolación por proporción de áreas ocupadas, para el píxel de la Figura 3.3	55
4.1. Comparación de valores experimentales y calculados, para las emisividades de los canales centrados en 11 y 12 μm (Caselles et al., 2009c).	77

Capítulo 1

Introducción

La temperatura de la superficie terrestre es un parámetro que interviene en muchos procesos físicos de importancia, de ahí el interés existente en su determinación, tanto a escala local, como regional o mundial. El uso de sensores instalados en satélites es fundamental para cartografiar la temperatura de la superficie terrestre de forma eficiente.

Estos sensores permiten retratar las características térmicas de la superficie mediante la generación de complejas imágenes. Los procedimientos necesarios para interpretarlas conllevan elaborados métodos de corrección, análisis, parametrización y validación. La informática permite realizar los cálculos derivados de todos estos procedimientos de forma automática y veloz.

En este capítulo repasamos los problemas principales que se derivan de la medida de la temperatura de la superficie terrestre desde satélites, haciendo especial hincapié en la determinación de la emisividad de la superficie terrestre, revisando los factores más sobresalientes que afectan a su obtención desde satélites. Éste procedimiento constituye el objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster.

Posteriormente, veremos la necesidad de optimizar el coste temporal del cálculo de la emisividad, debido a la importancia de reducir el tiempo empleado en obtener la temperatura en la mayoría de sus principales aplicaciones. Este Trabajo Fin de Máster se ha llevado a cabo en el Departamento de Sistemas Informáticos y Computación de la Universidad Politécnica de Valencia, en colaboración con el Grupo de Investigación de Teledetección Térmica del Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de la Universidad de Valencia.

1.1. Presentación del problema

La temperatura de la superficie (tanto marina como terrestre) de la Tierra es una magnitud física de importancia fundamental en muchos de los procesos que tienen lugar en la Biosfera. Entre otros podemos citar: el intercambio de energía, masa y momento entre la atmósfera y la superficie terrestre; la circulación oceánica y atmosférica; procesos de evaporación y transpiración en superficies acuosas, suelos y masas vegetales; etc.

Prueba de ello es que la temperatura se puede emplear para estudiar diversos fenómenos relacionados con los procesos que hemos mencionado. Algunas de las aplicaciones más conocidas son: el uso de la temperatura en modelos de predicción meteorológica y climatológica; como indicador del cambio climático global; como indicador para el seguimiento de procesos de desertización; el análisis de la constitución geológica de una zona; el estudio de las corrientes marinas; la localización de bancos de pesca; la estimación de la evapotranspiración de los cultivos; la estimación de la humedad del suelo; la predicción y evaluación de heladas; la predicción y evaluación de incendios; los estudios vulcanológicos; etc.

Con estos ejemplos queda patente la diversidad de información que puede extraerse de los datos térmicos. Ello justifica la necesidad de desarrollar métodos para hacer un cartografiado de la temperatura de la superficie terrestre con la precisión requerida en cada caso. Es evidente que el único modo de llevar a cabo tal fin es usando técnicas de teledetección, para garantizar una cobertura total de la superficie analizada, sea cual sea la escala de estudio. Ciertamente, las medidas realizadas por las redes sinópticas de estaciones meteorológicas situadas en tierra, y por boyas fijas, boyas móviles y barcos en el mar, pueden ser más precisas y exactas que las efectuadas desde un sensor a bordo de un satélite. Sin embargo, presentan limitaciones evidentes. Quizás la más importante sea el hecho de que las medidas tienen carácter puntual, con lo que los “mapas de temperatura” se obtienen extrapolando espacialmente dichas medidas mediante métodos geoestadísticos. Otra limitación es la existencia de extensas regiones del planeta que quedan sin cubrir, debido a su inaccesibilidad.

En cambio, un sensor a bordo de un satélite puede proporcionar medidas a escala mundial y con una cobertura completa. Este tipo de medidas son un valor efectivo sobre una cierta extensión de terreno, cuyas dimensiones dependen de la resolución espacial del sensor. La realización de estas medidas conlleva una serie de dificultades, tanto de tipo técnico como de carácter físico, que revisamos a continuación.

1.2. Interés del conocimiento de la emisividad

En la medida de la temperatura por teledetección, un sensor mide la radiación emitida por la superficie observada, en un intervalo espectral más o menos amplio.

1.2. INTERÉS DEL CONOCIMIENTO DE LA EMISIVIDAD

La radiación térmica puede medirse tanto en el infrarrojo, como en las microondas. Generalmente, se usa el primero cuando nos interesa la temperatura de la superficie. En cambio, las microondas se utilizan en zonas con una alta cobertura nubosa (Schmugge, 1995). Centrando nuestro interés en la temperatura, la región de 8-14 μm es la más utilizada, pues en ella se da el máximo de emisión a las temperaturas terrestres (de ahí el nombre de *infrarrojo térmico*).

El primer paso en la interpretación de la medida de temperatura realizada por tele-detección es el calibrado del sensor, es decir, establecer la relación entre la señal proporcionada por el instrumento y la radiación medida en el intervalo espectral considerado. Esta cuestión tiene su importancia, ya que los elementos sensores suelen degradarse con el paso del tiempo, con lo que es preciso recalibrar el instrumento con una cierta periodicidad. Generalmente, los sensores van provistos de un sistema de calibrado interno que permite realizar esta operación en vuelo, como es el caso del sensor AATSR (*Advanced Along Track Scanning Radiometer*) del satélite Envisat.

Una vez calibrado correctamente el sensor, el siguiente paso es la detección de nubosidad en la imagen. Esto es necesario para evitar el procesado de píxeles parcialmente nubosos, que daría lugar a resultados incorrectos. Existen numerosos algoritmos para tratar esta cuestión, aunque en la actualidad, los sensores van dotados de implementaciones de estos algoritmos, de forma que realizan automáticamente la detección de los píxeles válidos, tras tomar las medidas. De nuevo, es el caso del AATSR, el sensor empleado en este Trabajo Fin de Máster.

Después de realizar estos dos pasos previos, obtenemos una medida de la temperatura a nivel de satélite. Para obtener, a partir de ella, la temperatura a nivel de la superficie hemos de tener en cuenta la presencia de la atmósfera, y el carácter emisivo de la superficie observada. El principio físico que rige la emisión de energía por una superficie es la *ley de Planck*, la cual determina la radiación monocromática emitida por un *cuerpo negro* (emisor perfecto) en función de su temperatura. Aunque algunas superficies se acercan a este comportamiento ideal, la mayor parte de las superficies naturales emiten menos energía que el cuerpo negro. Además, la tasa de emisión suele cambiar espectralmente. Es la *emisividad* el concepto físico que representa esta peculiaridad. La podemos definir como la capacidad de un cuerpo para emitir radiación a una temperatura dada, en relación al cuerpo negro. Matemáticamente, es el cociente entre la radiación emitida por una superficie y la que emitiría el cuerpo negro a la misma temperatura. El conocimiento de este parámetro es necesario para obtener la temperatura con exactitud.

Además del diferente carácter emisivo de las superficies naturales, la radiación que emerge de ellas debe atravesar la atmósfera en su camino hacia el sensor. En la región infrarroja la atmósfera no es transparente, sino que modifica en mayor o menor medida esa radiación mediante fenómenos de *absorción* y *emisión*.

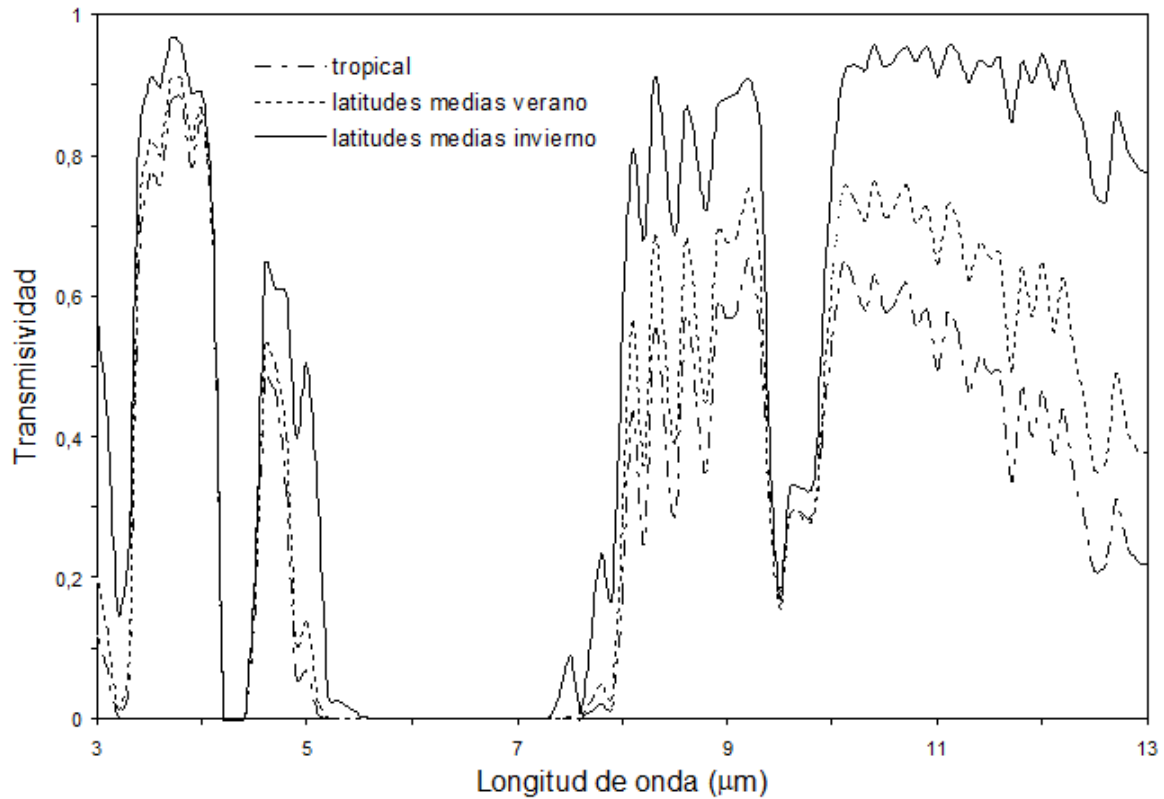


Figura 1.1: Transmisividad atmosférica espectral para tres atmósferas estándar típicas.

Los componentes atmosféricos absorben parte de esa energía, y por otro lado emiten radiación propia, modificando así la señal original. Como la emisión atmosférica se produce en todas direcciones (también hacia el suelo), y las superficies no son cuerpos negros perfectos (reflejan una parte, aunque pequeña, de la radiación que reciben), se produce un acoplamiento del efecto atmosférico y de emisividad, es decir, parte de la radiación atmosférica emitida hacia abajo es reflejada hacia el sensor. En ciertas condiciones particulares, la reflexión atmosférica puede compensar el efecto de emisividad, del mismo modo que algunas veces la emisión atmosférica puede compensar la absorción. Pero en general esto no ocurre, con lo que es necesario desarrollar estrategias para eliminar las perturbaciones atmosféricas.

En primer lugar debemos usar las regiones espectrales donde la atmósfera es más transparente. La Figura 1.1 muestra la transmisividad atmosférica espectral para tres atmósferas estándar con distinto grado de humedad. Podemos identificar tres regiones en las que la atmósfera es suficientemente transparente como para realizar observaciones desde un satélite, con transmisividades superiores a 0,5 (*ventanas atmosféricas*): 3,4-4,2 μm , 8,1-9,4 μm y 10,0-12,5 μm . En el resto de intervalos la absorción atmosférica es

1.2. INTERÉS DEL CONOCIMIENTO DE LA EMISIVIDAD

casi total. Debemos añadir que la región alrededor de $4,0 \mu\text{m}$ sólo puede ser usada de noche, porque durante el día la señal terrestre se ve contaminada por la radiación solar.

A pesar de la transparencia atmosférica en estas regiones, el efecto de la atmósfera sigue siendo significativo, con lo que hay que corregir los efectos mencionados de absorción y emisión propia. Podemos encontrar básicamente dos tipos de algoritmos de corrección atmosférica. Por un lado, tenemos aquellos basados en la resolución de la ecuación de transferencia radiativa a través de la atmósfera, usando medidas en un único canal (*método monocanal*). Para obtener buenos resultados es preciso tener una correcta caracterización de la atmósfera por medio de radiosondeos adecuados. Esto supone que debemos tener este dato a la misma hora y en el mismo lugar de paso del satélite, condición limitante que rara vez se da. Además, los radiosondeos son medidas puntuales, geográficamente hablando, que deben ser extrapoladas a una área más o menos extensa (a mayor extensión, menor precisión en el resultado final).

Por otra parte, podemos considerar los algoritmos que realizan la corrección mediante el uso de dos o más canales situados en bandas espectrales que se encuentren en la misma ventana atmosférica (*método split-window*) o en ventanas distintas (*método dual-window*), o bien canales con la misma localización espectral pero que observan la superficie con ángulos distintos (*método dual-angle*). En todos ellos encontramos subyacente la misma hipótesis, más o menos ajustada a la realidad según el caso: en los distintos canales, la misma atmósfera tiene unos efectos ligeramente diferentes (debido a los cambios en las condiciones de observación), pero que están correlacionados; permitiendo así, efectuar la corrección (McMillin, 1975).

Después de las correcciones de emisividad y atmosférica, tenemos una medida de temperatura a nivel de la superficie. La cuestión ahora radica en su interpretación. Generalmente la superficie terrestre es muy heterogénea, formada por diferentes elementos con distinta temperatura, con lo que su significado no resulta evidente. Para resolver la cuestión se definen parámetros efectivos que permiten caracterizar a la superficie heterogénea (Caselles *et al.*, 1992; Becker y Li, 1995). Volviendo a los métodos de corrección atmosférica y de emisividad, en un principio se desarrollaron para obtener la temperatura de la superficie del mar (Anding y Kauth, 1970; Prabhakara *et al.*, 1974; McMillin y Crosby, 1984; Strong y McClain, 1984; Coll *et al.*, 1993), donde el problema es más sencillo de resolver, ya que el mar es una superficie llana, bastante homogénea, y su emisividad es cercana a la unidad (Masuda *et al.*, 1988). Posteriormente, se ha estudiado su aplicación a la superficie terrestre (Price, 1984; Becker y Li, 1990a; Coll *et al.*, 1994a; Prata *et al.*, 1995; Coll y Caselles, 1997). En todas ellas se parametriza tanto la corrección atmosférica como la de emisividad en el mismo algoritmo. Pero para ello, la emisividad debe ser estimada externamente.

Esto plantea uno de los problemas fundamentales de la teledetección en el térmico: no es posible obtener separadamente la temperatura y la emisividad, porque el número de incógnitas del problema es siempre mayor que el de medidas (o ecuaciones) para resolver el sistema (Becker, 1980). Ello hace necesario aportar siempre alguna hipótesis

adicional. Precisamente el objetivo de este trabajo es proponer un método para determinar la emisividad de la superficie terrestre de forma automática y precisa. Pero antes de entrar en detalles, es conveniente recordar los factores que afectan a dicha magnitud.

1.3. Factores que afectan a la emisividad

En la sección anterior hemos comentado que cada superficie tiene unas propiedades emisivas características, que además cambian según la zona espectral en la que “veamos” dicha superficie. Para ilustrar este hecho la Figura 1.2 muestra curvas espectrales típicas de emisividad para tres tipos de superficies: vegetación, suelo y roca. La vegetación verde normalmente tiene una emisividad elevada (alrededor de 0,985) y poca variabilidad espectral. La signatura espectral típica de la vegetación es una curva prácticamente plana. Estas características se deben a procesos de reflexión múltiple que se dan entre las hojas, y entre la planta y el suelo bajo ella (Salisbury y D’Aria, 1992).

En cambio, las rocas y los suelos usualmente presentan emisividades más bajas, y tienen características espectrales dependiendo de su composición (efecto *reststrahlen*). Estas particularidades se deben a fenómenos de absorción que ocurren a nivel molecular, y están relacionados con transiciones entre los modos vibracionales permitidos. Por tanto, estas características dependen también de la estructura que tenga la red cristalina del material (Asrar, 1989). Como ejemplo, los mínimos de emisividad que vemos en el suelo de la Figura 1.2 alrededor de $4 \mu\text{m}$ se deben a la presencia de carbonatos en su composición. Los de la roca en esa misma zona también tienen su origen en este compuesto, y los que se aprecian entre los 8 y $9 \mu\text{m}$ se deben al cuarzo.

Además del comportamiento espectral de la emisividad, también debemos considerar sus propiedades angulares. Ello se debe a la naturaleza de la medida: los sensores miden la radiación en una dirección determinada, con lo que tanto la temperatura como la emisividad se ven afectadas por esta direccionalidad.

1.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA EMISIVIDAD

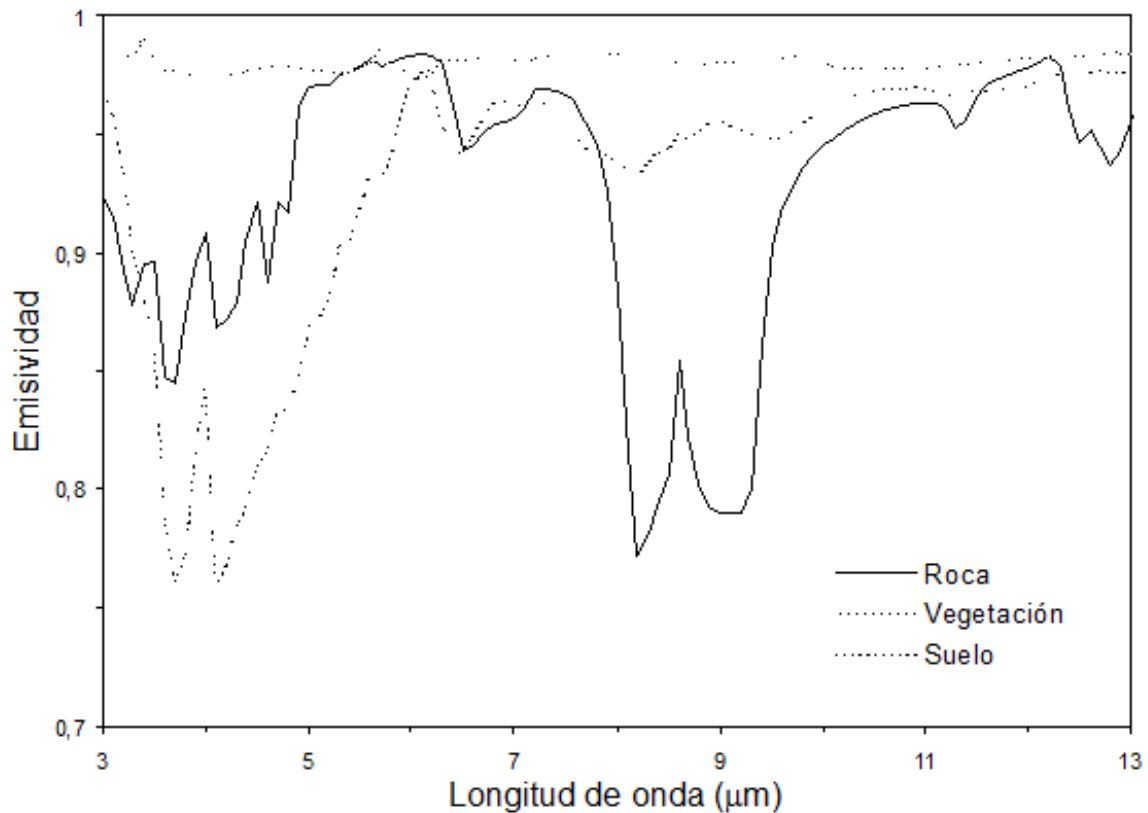


Figura 1.2: Curvas espectrales de emisividad para tres superficies naturales típicas: roca (piedra arenisca), suelo (aridisol) y vegetación (pino blanco) (Salisbury y D’Aria, 1992 y 1994).

Mientras que la temperatura puede tener un significado claro en el caso de una superficie homogénea, éste se complica en superficies heterogéneas formadas por distintos elementos con emisividades y temperaturas diferentes. Como ya hemos dicho el problema de la definición se resuelve con la introducción de parámetros efectivos, consistentes con la teoría de la radiación. Con dichos parámetros se puede simplificar en muchas ocasiones el problema, reduciendo cualquier superficie compleja a una superficie lisa y homogénea caracterizada por los mismos, y además se consigue una interpretación física de la medida radiométrica (Caselles y Sobrino, 1989).

En relación a la emisividad, la mayor parte de los modelos actuales suponen que las superficies emiten radiación por igual en todas direcciones, es decir, son *lambertianas*. Sin embargo, se ha observado cierta variación angular en superficies homogéneas. La Figura 1.3 ilustra este hecho en tres ejemplos: suelo, vegetación y agua del mar. El suelo y el agua muestran una disminución de la emisividad a medida que crece el ángulo de observación, mientras que la vegetación tiene una emisividad casi constante.

No obstante, cálculos teóricos realizados con modelos de transferencia radiativa revelan que la emisividad puede presentar características angulares en plantas, dependiendo de la orientación de las hojas y de la densidad de la vegetación (Anton y Ross, 1990; Olioso, 1995). Esta variación debe tenerse en cuenta para obtener correctamente la temperatura, aunque como vemos sus efectos empiezan a ser importantes a partir de los 30°-35°.

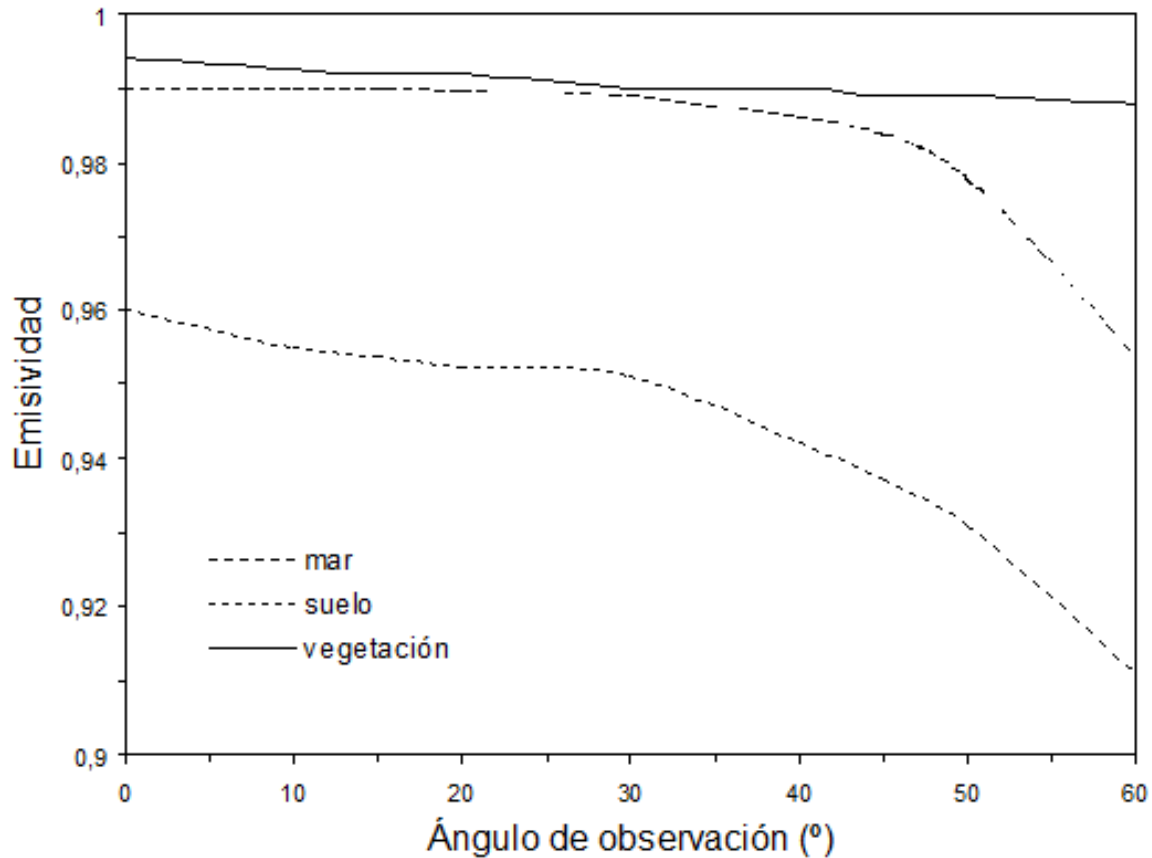


Figura 1.3: Variación angular de la emisividad para tres superficies típicas: mar (Masuda et al., 1988), suelo (Labeled y Stoll, 1991) y vegetación (Norman et al., 1994).

Para cuantificar el efecto de la emisividad en la temperatura, mostramos en las Figuras 1.4 (a), (b) y (c) la corrección de emisividad en cada ventana atmosférica, definida como la diferencia entre la temperatura real de la superficie y la temperatura del cuerpo negro que emite la misma radiancia que la superficie considerada a una longitud de onda dada. En la región 3,4-4,2 μm podemos ver una variación en la corrección entre 0,5 K y 6 K. La zona situada en 8,1-9,4 μm tiene la máxima corrección de emisividad y la mayor variabilidad (1-11 K), y finalmente la banda 10,0-12,5 μm (1-3 K) muestra los valores mínimos. Por tanto, vemos que no realizar esta corrección puede introducir importantes

1.4. OBJETIVO DEL TRABAJO

errores en la temperatura. Esto hace necesario el empleo de alguna estrategia que permita determinar la emisividad de la superficie a partir de datos de satélite. Este es uno de los objetivos principales del Trabajo Fin de Máster, como veremos seguidamente.

1.4. Objetivo del trabajo

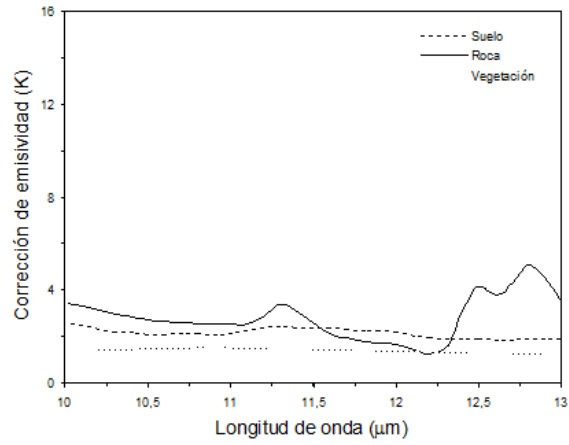
Hasta el momento, se han propuesto numerosos métodos para estimar la emisividad de la superficie terrestre basados en ideas diferentes. Los principales inconvenientes que presentan, si tenemos como objetivo final la obtención de la temperatura, son: (i) su complejidad, ya que son difíciles de aplicar operativamente, al necesitar gran cantidad de cálculos; (ii) su error, puesto que en los algoritmos complejos se da una mayor propagación de errores; y (iii) sus errores sistemáticos, que pueden ser introducidos si las aproximaciones del modelo no se cumplen exactamente.

Por ello, en este trabajo proponemos el uso de un método operativo mejorado, matemáticamente simple y sin errores sistemáticos importantes, para estimar la emisividad a partir de imágenes de satélite, con vistas a obtener posteriormente la temperatura con el menor error posible. Así pues, nuestro interés último es la temperatura y no la emisividad en sí misma. El método se inspira en los resultados de Valor y Caselles (1996), quienes obtuvieron una relación entre la emisividad térmica y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). En el presente trabajo presentamos el nuevo método y lo aplicamos a diferentes tipos de vegetación, realizando todos los cálculos de forma automática, mediante el sistema implementado.

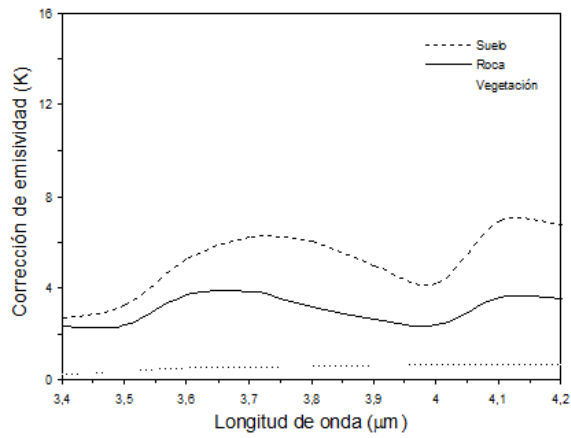
1.5. Importancia del tiempo en el cálculo de la emisividad

Como ya se ha explicado en los apartados anteriores de este capítulo, la temperatura es una magnitud física con gran variedad de aplicaciones y el correcto cálculo de la emisividad de la superficie resulta ser un parámetro corrector vital en la determinación de la misma desde satélite.

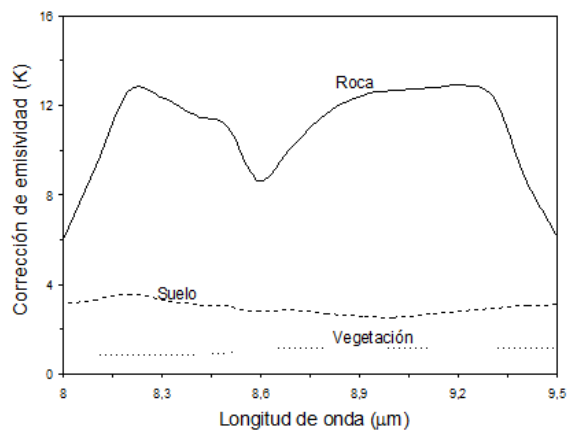
Sin embargo, la obtención de la temperatura es un proceso complejo que puede llegar a ser largo y tedioso, según la metodología que empleemos y los recursos de los que dispongamos. El problema es que algunas de sus principales aplicaciones, como la predicción meteorológica, la predicción de incendios forestales, el cálculo de la evapotranspiración o la detección de bancos de pesca, requieren disponer de los resultados del análisis con muy poco margen de tiempo, a veces prácticamente en tiempo real, ya que dichos resultados y su interpretación acarrearán diferentes decisiones en la planificación y distribución de los recursos disponibles.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.4: Corrección de emisividad en términos de la longitud de onda para las mismas superficies de la Ilustración I.2: (a): 3,4-4,2 μm , (b) 8,0-9,5 μm y (c) 10,0-12,5 μm (Valor, 1997).

1.6. BONDADES DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Por ejemplo, para la predicción de incendios, es necesaria la estimación del factor de riesgo para un día dado. En el cálculo de dicho factor intervienen numerosas variables, entre las cuales figura la temperatura de la superficie terrestre de la zona en los últimos 8 días. Por supuesto, la planificación de los recursos de prevención y contención serán diferentes y conllevarán diferente tiempo de preparación según sea el riesgo de incendio y todo ello hay que hacerlo el mismo día que se está evaluando.

Otro ejemplo en el que todavía es más patente la importancia del factor tiempo en la determinación de la temperatura sería el cálculo de la evapotranspiración. La evapotranspiración se emplea en agricultura para calcular la cantidad exacta de agua que ha perdido una superficie en un periodo de tiempo. Esto tiene una importante aplicación en la agricultura de precisión, donde el agua es un recurso valioso y no existe la posibilidad de desperdiciarla, ya que permite calcular exactamente la cantidad adecuada de agua que hay que aportar a la superficie, según la que se evaporó el día anterior para compensar su efecto sobre el cultivo.

Por tanto, queda patente la importancia de obtener la temperatura en el menor tiempo posible y por eso, el ser capaces de reducir al máximo el coste temporal de calcular la emisividad, como parámetro necesario para su cálculo favorecerá a disminuir el tiempo de cálculo total de la misma.

1.6. Bondades de la solución propuesta

En este Trabajo Fin de Máster, se detalla un sistema informático capaz de generar mapas de emisividad, a partir de imágenes de satélite, para cualquier zona de Europa. Para desarrollar dicho sistema, se propone un nuevo algoritmo para el cálculo de la emisividad. Por ello, es importante remarcar qué diferencias y mejoras aporta nuestra solución realmente:

En primer lugar, para calcular la emisividad a partir de las imágenes de satélite, se propone un algoritmo que permita hacerlo rápidamente y con gran exactitud. Decimos que se trata de un algoritmo rápido, porque se ha diseñado de forma que sea lo más eficiente posible.

De igual modo, podemos asegurar que es de gran exactitud porque, a partir de un modelo matemático, ya aceptado y bien reputado, cuya ecuación operativa es general para cualquier tipo de superficie vegetada, se le ha introducido una variante, para que el cálculo se realice obteniendo parámetros concretos de cada tipo de superficie y vegetación, teniendo en cuenta las condiciones del mismo en el momento de medida. Consiguiendo con él un error de $\pm 0,01$ en emisividad.

Y por último, la importancia del propio sistema implementado viene dada por dos factores determinantes. El primero es que el sistema es capaz de generar de forma automática mapas de emisividad, a partir de imágenes del sensor AATSR/Envisat,

aplicando el algoritmo mencionado en el párrafo anterior (del cual ya conocemos sus virtudes). Pero el segundo factor, y más importante, es que la principal utilidad del producto que obtenemos como resultado, es que, hasta ahora, no existían mapas de emisividad específicos para este sensor.

1.7. Estructura de la memoria

En el Capítulo 2, presentamos el modelo teórico de partida. Para ello introducimos el modelo geométrico de la superficie, con el cual analizamos en profundidad el modelo de emisividad. Este modelo pone las bases del posterior desarrollo operativo del algoritmo que se propone en este trabajo para calcular mapas de emisividad de forma automática. Por otro lado, también presentamos el paradigma de la programación de ámbito general en la GPU como una alternativa a la aceleración de algoritmos computacionales mediante la paralelización de los mismos a nivel de datos.

En el Capítulo 3, hacemos una revisión exhaustiva del sistema a desarrollar, detallando las características principales de los datos de entrada y los cálculos necesarios para la correcta obtención de la emisividad: cálculo del NDVI, clases de cobertura vegetal y tabla de emisividades. Posteriormente, describimos con detalle el algoritmo diseñado y el sistema implementando en este trabajo, estudiando el funcionamiento del algoritmo principal diseñado y los algoritmos secundarios en los que se apoya. Finalmente, presentamos la optimización realizada al algoritmo principal, mediante el empleo de la tecnología OpenCL, para acelerar el procesamiento y producción de los mapas de emisividad.

En el Capítulo 4, exponemos los principales resultados obtenidos; entre los que destaca la validación del modelo propuesto usando datos de campo y una comparación con el modelo original de Valor y Caselles (1996). A su vez, desarrollamos un ejemplo completo de ejecución de la aplicación implementada y el análisis de su funcionamiento. En la última parte del capítulo, realizamos una comparativa del rendimiento de ambas versiones del algoritmo, la original (secuencial) y la optimizada (paralelizada mediante el empleo de OpenCL).

Finalmente, en el Capítulo 5, exponemos los principales problemas encontrados durante el desarrollo de este proyecto, las conclusiones más sobresalientes que podemos extraer y una breve explicación de cuáles son las futuras ideas para continuar estudiando y evolucionando en esta línea de trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo presentamos y analizamos la idea básica que fundamenta el método empleado en este proyecto. En esencia, se trata de dar una justificación teórica a la relación existente entre la emisividad térmica y datos del dominio óptico, como, por ejemplo, la relación entre aquella y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), observada por van de Griend y Owe (1993).

Para ello, partimos de un modelo teórico que define la emisividad de una superficie heterogénea y rugosa general, en términos del porcentaje de cobertura vegetal, estableciendo el nexo con el dominio óptico. Y discutimos los resultados del análisis del modelo de emisividad llevado a cabo por Valor (1997), los cuales serán de utilidad para el desarrollo de una metodología operativa.

En la segunda parte de este capítulo, presentamos el paradigma de la programación de propósito general en GPUs (GPGPU). Se explicará el concepto de GPGPU, y sus principales ventajas e inconvenientes. A continuación, se enumerarán las distintas alternativas existentes en la actualidad y, finalmente, se justificará la elección de OpenCL para la implementación de este Trabajo Fin de Máster.

2.1. El modelo teórico de emisividad

Uno de los problemas fundamentales que presenta el infrarrojo térmico, es que la radiancia emitida por una superficie depende de dos variables que, en un intervalo razonable de temperaturas, se comportan de forma independiente. Éstas son la temperatura del cuerpo observado y su emisividad. Este hecho provoca que, si usamos radiometría pasiva, siempre haya una incógnita más que ecuaciones (o medidas) para resolver el problema. En consecuencia, el sistema es compatible indeterminado, y siempre es necesario buscar una hipótesis adicional, que nos permita resolver el sistema.

La idea que se propone es la de obtener la emisividad acudiendo a medidas realizadas en la región del visible, el infrarrojo cercano y el medio (de ahora en adelante denotaremos abreviadamente esta zona espectral como V/IC/IM). En lugar de usar las medidas térmicas solamente, en donde temperatura y emisividad se encuentran acopladas. En este punto, cabe mencionar que existe una gran variedad de trabajos en los que ya se han hecho intentos en este sentido, pero desde un punto de vista totalmente empírico, como por ejemplo los trabajos de van de Griend y Owe (1993), quienes obtuvieron una relación experimental entre emisividad y NDVI.

Es en esta línea donde se inscribe este trabajo. Pues pretendemos establecer una relación fundada teóricamente entre la emisividad térmica y la información obtenida en la región V/IC/IM. Con ese fin, hemos seleccionado el modelo propuesto por Caselles y Sobrino (1989), el cual considera que la superficie terrestre es un sistema heterogéneo (compuesto de partes más elementales con temperaturas y emisividades distintas) y rugoso, constituido por un suelo sobre el que la vegetación se distribuye aleatoriamente, de forma más o menos compacta.

Cada elemento vegetal se representa mediante una caja compuesta de paredes lambertianas, de anchura L , altura H y separadas una distancia S . En base a este esquema, el modelo empleado usa las siguientes aproximaciones:

1. no considera la existencia de sombras, con lo que sólo hay tres elementos distinguibles: techo, pared y suelo de la rugosidad (veáse Figura 2.1);
2. desprecia las reflexiones dobles y de orden superior que pueden existir en el seno de las cavidades definidas por la rugosidad entre sus elementos simples, aproximación que supone un error de 0,1 K en la definición de la temperatura efectiva;
3. simplifica la geometría del sistema siguiendo el modelo de cajas infinitamente largas propuesto por Sutherland y Bartholic (1977);
4. supone que la diferencia de temperaturas entre las diferentes partes del sistema es menor de 30 K, con lo que se puede usar el desarrollo de Taylor de la función de Planck y quedarse en primer orden. Con estas hipótesis Caselles y Sobrino (1989) definieron la emisividad efectiva de una superficie cualquiera en la banda i , y para un ángulo de observación q , como:

2.1. EL MODELO TEÓRICO DE EMISIVIDAD

$$\varepsilon_i(\theta) = \varepsilon_{i0}(\theta) + d\varepsilon_i(\theta) \quad (2.1)$$

donde $\varepsilon_{i0}(\theta)$ es la parte de la emisividad relacionada con la radiación que procede directamente de los elementos simples, y viene dada por la suma ponderada de sus emisividades:

$$\varepsilon_{i0}(\theta) = \varepsilon_{it}P_t(\theta) + \varepsilon_{ip}P_p(\theta) + \varepsilon_{is}P_s(\theta) \quad (2.2)$$

donde ε_{it} , ε_{ip} y ε_{is} son las emisividades del techo, pared y suelo de la rugosidad respectivamente, y $P_t(\theta)$, $P_p(\theta)$ y $P_s(\theta)$ son las proporciones observadas por el sensor de cada uno de esos elementos.

En este punto hemos supuesto que las emisividades de los elementos simples no tienen dependencia angular. Aunque hay evidencia experimental de que sí existe tal dependencia, ésta no parece ser demasiado acusada, salvo para ángulos de observación por encima de 30° . Por ello, adoptamos esta aproximación simplificando con ello nuestro modelo.

Si suponemos que el techo y la pared de la rugosidad son ambas vegetación con una única emisividad ε_{iv} y una proporción total $P_v(\theta)$, entonces la ecuación (2.2) se convierte en:

$$\varepsilon_{i0}(\theta) = \varepsilon_{iv}P_v(\theta) + \varepsilon_{is}(1 - P_v(\theta)) \quad (2.3)$$

El término $d\varepsilon_i(\theta)$ cuantifica el *efecto de cavidad*, relacionado con el exceso de radiación que emerge de la rugosidad debido a las reflexiones que la radiación sufre entre los elementos simples que la componen, como consecuencia de que presentan una reflectividad pequeña pero no nula (es decir, no se comportan como cuerpos negros perfectos). Por eso nos referiremos a él como *término de cavidad*. Viene dado por (Caselles y Sobrino, 1989):

$$d\varepsilon_i(\theta) = (1 - \varepsilon_{is})\varepsilon_{iv}F(1 - P_v(\theta)) + [(1 - \varepsilon_{iv})\varepsilon_{is}G + (1 - \varepsilon_{iv})\varepsilon_{iv}F']P_p(\theta) \quad (2.4)$$

donde F , G y F' son factores de forma que tienen en cuenta la fracción de radiación que alcanza el suelo procedente de la pared vegetal, la proporción que llega a una pared procedente del suelo y la fracción que llega a una pared procedente de la pared a la que está enfrentada.

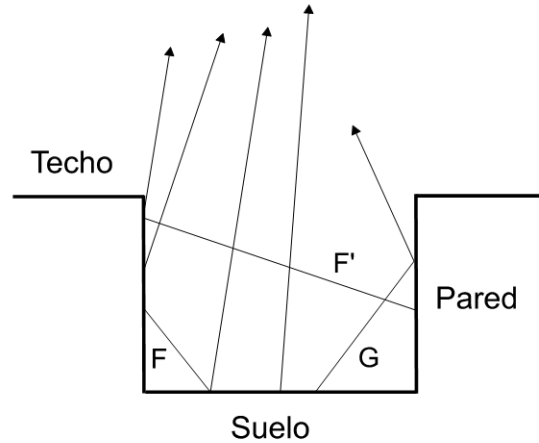


Figura 2.1: Esquema de radiancias directas y primeras reflexiones que tienen lugar dentro de las cavidades definidas entre dos elementos de vegetación contiguos.

La expresión matemática de los factores de forma depende del tipo de geometría que usemos para modelizar la superficie. Como veremos a continuación, hemos considerado que los elementos vegetales son representables por cajas de dimensiones finitas distribuidas regularmente sobre la superficie. En consecuencia podríamos usar los factores de forma que correspondan a la transferencia de energía entre este tipo de superficies. Pero en este caso, sólo estaríamos teniendo en cuenta la radiación procedente de los elementos adyacentes y no la que procede del resto del medio. Esto produciría una subestimación de la emisividad efectiva.

Para considerar todas las contribuciones de forma sencilla, es mejor usar la aproximación propuesta por Sutherland y Bartholic (1977), quienes modelizaron la vegetación mediante hileras infinitas de anchura L , altura H y separación S (ver Figura 2.2). Con esta configuración sustituimos la radiación procedente de los espacios libres que existen entre los bloques finitos por una “pared vegetal” situada en el lugar de cada espacio. De este modo, tenemos en cuenta las infinitas reflexiones procedentes del resto de elementos que configuran la superficie.

A partir de las expresiones que proporciona Kreith (1962) para la transferencia de energía entre dos superficies rectangulares, infinitas, paralelas o perpendiculares, obtenemos que:

$$F = 2 \frac{H}{S} F_{p-s} = \left(1 + \frac{H}{S} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{H}{S} \right)^2} \quad (2.5)$$

2.2. EL MÉTODO DE LA COBERTURA VEGETAL

$$G = \frac{S}{H} F_{s-p} = \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{S}{H} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{S}{H} \right)^2} \right\} \quad (2.6)$$

$$F' = F_{p-p} = \sqrt{1 + \left(\frac{S}{H} \right)^2} - \frac{S}{H} \quad (2.7)$$

donde F_{p-s} , F_{s-p} y F_{p-p} son los factores de forma de transferencia de energía pared-suelo, suelo-pared y pared-pared, respectivamente, dados en Kreith (1962). Estos últimos factores se usan con flujos de energía (magnitudes no direccionales), mientras que los factores de nuestro modelo corresponden a radiancias (magnitudes direccionales). La relación entre ambos tipos de factores, dada en las ecuaciones (2.5) a (2.7), se puede obtener fácilmente (Valor, 1997).

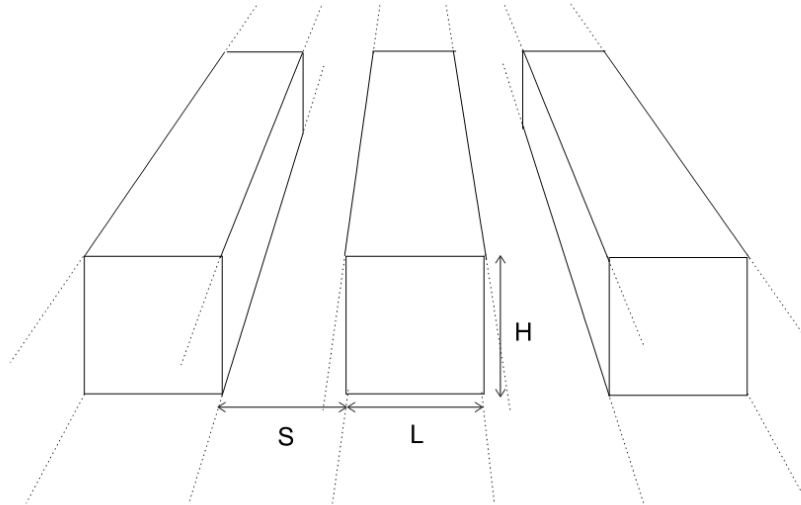


Figura 2.2: Modelo de cajas lambertianas infinitas propuesto por Sutherland y Bartholic (1977) para el cálculo de los factores de forma.

Como vemos, el término de cavidad depende de la estructura geométrica presentada por la superficie, de la emisividad de los componentes simples y de la geometría de observación.

2.2. El método de la cobertura vegetal

El modelo de emisividad, descrito en el apartado anterior, consta en esencia de un término directo de expresión sencilla que contiene el 95% del valor de la emisividad,

y de un término corrector con un orden de magnitud menor que considera el efecto de cavidad. A pesar de ello, como se demuestra en el análisis realizado en Valor, 1997, págs. 18-33 de este término, mediante el desarrollo de un modelo geométrico de la superficie, el término de cavidad no debe obviarse, pues esto conllevaría errores de hasta el 3 % en la emisividad. Por lo que debemos emplear un modo sencillo de tratarlo operativamente, dentro de un margen de error razonable. En el siguiente capítulo, explicaremos cómo podemos hacerlo mediante una sencilla ecuación operativa y el algoritmo que la calcule.

Existen métodos variados para determinar el valor de la emisividad de la superficie terrestre, con diferente grado de complejidad. En un extremo, hay investigadores que sugieren que para obtener la temperatura con datos térmicos del intervalo 10,0-12,5 μm , es suficiente el uso de un valor medio único de emisividad para toda la superficie terrestre (que estaría alrededor de 0,975). En el otro extremo, encontramos algoritmos que tratan de cartografiar la emisividad combinando diversas bandas térmicas mediante procedimientos complicados.

En este sentido, el método que proponemos trata de situarse en un término medio entre estos extremos. La idea básica es que, en el intervalo espectral considerado, la emisividad varía entre 0,960 y 1,000, y tratamos de encontrar una función de interpolación sencilla entre estos extremos, basada en el porcentaje de cobertura vegetal que modelice, lo mejor posible, el comportamiento real de la emisividad. De este modo conseguimos realizar la corrección de emisividad, pero sin tener que usar métodos excesivamente complejos.

En el apartado anterior, hemos expuesto la idea fundamental sobre la que se sustenta el método propuesto: obtener la emisividad térmica a partir de medidas en el dominio V/IC/IM. Ello se consigue mediante el uso de un modelo físico de la superficie que define la emisividad, el cual usa como parámetro de entrada el porcentaje de cobertura vegetal. Éste último puede obtenerse con datos del dominio óptico, con lo que es la magnitud que nos permite ligar ambas regiones. Podía haberse utilizado otro parámetro, pero, como se explica en Valor (1997), el porcentaje de cobertura vegetal resulta ser especialmente intuitivo.

Con las ecuaciones (2.1) a (2.4) se ha definido la emisividad efectiva de una superficie heterogénea y rugosa general a través de un parámetro vegetal que en este caso es la proporción de vegetación o cobertura vegetal (en lo sucesivo nos referiremos a esta metodología como *Método de la Cobertura Vegetal*, MCV).

Este parámetro puede estimarse mediante diversos métodos, usando datos medidos en la región V/IC/IM. Por ejemplo, podemos usar un índice de vegetación como el NDVI (Rouse *et al.*, 1974), el SAVI (Huete, 1988), el ARVI (Kaufman y Tanré, 1992), etc., o bien métodos más precisos que se basan en diferentes técnicas de modelización de la reflectividad de las superficies heterogéneas, como por ejemplo modelos lineales (Adams *et al.*, 1986), probabilísticos (Horwitz *et al.*, 1971), geométricos (Gilabert *et al.*, 1994), estocásticos (Jasinski y Eagleson, 1989), etc.

2.3. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS

La idea básica consiste en estimar dicho porcentaje con alguno de estos métodos e introducirlo en la ecuación (2.1), junto con medidas experimentales de la emisividad del suelo y de la vegetación, que se encuentren en el área de estudio, y con los parámetros que definen la geometría de la rugosidad, para obtener finalmente una estimación de la emisividad efectiva.

En este proyecto hemos optado por emplear el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). En el siguiente capítulo se detalla la forma operativa de calcularlo, como un paso más a realizar por el sistema implementado.

2.3. Comparación con otros modelos

El problema de la separabilidad de la emisividad y la temperatura en la radiancia térmica lleva ocupando más de cuatro décadas a los especialistas en el térmico. Durante este tiempo se han propuesto numerosos modelos basados en hipótesis distintas para dar solución a la cuestión con más o menos éxito. Antes de seguir con el desarrollo del algoritmo que proponemos, vamos a destacar los aspectos más importantes que se deducen de la comparación del modelo teórico expuesto con otros modelos existentes. De este modo, podemos comprobar las ventajas y desventajas del primero frente a los otros.

Para ello, recurrimos al análisis de errores aleatorios y sistemáticos, junto con la evaluación de las condiciones de aplicabilidad de cada algoritmo, realizados en Valor (1997). En dicho trabajo podemos leer una revisión exhaustiva de los algoritmos que pueden encontrarse en la bibliografía, mostrando sus características más importantes. Concretamente, se estudian el método TISI (Li y Becker (1993)) y el algoritmo de coeficientes alfa (Kealy y Hook (1993)), junto al MCV (Modelo de Cobertura Vegetal).

Para realizar esta comparación se definió y empleó la misma filosofía general para todos los métodos, consistente en comprobar el funcionamiento de cada algoritmo en condiciones óptimas de aplicación. Finalmente, también se llevó a cabo una estimación del error con que se puede obtener la emisividad con el MCV en situaciones no óptimas, pero sí más próximas a la aplicación real.

Para conferir la máxima generalidad posible a los resultados, el estudio está hecho en todas las ventanas atmosféricas del infrarrojo térmico. Para ello, considera la existencia de una banda en la región 3,7-4,1 μm (canal A), otra en el intervalo 8,1-9,4 μm (canal B) y dos bandas en la zona 10,0-12,5 μm (canales C, 10,3-11,3 μm , y D, 10,5-12,5 μm). De este modo, no sólo analiza qué métodos pueden funcionar mejor, sino también qué región del espectro conviene usar para estimar la emisividad, con vistas a obtener luego la temperatura de la superficie terrestre con el menor error posible.

Para comparar los tres métodos, vamos a considerar únicamente el caso medio del análisis de Valor (1997, págs. 48-74), donde se encuentra el límite inferior de cada uno

de ellos, es decir, el error mínimo que podemos conseguir con cada uno en términos generales.

La Figura 2.3 presenta conjuntamente los resultados obtenidos en estas condiciones. Podemos ver que en los tres casos el error disminuye con la longitud de onda, hecho que se explica por la disminución de la variabilidad de los valores de emisividad en esas regiones espectrales. No debemos pasar por alto que las condiciones de aplicación del MCV son muy diferentes de las de los otros algoritmos, por tanto hemos de situar la comparación en el contexto apropiado.

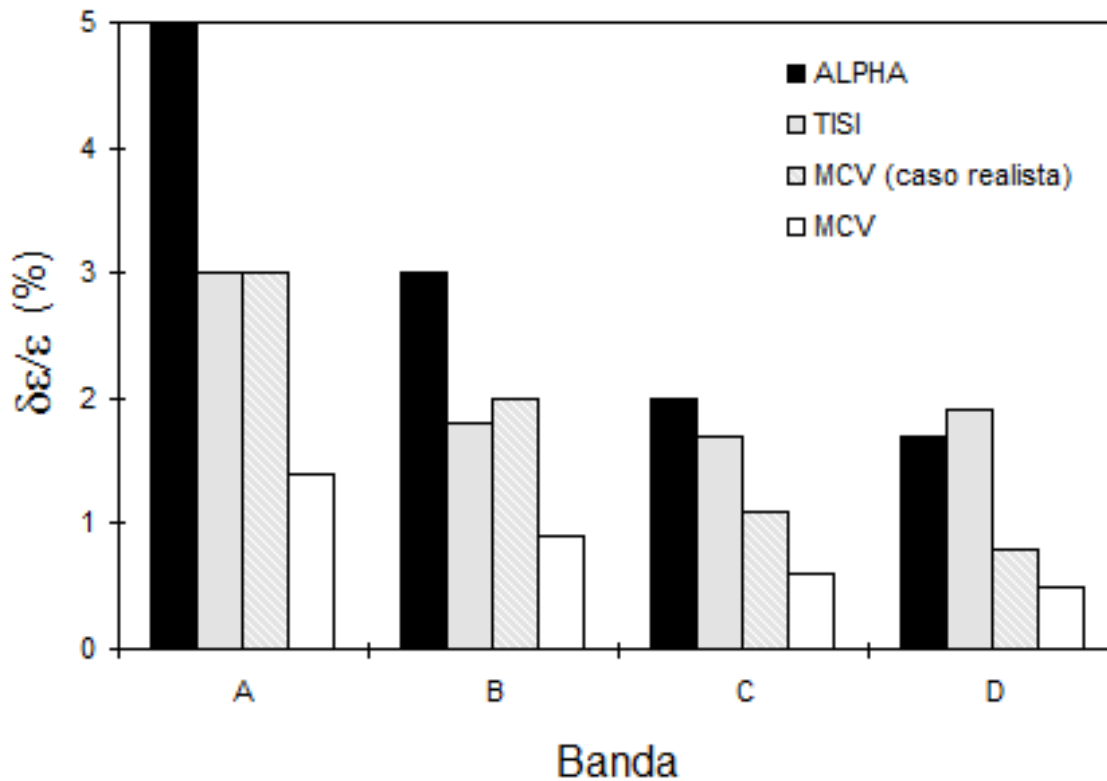


Figura 2.3: Comparación de los resultados obtenidos en el análisis de los tres algoritmos estudiados.

De ella podemos concluir que el MCV presenta un mejor comportamiento en relación a la propagación de errores. En consecuencia, este método podría ser el más favorable en la obtención de la emisividad de la superficie terrestre, dentro del marco establecido en este proyecto.

Cabe mencionar que no se consideran errores atmosféricos en el análisis del MCV, porque este método no usa radiancias térmicas para estimar la emisividad. Sin embargo,

2.3. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS

esta misma razón obliga a usar los resultados del MCV junto con un algoritmo *split-window* para obtener la temperatura de la superficie terrestre (Caselles *et al.*, 1997).

Como ya hemos explicado, estos resultados corresponden a las condiciones óptimas que podemos encontrar. Esto supone un conocimiento suficiente del área de estudio en los tres casos:

1. En el método de los coeficientes alfa tener una relación \bar{X} -varianza adecuada obtenida teniendo en cuenta sólo los tipos de superficies que existen en un área.
2. En el algoritmo TISI conocer el factor de forma angular.
3. En el caso del MCV estimar los tipos de superficies (emisividad, estructura geométrica) y sus distribuciones en el área.

Pero aparte de esto, en los dos primeros métodos existe la necesidad de tener radiosondeos apropiados para efectuar las correcciones atmosféricas (concretamente, uno para los coeficientes alfa, dos para los TISIs) de las radiancias térmicas. Ciertamente esta condición no se da frecuentemente, excepto en experimentos controlados. Más realista puede ser el uso de sondeos realizados desde los propios satélites (que son menos precisos) o el uso de atmósferas estándar que puedan ser cercanas a las condiciones particulares dadas en un área y una fecha concretas (pero que nunca van a coincidir completamente con el perfil real).

Estos procedimientos introducirán errores sistemáticos importantes en la emisividad y por tanto, es necesario tener una buena descripción de la atmósfera. El método TISI necesita además una buena estimación de la radiancia solar a nivel de la superficie y el MCV una estimación del porcentaje de cobertura vegetal en cada píxel.

Por otro lado, en el análisis (Valor, 1997, págs. 48-74) se demuestra que tanto el método de los coeficientes alfa como el TISI presentan algunas fuentes de error sistemático importantes, que tenderán a incrementar y propagar los errores considerados incluso en la mejor de las situaciones:

1. En el primer caso, tenemos las dos aproximaciones realizadas en el desarrollo teórico de los coeficientes alfa: la aproximación de Wien y la eliminación del término de reflexión.
2. En el segundo, tenemos unas aproximaciones similares y además el problema del corregistrado de las imágenes de día y de noche. Hemos comprobado que dichas fuentes pueden tener una influencia importante en el resultado final.

Además, en ambos casos, es muy difícil determinar su efecto combinado en un caso particular, donde pueden compensarse parcialmente o bien sumar sus contribuciones, siendo en cualquier caso factores incontrolables.

Por último, cabe destacar que la estimación de P_v en el MCV también puede ser una fuente potencial de error sistemático.

2.4. Programación de ámbito general en la GPU

2.4.1. Planteamiento del problema

Hoy en día, los sistemas requieren una enorme cantidad de recursos computacionales para funcionar, hasta el punto de que en la mayoría de los casos, sólo es posible satisfacer estas necesidades por medio de la paralelización de nuestros cálculos.

El núcleo de la computación paralela, consiste en el uso de varios recursos de cómputo simultáneamente para resolver un único problema, ahorrando así tiempo, dinero o ambos. La paralelización es, además, cada vez más trascendental para el mundo de la computación debido a las leyes de Moore (Moore, 1965):

1. *El número de transistores que se pueden colocar en un circuito integrado, se incrementa exponencialmente cada dos años. Cuantos más transistores mayor alcance y más rapidez de la CPU (del inglés Central Processing Unit).*
2. *Los costes de fabricación y control de calidad asociados con la producción de semiconductores aumentan exponencialmente con el tiempo. Aunque existen limitaciones físicas en los materiales de fabricación de semiconductores, que detendrán el avance exponencial de las frecuencias de reloj de las CPUs.*

En la actualidad, los últimos productos de los principales fabricantes de procesadores, Intel y AMD (*Advanced Micro Devices*), sugieren que se está alcanzando el tope, ya que ambas empresas centran una parte cada vez mayor de su investigación en las CPUs multi-núcleo en lugar de CPUs más rápidas.

En el pasado, si la ejecución de un programa resultaba demasiado costosa se compraba un hardware más potente y rápido. Sin embargo, esto ya no será posible, si tenemos en cuenta las leyes mencionadas. Por tanto, los programadores tendrán que aceptar la computación paralela con el fin de exprimir al máximo el rendimiento de sus aplicaciones.

Es por esto, que la GPGPU comienza a tener un gran peso. Debido a que con la adopción de nuevas tecnologías como CUDA (*Compute Unified Device Architecture*) de la empresa NVIDIA u OpenCL (*Open Computing Language*) comienza a ser posible aprovechar un amplio abanico de recursos de cómputo a muy bajo coste y de este modo, seguir ampliando nuestra capacidad de computación.

2.4.2. Introducción a la GPGPU

La GPGPU (del inglés *General-Purpose computing on Graphics Processing Units*) es, como su propio nombre indica, la utilización de los procesadores gráficos para el procesamiento de cualquier tipo de datos en general.

Una CPU funciona mediante la ejecución de una secuencia de instrucciones, que residen en algún tipo de memoria principal y pasan por cuatro fases durante su ciclo de vida:

1. **Búsqueda:** La instrucción se recupera de la memoria principal y se carga en la CPU.
2. **Decodificado:** Obtención del código (tipo) de operación.
3. **Ejecución:** Supone copiar los operandos a posiciones específicas o el uso de la ALU (del inglés *Arithmetic and Logic Unit*).
4. **Reescritura:** Copia el resultado a memoria, ya sea principal o un registro de la CPU.

Para hacer más rápidas las CPUs, se empezó a crear vías paralelas canalizando las instrucciones. Ello permitía más de un paso por ciclo de CPU, y la división de la ruta de datos en etapas discretas. Si bien este método se ha traducido en la creación de CPUs más rápidas, el mejor rendimiento al que se puede aspirar es una instrucción completa por ciclo (CPU escalar).

Así pues, para lograr velocidades todavía más rápidas que las conseguidas con una CPU escalar, se integran unidades de ejecución múltiple. En ellas, varias instrucciones se leen y pasan a un distribuidor, que decide cuáles se pueden ejecutar en paralelo. Se expiden a las unidades de ejecución disponibles, y éstas las ejecutan simultáneamente. Mediante la canalización de instrucciones y la adición de unidades de ejecución múltiple, las CPUs han aumentado considerablemente su grado de paralelismo, sin embargo, todavía van muy por detrás de las GPUs.

Una GPU (del inglés *Graphics Processing Units*) es un procesador específicamente diseñado para realizar un gran número de operaciones en coma flotante en paralelo. Actualmente, las tarjetas última generación, tienen gigabytes de memoria dedicada y varios cientos de multiprocesadores, con varios núcleos, ejecutando miles de hilos, todos dedicados a la realización de aritmética en coma flotante.

Por otro lado, el *Stream Processing* es una técnica utilizada para lograr una forma limitada de paralelismo, el paralelismo a nivel de datos (Khailany *et al.*, 2008). Consigue que las aplicaciones que se ejecutan, puedan usar múltiples unidades computacionales, como los procesadores de la GPU, sin la asignación explícita de gestión, sincronización o comunicación entre dichas unidades.

Por consiguiente, para aquellos algoritmos que pueden ser expresados en términos de una solución paralela, se mejora su rendimiento al ejecutarlo en una GPU y aprovechando sus grandes ventajas (de paralelismo) respecto a las CPUs, mucho más limitadas (Zhang *et al.*, 2008).

2.4.3. Estado del arte

La GPGPU no es nada nuevo. Los desarrolladores han estado empleándola durante mucho tiempo. Debido a la falta de una tecnología estándar para la GPGPU, los desarrolladores pioneros se vieron obligados a expresar sus algoritmos no gráficos en términos de tecnologías orientadas a gráficos, como OpenGL o DirectX. Esto no era precisamente fácil de hacer, por lo que surgieron unos pocos proyectos de investigación GPGPU que se enfrentaron a la necesidad de construir una capa de abstracción para la GPGPU sobre las APIs (del inglés *Application Programming Interface*) de gráficos ya existentes, simplificando así la programación de la GPGPU para los desarrolladores. Los dos proyectos más notables fueron BrookGPU y Sh Lib.

En 2005, NVIDIA decidió entrar en el juego de la GPGPU, contratando a Ian Buck, el hombre detrás de BrookGPU, para encabezar el desarrollo de CUDA. CUDA significa Compute Unified Device Architecture y es la solución de NVIDIA al problema de programación de GPGPU. En aquel momento, NVIDIA se encontraba en una posición única, ya que era una de las primeras empresas de GPU que trataba de proveer una solución de programación de propósito general para la GPU. Esto le permitió hacer cambios en el diseño de la GPU y de los drivers para facilitar la programación GPGPU de sus propios dispositivos, según las necesidades que le iban surgiendo.

Por otro lado, AMD compró ATI y en cuanto la adquisición fue efectiva, el primer objetivo de AMD fue ponerse al día con NVIDIA en el segmento del mercado GPGPU. NVIDIA ya tenía un producto completo disponible (a nivel de hardware y software) para los desarrolladores. Para tratar de adelantar a NVIDIA, AMD/ATI adoptó una versión modificada del BrookGPU en el que también se basaba la oferta GPGPU de NVIDIA.

Mientras todo esto ocurría, por su parte Apple, estaba tratando de encontrar una manera para que los desarrolladores en su Mac OS pudiesen adaptar fácilmente su código a la revolución de la CPU multi-núcleo que está actualmente en curso. Ellos sacaron adelante un proyecto al que llamaron Grand Central. En pocas palabras, Grand Central permitía a los desarrolladores liberarse de muchas de las difíciles tareas de la programación paralela con múltiples subprocesos. Alguien en Apple se percató de que el trabajo que estaban haciendo en Grand Central también resolvía la asignación de espacio asociada al problema GPGPU. Y así, en Apple incluyeron la API de Grand Central en la especificación de una API que el Grupo Khronos (un consorcio de la industria que crea estándares abiertos) completó y bautizó como OpenCL (Open Computing Language).

2.5. INTRODUCCIÓN A OPENCL

En la actualidad, AMD, NVIDIA e Intel tienen controladores con soporte a OpenCL. Con OpenCL se podrá construir un programa paralelo que se ejecutará en una CPU, GPU (NVIDIA o ATI), y un procesador Cell, porque tiene una buena compatibilidad con los nuevos dispositivos.

2.5. Introducción a OpenCL

OpenCL, que viene del término *Open Computing Language*, es un estándar abierto y libre de *royalties* destinado a cubrir las necesidades de la programación paralela en GPUs, CPUs multinúcleo, CBEs (*Cell Broadband Engine Architecture*, desarrollados por IBM, Sony y Toshiba) y otros procesadores actuales, con el fin de proporcionar al desarrollador acceso sencillo, eficiente y portable a la potencia de todos estos procesadores heterogéneos (Khronos, 2011).

OpenCL hace posible implementar código que pueda ejecutarse en una gran variedad de CPUs y GPUs actuales sin la necesidad de emplear el lenguaje específico de cada fabricante. A su vez, permite una fácil integración en aplicaciones gráficas que empleen OpenGL o DirectX.

Para ello, provee una capa de abstracción que permite la ejecución paralela de código de propósito general en todos los núcleos de las CPUs y GPUs de un sistema. Su tecnología está específicamente diseñada para su uso en aplicaciones que requieran una dosis extra de potencia de cálculo computacional, que sean portables y que necesiten responder rápidamente a las mejoras del hardware que emplean.

Desde su nacimiento, OpenCL tiene un gran rango de aplicaciones, desde sistemas embebidos hasta soluciones HPC (computación de alto rendimiento, *High Performance Computation*), pasando por aplicaciones de usuario corrientes. Aportando mayor poder computacional a aplicaciones de carácter científico, de procesamiento de imágenes, de señal, y otros programas que requieran y permitan procesamiento paralelo.

OpenCL es un estándar compuesto por un API para coordinar la computación paralela entre procesadores heterogéneos, un lenguaje de programación multiplataforma y una especificación del entorno de programación.

En resumen, OpenCL cumple las siguientes características (Khronos, 2011):

1. Soporte tanto del modelo de programación paralela a nivel de datos como a nivel de tareas.
2. Empleo de un subconjunto del lenguaje de programación C99 (versión de 1999 del lenguaje de programación C) con extensiones para permitir la programación paralela de forma eficaz y segura a nivel de datos y tareas.

3. Define requisitos numéricos basados en el estándar de la IEEE para aritmética en coma flotante (IEEE 754).
4. Define un perfil de configuración para dispositivos y sistemas embebidos.
5. Permite la interacción eficiente con APIs gráficas como OpenGL, OpenGL ES y DirectX entre otras.

El principal motivo por el que elegir OpenCL en la actualidad es porque se trata del primer estándar de programación paralela de propósito general en sistemas heterogéneos, que es realmente abierto y libre de *royalties*.

Por otro lado, desde el punto de vista del desarrollador que requiere un extra de potencia computacional, OpenCL permite preservar la inversión en código y desarrollo de aplicaciones, ya que es compatible y ejecutable en las principales GPUs y CPUs del mercado, independientemente del fabricante de las mismas. Con lo que el desarrollador no tiene que casarse con ninguno de ellos ni con sus lenguajes o APIs propietarios y, por tanto, imponer restricciones al cliente o usuario final de la aplicación.

De cara al futuro, OpenCL va camino de convertirse probablemente en el próximo y definitivo estándar de computación paralela. Su uso permite aprovechar la extraordinaria capacidad de procesamiento paralelo de las GPUs NVIDIA y AMD/ATI, junto a procesadores de última generación, para crear aplicaciones de cálculo altamente eficientes. A medida que este estándar madure y pueda utilizarse en procesadores de otras marcas, se seguirá suministrando los controladores, las herramientas y la formación necesarios para utilizarlos.

Como contrapartida, mencionar que la mejora de velocidad de procesamiento que podemos obtener con este tipo de tecnologías estará siempre limitada por la velocidad de nuestros discos duros en aplicaciones que no sean únicamente dedicadas al cálculo matemático. Esto se debe a que los datos se procesan a mucha mayor velocidad (hasta 300 veces más rápido), pero cuando leemos datos del disco duro o escribimos, utilizamos el sistema de E/S del disco, y por tanto, la velocidad final vendrá dada por los MB/s que nuestro disco duro pueda soportar. Pudiendo convertirse en el cuello de botella de nuestra aplicación.

El marco de programación (*framework*) OpenCL consta de tres componentes principales (Munshi *et al.*, 2011):

1. Un compilador específico del lenguaje OpenCL C (basado en C99).
2. Una API con las funciones necesarias para interactuar con cada dispositivo compatible con OpenCL del sistema.
3. Un entorno de ejecución (*runtime*) propio, destinado a soportar la ejecución de programas OpenCL.

2.5. INTRODUCCIÓN A OPENCL

El lenguaje OpenCL C se basa en la norma ISO/IEC 9899: la especificación del año 1999 del lenguaje C (también conocida como la especificación C99) con extensiones y restricciones para adaptarlo al modelo de programación paralela. Este es un lenguaje de programación C que se puede compilar y ejecutar de forma nativa en cualquier unidad de procesamiento que soporta el estándar OpenCL.

Las extensiones del lenguaje OpenCL C incluyen funciones matemáticas que hacen que sea más fácil implementar algoritmos numéricos y gráficos, además de métodos para resolver problemas típicos de ingeniería y ciencia (Khronos, 2011).

El compilador está incluido en el *framework*, de modo que la aplicación puede compilar el código OpenCL durante la ejecución. Por lo tanto, no es necesario recompilar y distribuir diferentes versiones de la aplicación para cada sistema. En su lugar, la aplicación puede compilar el código fuente para los dispositivos particulares del sistema la primera vez que la aplicación se ejecuta en el mismo. A continuación, puede almacenar en caché el código compilado para que no sea necesario que se repita este paso.

Capítulo 3

Metodología

En el capítulo anterior hemos analizado en profundidad el modelo de emisividad propuesto para este trabajo, presentando el modelo matemático de partida y comparándolo con otros métodos existentes. Con ello, vemos que el Método de la Cobertura Vegetal resulta ser el más adecuado para estimar la emisividad terrestre.

Una vez vista la potencialidad del método, debemos profundizar en el estudio de su aplicación para el caso concreto que se propone en este trabajo, aplicarlo a imágenes del sensor AATSR/Envisat, empleando los mapas de usos de suelo y la clasificación de los mismos, propuesta por el proyecto Ionia GlobCover.

Por eso, en este capítulo revisaremos de forma exhaustiva las características y requisitos del sistema que hemos desarrollado. También se describirán las propiedades más importantes de los datos de entrada y los distintos cálculos que se deben realizar en el proceso.

Por último, estudiaremos, detenidamente, cómo se puede acelerar el algoritmo principal del sistema mediante técnicas de paralelización que empleen las unidades de procesamiento gráfico. Evaluaremos los requisitos que esta tecnología exige y veremos cómo podemos adaptar nuestro algoritmo para aprovechar las ventajas que nos ofrece.

3.1. Los datos de entrada del modelo

Antes de poder detallar los cálculos y procedimientos que debemos emplear para aplicar el modelo, lo primero que debemos tener en cuenta son los datos de entrada que va a necesitar el propio algoritmo. Por ello, comenzaremos detallando las dos partes de las que debe constar el algoritmo teórico.

Primero se obtiene el porcentaje de cobertura vegetal, a partir de los datos de la región V/IC/IM, usando el algoritmo más apropiado; en este trabajo nosotros proponemos el NDVI por las razones que se expondrán en la siguiente sección. Por tanto, para su cálculo, necesitamos las reflectividades medidas en los canales rojo e infrarrojo próximo correspondientes a suelo y a vegetación, así como los valores de NDVI de esas superficies.

En una segunda parte, para calcular la emisividad efectiva a partir de las proporciones de vegetación y suelo mediante las ecuaciones (2.1) a (2.4), necesitamos conocer la emisividad de la vegetación y del suelo, así como la estructura geométrica y la distribución de la vegetación en la superficie estudiada.

En consecuencia, toda la información que necesitamos para poder aplicar, exhaustivamente, el método VCM es la siguiente:

- Emisividad del suelo, directamente medida o bien estimada a partir de medidas realizadas por otros autores bajo condiciones similares de humedad y rugosidad.
- Emisividad de la vegetación (medida o estimada).
- Mapas topográficos del área de estudio.
- Mapas de suelos.
- Mapas de vegetación natural y cultivos agrícolas.
- Dimensiones medias y distribución de las estructuras vegetales existentes en el área de estudio.
- Mapa de fracción de suelo y vegetación.
- Valores de reflectividad medidos en las bandas roja e infrarroja próxima.
- Medidas de reflectividad en estas mismas bandas correspondientes a suelo y vegetación del área de estudio.

Desgraciadamente, no siempre es posible disponer de toda la información necesaria y dependiendo del grado de información que tengamos y la fiabilidad de la misma, obtendremos la emisividad con una incertidumbre entre $\pm 0,5\%$ y $\pm 2\%$, como se explica en Valor (1997, págs. 81-106).

3.2. METODOLOGÍA EMPLEADA POR EL MODELO

En las siguientes secciones de este capítulo, detallaremos cómo vamos a obtener y calcular los valores más adecuados para cada uno de los parámetros descritos arriba.

3.2. Metodología empleada por el modelo

Una vez están claros los datos de partida necesarios para poder determinar la emisividad de la superficie terrestre, aplicando el método propuesto. Estudiaremos cada uno de los diferentes pasos y cómo resolver las principales cuestiones derivadas del mismo.

3.2.1. Cálculo de la emisividad

Como ya se ha dicho, para la producción de los mapas de emisividad, se emplea el modelo presentado en el anterior capítulo, del que se obtiene la siguiente ecuación, deducible de las ecuaciones (2.1) a (2.4) (Valor y Caselles, 2005), tal y como se explica en Caselles *et al.* (2009a). Ésta permite calcular la emisividad efectiva en una superficie heterogénea, a partir de los usos de suelo en dicha superficie y el porcentaje de cobertura vegetal que contiene.

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + 4 \langle d\varepsilon \rangle P_v (1 - P_v) \quad (3.1)$$

donde ε_v y ε_s son las emisividades de la vegetación y del suelo, respectivamente, $\langle d\varepsilon \rangle$ es el término de cavidad efectivo y P_v es el porcentaje de cobertura vegetal.

Por tanto, es necesario conocer la emisividad de las superficies puras (ε_v y ε_s), es decir, de la vegetación y del suelo existente bajo ella. Si se dispone de la información adecuada, como medidas de campo directas, o bien se sabe de qué superficies se trata y se tiene una amplia base de datos de medidas de campo, entonces no hay ningún problema.

Pero si no se dispone de una información de este tipo, lo único que se puede hacer es basarse en valores medios obtenidos teniendo en cuenta cuáles son los intervalos de variación experimentalmente observados. Como ya se ha visto en el apartado de presentación del método del capítulo anterior, este método se puede aplicar en cualquier canal que se desee, basta con introducir los valores extremos (ε_v y ε_s) adecuados en cada caso.

Esto último es lo que se ha hecho en este trabajo, puesto que no disponemos de medidas de campo de toda Europa y el sistema está orientado a ser aplicado en toda esta zona. Para ello, se elaboró una Tabla de emisividades (según tipo de suelo) como se describe más adelante.

Para calcular la proporción de vegetación (P_v), se necesita un modo de estimar operativamente las fracciones de suelo y vegetación en una superficie, a partir de medidas

tomadas por satélite. Entre los diversos métodos que existen en la actualidad, el más simple es usar un índice de vegetación. Se decidió seleccionar como primera aproximación el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), puesto que es muy sencillo de aplicar y además es ampliamente usado en Teledetección.

El método propuesto puede utilizarse con cualquier otra metodología, tan complicada como se quiera, para estimar las proporciones. Pero dada la escasa sensibilidad del método al error en P_v (como se ha observado en el análisis detallado en el capítulo 2), en principio el uso del NDVI puede resultar suficiente, puesto que se debe sopesar la complejidad y el tiempo de proceso que va a necesitar, en relación con la mejora que con ello se va a conseguir. El NDVI se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{\rho_{irc} - \rho_r}{\rho_{irc} + \rho_r} \quad (3.2)$$

siendo ρ_{irc} y ρ_r las reflectividades espectrales medidas sobre vegetación en el infrarrojo próximo y el rojo, respectivamente. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante, en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores dentro del intervalo de 0,0 a 1,0. Como consecuencia de ello, el valor del índice de vegetación NDVI varía entre -1,0 y +1,0.

Para la estimación de la proporción de cobertura vegetal (P_v), incluida en una superficie determinada, se necesitan los valores de reflectividad tomados en los canales del rojo y del infrarrojo medio. De esta forma, se puede usar la siguiente relación para calcularla:

$$P_v = \frac{1 - i/i_s}{(1 - i/i_s) - K(1 - i/i_v)} \quad (3.3)$$

donde i es el NDVI de la superficie considerada, i_s e i_v son los valores del NDVI obtenidos son una superficie vegetada y otra desprovista de vegetación, respectivamente, y K viene dado por:

$$K = \frac{\rho_{2v} - \rho_{1v}}{\rho_{2s} - \rho_{1s}} \quad (3.4)$$

siendo ρ_{2v} y ρ_{1v} las reflectividades medidas sobre vegetación en el infrarrojo próximo y el rojo, respectivamente, y ρ_{2s} y ρ_{1s} las mismas medidas efectuadas sobre una superficie de suelo sin vegetación.

Aunque este método hace uso del NDVI, en esencia se trata de una versión simplificada de un modelo lineal de reflectividad, aplicado usando sólo dos componentes (suelo y vegetación) y realizando dos medidas en dos canales distintos en cuanto al tipo de información que pueden aportar (el rojo y el infrarrojo próximo).

Se pueden calcular estos parámetros para cada imagen. Para ello, se debe determinar la reflectividad y el NDVI de las superficies puras existentes en el área de estudio, obtenidas de los canales rojo e infrarrojo próximo, después de realizar su corrección atmosférica, reconociendo en ellos píxeles de suelo y completamente cubiertos de vegetación.

3.2. METODOLOGÍA EMPLEADA POR EL MODELO

Tabla 3.1: Tabla de emisividades según usos de suelo, con los valores de los parámetros del modelo para los canales 11 y 12 μm (Caselles et al., 2009a).

Clase de emisividad	AATSR-11 μm	AATSR-12 μm
Flooded vegetation/crops/grasslands	$\varepsilon_v = 0,983 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,970 \pm 0,005$ (suelo) $\varepsilon_s = 0,991 \pm 0,001$ (agua) $\langle d\varepsilon \rangle = 0$	$\varepsilon_v = 0,989 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,977 \pm 0,004$ (suelo) $\varepsilon_s = 0,985 \pm 0,001$ (agua) $\langle d\varepsilon \rangle = 0$
Flooded forest/shrubland	$\varepsilon_v = 0,981 \pm 0,008$ $\varepsilon_s = 0,970 \pm 0,005$ (suelo) $\varepsilon_s = 0,991 \pm 0,001$ (agua) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,014 \pm 0,004$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,004 \pm 0,001$ (agua)	$\varepsilon_v = 0,982 \pm 0,009$ $\varepsilon_s = 0,977 \pm 0,004$ (suelo) $\varepsilon_s = 0,985 \pm 0,001$ (agua) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,010 \pm 0,003$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,007 \pm 0,002$ (agua)
Croplands/grasslands	$\varepsilon_v = 0,983 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,970 \pm 0,005$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0$	$\varepsilon_v = 0,989 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,977 \pm 0,004$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0$
Shrublands	$\varepsilon_v = 0,981 \pm 0,008$ $\varepsilon_s = 0,970 \pm 0,005$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,014 \pm 0,004$ (suelo)	$\varepsilon_v = 0,982 \pm 0,009$ $\varepsilon_s = 0,977 \pm 0,004$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,010 \pm 0,003$ (suelo)
Broadleaved/needleleaved deciduous forest	$\varepsilon_v = 0,973 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,970 \pm 0,005$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,019 \pm 0,006$	$\varepsilon_v = 0,973 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,977 \pm 0,004$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,015 \pm 0,004$
Broadleaved/needleleaved evergreen forest	$\varepsilon_v = 0,989 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,970 \pm 0,005$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,019 \pm 0,005$	$\varepsilon_v = 0,991 \pm 0,005$ $\varepsilon_s = 0,977 \pm 0,004$ (suelo) $\langle d\varepsilon \rangle = 0,015 \pm 0,004$
Urban area	$\varepsilon = 0,969 \pm 0,006$	$\varepsilon = 0,976 \pm 0,004$
Bare rock	$\varepsilon = 0,93 \pm 0,05$	$\varepsilon = 0,95 \pm 0,05$
Water	$\varepsilon = 0,991 \pm 0,001$ (agua)	$\varepsilon = 0,985 \pm 0,001$ (agua)
Snow and ice	$\varepsilon = 0,990 \pm 0,004$	$\varepsilon = 0,971 \pm 0,014$

En este trabajo concretamente, esto se realiza buscando los píxeles que presentan valores mínimos y máximos de NDVI en toda la imagen estudiada, asegurándose de que no correspondan a superficies de agua, a nubes, etc. o a cualquier otra superficie que desvirtúe el cálculo.

Las reflectividades necesarias para realizar todo lo anterior las extraemos de las bandas 5 y 6 (visible e infrarrojo próximo, respectivamente) de las imágenes tomadas por el sensor AATSR (*Advanced Along Track Scanning Radiometer*) del satélite Envisat.

3.2.2. Clasificación de usos de suelo

Con el fin de determinar los coeficientes del modelo dependientes de los tipos de suelo y vegetación, en primer lugar, se realizó un estudio de las distintas clasificaciones de usos de suelo ya existentes, destacando Corine Land Cover de la Agencia Europea del Medioambiente (EEA, 2000) e Ionia GlobCover de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2009). El propósito era poder confeccionar, a partir de ellas, una colección propia de clases de suelo, más concreta y adecuada a la finalidad del trabajo (Caselles *et al.* 2009a). Al final, se ha decidido emplear el segundo por la actualidad de su última versión 2.2 (año 2008) y su resolución espacial (300 metros).

Posteriormente, siguiendo la metodología explicada por la FAO en el libro Land

Tabla 3.2: Correspondencias entre las clases del producto GlobCover para Europa Occidental y las clases de la Tabla de emisividades (Caselles et al. 2009a).

Clase de emisividad	Clase	Descripción GLC
Flooded vegetation/ crops/grasslands	11	Post-flooding or irrigated croplands (or aquatic)
	13	Post-flooding or irrigated herbaceous crops
	180	Closed to open (>15%) grassland or woody vegetation on regularly flooded or waterlogged soil - Fresh, brackish or saline water
	185	Closed to open (>15%) grassland on regularly flooded or waterlogged soil - Fresh or brackish water
Flooded forest/shrubland	170	Closed (>40%) broadleaved forest or shrubland permanently flooded - Saline or brackish water
Croplands/ grasslands	14	Rainfed croplands
	15	Rainfed herbaceous crops
	20	Mosaic cropland (50-70%) / vegetation (grassland/shrubland/forest) (20-50%)
	21	Mosaic cropland (50-70%) / grassland or shrubland (20-50%)
	120	Mosaic grassland (50-70%) / forest or shrubland (20-50%)
	140	Closed to open (>15%) herbaceous vegetation (grassland, savannas or lichens/mosses)
	141	Closed (>40%) grassland
	150	Sparse (<15%) vegetation
	151	Sparse (<15%) grassland
Shrublands	16	Rainfed shrub or tree crops (cash crops, vineyards, olive tree, orchards...)
	30	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)
	130	Closed to open (>15%) (broadleaved or needleleaved, evergreen or deciduous) shrubland (<5m)
	131	Closed to open (>15%) broadleaved or needleleaved evergreen shrubland (<5m)
	134	Closed to open (>15%) broadleaved deciduous shrubland (<5m)
	152	Sparse (<15%) shrubland
Broadleaved/needleleaved deciduous forest	40	Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (>5m)
	41	Closed (>40%) broadleaved deciduous forest (>5m)
	50	Closed (>40%) broadleaved deciduous forest (>5m)
	60	Open (15-40%) broadleaved deciduous forest/woodland (>5m)
	90	Open (15-40%) needleleaved deciduous or evergreen forest (>5m)
	91	Open (15-40%) needleleaved deciduous forest (>5m)
Broadleaved/needleleaved evergreen forest	32	Mosaic forest (50-70%) / cropland (20-50%)
	70	Closed (>40%) needleleaved evergreen forest (>5m)
	92	Open (15-40%) needleleaved evergreen forest (>5m)
	100	Closed to open (>15%) mixed broadleaved and needleleaved forest (>5m)
	101	Closed (>40%) mixed broadleaved and needleleaved forest (>5m)
	110	Mosaic forest or shrubland (50-70%) / grassland (20-50%)
Urban area	190	Artificial surfaces and associated areas (Urban areas >50%)
Bare rock	200	Bare areas
	201	Consolidated bare areas (hardpans, gravels, bare rock, stones, boulders)
	202	Non-consolidated bare areas (sandy desert)
	203	Salt hardpans
Water	210	Water bodies
Snow and ice	220	Permanent snow and ice
	230	No data (burnt areas, clouds,...)

3.2. METODOLOGÍA EMPLEADA POR EL MODELO

Cover Classification Systems (Di Gregorio y Jansen, 2000) se ha establecido un conjunto de clases basado en la clasificación GlobCover, obtenida a partir de datos del sensor MERIS con una resolución espacial de 300 m (Bicheron *et al.*, 2008).

A partir de las 22 clases iniciales se ha llevado a cabo una reducción a 10 clases teniendo en cuenta las similitudes entre clases afines desde el punto de vista de los elementos que la componen y su estructura típica (ver Tabla 3.2). Para cada clase correspondiente a zonas con vegetación se han calculado valores medios de los coeficientes ε_v y ε_s en cada banda espectral (11 y 12 μm) a partir de los espectros de emisividad para suelos y vegetación proporcionados en la versión 2 de la librería espectral de ASTER (Baldrige *et al.*, 2009).

Junto a estos coeficientes se ha calculado un valor medio del término de cavidad ($\langle d\varepsilon \rangle$), teniendo en cuenta la estructura de cada tipo de vegetación según su descripción en la clasificación GlobCover (Bicheron *et al.*, 2008), siguiendo el procedimiento definido en Valor y Caselles (2005). Para el caso de las superficies de agua, nieve y hielo, o suelo sin vegetación, se han asignado directamente los valores de emisividad a partir de las muestras correspondientes de la librería ASTER. En el caso de zonas urbanas se ha utilizado el valor efectivo propuesto por Valor *et al.* (2000) determinado a partir de los valores de emisividad de materiales urbanos (principalmente hormigón, asfalto, cerámica) y de la estructura de edificios. La Tabla 3.1 muestra las clases definidas, su descripción, y la relación de coeficientes aplicables a la ecuación (3.1).

3.2.3. Detección de agua o nieve

Como ya se ha visto en éste mismo capítulo, gracias a la determinación del tipo de suelo para el que se quiere conocer la emisividad, se puede ajustar los parámetros del modelo y así, obtener mejores resultados.

En la sección anterior se ha explicado cómo el sistema puede realizar de forma precisa ésta determinación del tipo de superficie, gracias a una clasificación de usos de suelo correcta y un mapa georeferenciado con los tipos de suelo de cada superficie de la Unión Europea. Pero este método todavía propone una última cuestión que hay que resolver antes de su aplicación.

El mapa de usos de suelo supone un recurso estático, en el que se puede encontrar, para cada superficie de la zona de aplicación, el tipo de suelo. Pero, si lo que se quiere es poder aplicar el modelo a cualquier época del año, hay que tener en cuenta que no todas las superficies mantienen las mismas características durante todo el año. Es decir, que hay zonas en el mapa de usos de suelo que en ciertas épocas del año pueden estar cubiertas de nieve o hielo, de forma que el sistema ha de ser capaz de detectarlo, para poder determinar si en una imagen de entrada dada, la superficie mantiene las características propias de la clase que tiene asignada en el mapa de usos de suelo o, por el contrario, ha sido alterada por las condiciones climatológicas variables con la época

del año.

Para determinar si una superficie está cubierta de nieve o hielo, se añadió al sistema un algoritmo basado en el método que emplea el producto snow-cover de MODIS. Éste método combina las reflectividades en el canal del infrarrojo ($0.865 \mu\text{m}$) y el Normalized Difference Snow Index (NDSI).

El NDSI se calcula según la siguiente expresión (Riggs et al. 2000; Hall et al. 2002):

$$NDSI = \frac{\rho_V - \rho_{SWIR}}{\rho_V + \rho_{SWIR}} \quad (3.5)$$

donde ρ_V y ρ_{SWIR} son las reflectividades en los canales verde ($0,555 \mu\text{m}$) e infrarrojo de onda corta ($1,6 \mu\text{m}$) del AATSR.

Si el valor del NDSI de la superficie en cuestión resulta ser mayor que 0,4, y la reflectividad en el canal del infrarrojo es mayor que 0,11, entonces la superficie está cubierta de nieve o hielo (Hall et al. 2002). No obstante, en el caso que el canal verde muestra una reflectividad menor que 0,10, entonces el píxel no debe ser considerado como cubierto por nieve a pesar de que se cumplan el resto de condiciones. Esto evita que se marquen como nieve píxeles oscuros.

De este modo, todos los píxeles detectados como cubiertos por agua, hielo o nieve, recibirán un tratamiento diferente en el sistema, asignándoles los valores predeterminados experimentalmente correspondientes a los de estos tipos de superficie en la tabla de emisividades (Tabla 3.1).

3.3. Descripción del algoritmo

El algoritmo que se encarga de producir los mapas de emisividad parte de la imagen de clasificación de usos de suelo, la información derivada de cada tipo de suelo y de las diversas imágenes AATSR de la zona de la que se quiera producir el mapa. Extrayendo la información requerida de cada una de ellas, para poder aplicar el modelo matemático anterior, como explicamos a continuación.

Las imágenes AATSR tienen un formato propio que está definido en la especificación del propio sensor (ESA, 2007). De ellas, se extraen las coordenadas que delimitan la superficie estudiada por dicha imagen y los valores medidos por cada canal del sensor.

La imagen con la clasificación de suelo de GlobCover v2.2 (Bicheron *et al.*, 2008), a nivel mundial, emplea el formato GeoTIFF (Ritter y Ruth, 2000) y se utiliza para obtener la clase de suelo de un píxel dado, a partir de las coordenadas de las imágenes AATSR. Cabe destacar, que esta imagen tiene una resolución espacial de 300 m, mientras que las producidas por el sensor la tienen de 1 km. Por lo que el sistema ha sido dotado de un algoritmo de interpolación por proporción de áreas ocupadas, para ser capaz de combinarlas, a partir de las coordenadas geográficas de ambas.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Por tanto, para cada imagen del sensor, el sistema procesa sus píxeles uno a uno, adquiriendo las reflectividades (en los canales rojo e infrarrojo) de cada uno de ellos y aplicando el modelo mencionado para obtener la emisividad. De modo que, una vez procesados todos los píxeles de la imagen AATSR, se genera un mapa con las emisividades calculadas, para la misma superficie originaria que había sido medida por el sensor.

Finalmente, el sistema produce un fichero de salida, siguiendo también el formato GeoTIFF, en el que se almacenan: el mapa de emisividad medio, la banda de confianza, el mapa de usos de suelo, el de NDVI, el de cobertura vegetal (P_v) y el de la máscara de agua y nieve.

3.3.1. Flujo de la información

A continuación, presentamos el diagrama de flujo del algoritmo principal, para ilustrar el funcionamiento del sistema explicado en el apartado anterior:

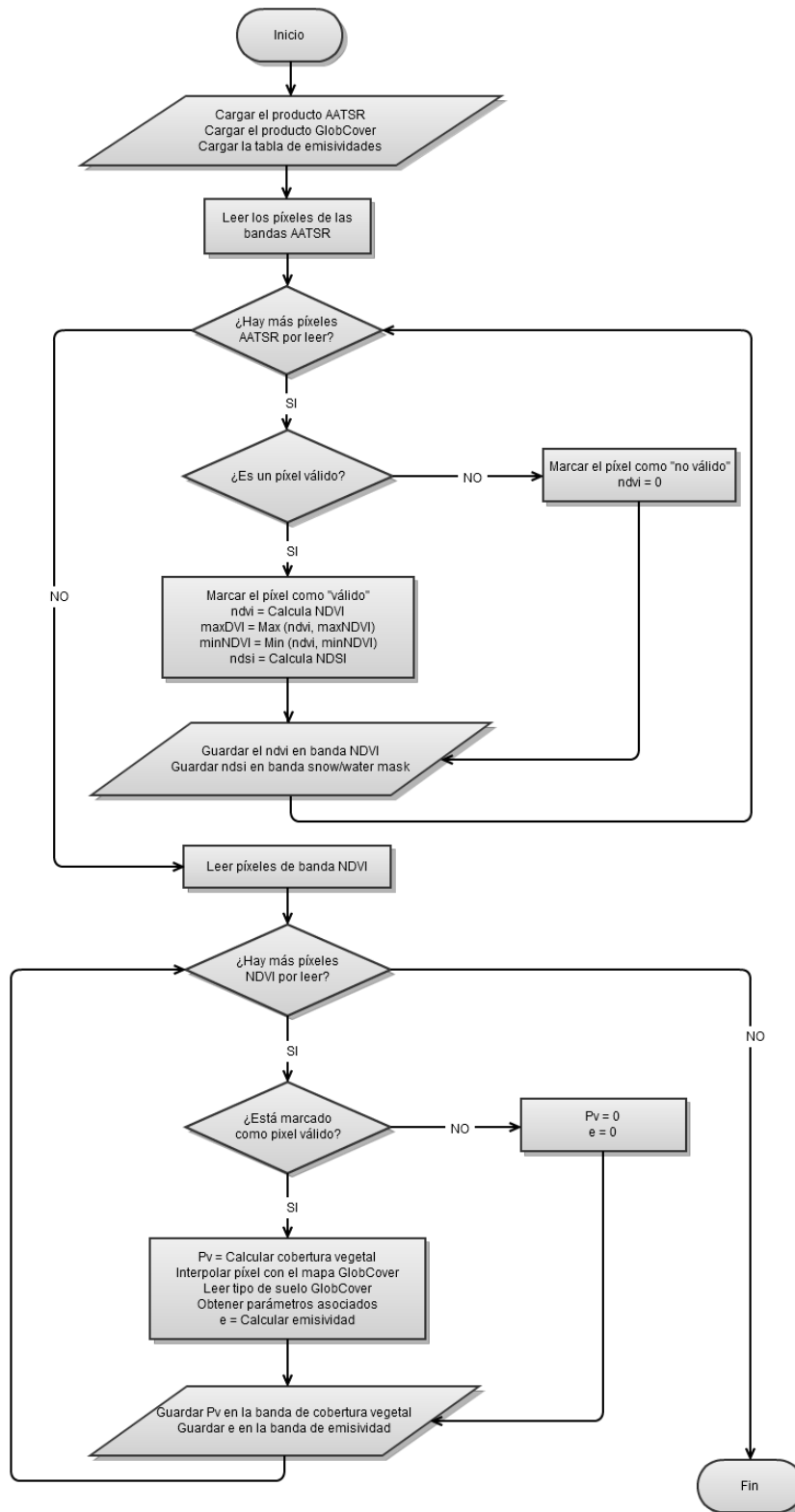


Figura 3.1: Diagrama de flujo principal del sistema encargado de producir los mapas de emisividad.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

3.3.2. Algoritmos diseñados

Procedemos ahora a exponer los algoritmos diseñados para poder aplicar el método matemático anteriormente explicado (ver capítulo 2) de la forma más automática posible. Recordemos que se trata de calcular la emisividad de la superficie terrestre a partir de imágenes de satélite, adaptando los parámetros del modelo al tipo de superficie, con la finalidad de obtener la mayor fiabilidad y exactitud en los cálculos del mismo.

Algoritmo principal (versión secuencial)

Comenzamos estudiando el algoritmo principal, que es el encargado de producir el mapa de emisividad, aplicando el modelo operativo explicado en este mismo capítulo, para calcular primero la proporción de vegetación y posteriormente, la emisividad, determinando siempre los valores más adecuados para los parámetros del modelo.

Éste algoritmo recibe como entrada el mapa de usos de suelo (imagen GlobCover con los usos de suelo de toda la superficie de estudio), la Tabla de emisividades según tipo de suelo y la imagen de satélite que contiene los datos de la superficie de la que se quiere obtener su mapa de emisividades.

Coste: $O(N + N * M) \approx O(N * M)$, siendo N el número total de píxeles de la imagen AATSR y M el del mapa de usos de suelo (imagen GLC). El segundo coste deriva de la función *Interpolar píxel en imagen GLC*, como ya hemos explicado en los anteriores algoritmos.

Como podemos observar, el algoritmo cuenta con dos fases principales. En la primera fase, tras la inicialización y lectura de los productos de entrada, se procede a leer los valores de las reflectividades de la imagen de satélite para poder determinar:

- En primer lugar, si se trata de un píxel válido o debe desestimarse debido a que en el momento de la medida la zona estaba cubierta de nubes, el sensor se saturó o se produjo cualquier otro problema que impidiera validar la corrección de la medida.
- En segundo lugar, si se trata de un píxel cuya medida es válida, procedemos a determinar las características de la superficie que contiene. Primero determinamos si está cubierto de agua o nieve y de ser así, lo marcamos para los cálculos posteriores. Si no, entonces calculamos el valor del índice de vegetación (NDVI) del mismo a partir de las reflectividades en las bandas del rojo e infrarrojo próximo.

Una vez finalizada la primera fase, se seleccionan los valores del índice de vegetación (NDVI) menor y mayor de toda la imagen y se procede a realizar la siguiente fase, en la que se realizan los siguientes pasos:

Algoritmo 1 Algoritmo principal que calcula los mapas de emisividad

Entrada: imagen AATSR, imagen GLC, Tabla de emisividades

Salida: producto de emisividad

```

1: Crear producto
2: Inicializar producto
3: Cargar bandas de la imagen AATSR
4: para todo píxel  $\epsilon$  imagen AATSR hacer
5:   si es píxel válido entonces
6:     Marcar como píxel válido en banda de confianza
7:     ndsi = Calcular NDSI(píxel)
8:     si ndsi  $\neq$  Agua  $\vee$  Nieve entonces
9:       ndvi = Calcular NDVI(píxel)
10:      maxNDVI = max(ndvi, maxNDVI)
11:      minNDVI = min(ndvi, minNDVI)
12:     fin si
13:   si no
14:     Marcar como píxel no válido en banda de confianza
15:   fin si
16:   Guardar ndvi en banda NDVI
17:   Guardar nds en banda NDSI
18: fin para
19: para todo píxel  $\epsilon$  imagen AATSR hacer
20:   si es píxel válido entonces
21:     si ndsi es Agua entonces
22:       pv = 0
23:       e = Leer información de clase (Tabla de emisividades, Agua)
24:     si no, si ndsi es Nieve entonces
25:       pv = 0
26:       e = Leer información de clase (Tabla de emisividades, Nieve)
27:     si no
28:       pv = Calcular  $P_v$ 
29:       clase = Interpolar píxel en imagen GLC (coordenadas(píxel))
30:       Leer información de clase (Tabla de emisividades, clase)
31:       e = Calcular  $\epsilon$ 
32:     fin si
33:   si no
34:     pv = 0
35:     e = Leer información de clase (Tabla de emisividades, agua)
36:   fin si
37:   Guardar pv en banda  $P_v$ 
38:   Guardar e en banda  $\epsilon$ 
39: fin para
40: Cerrar producto de salida

```

3.3. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

- Según haya sido detectado por el NDSI, obtenido en la fase anterior, como píxel cubierto de nieve o agua, se aplican los valores para nieve o agua, respectivamente, derivados de la Tabla de emisividades para cada uno de estas dos clases.
- En caso que la superficie no esté cubierta por nieve o agua, se procede a calcular la proporción de vegetación de la misma. Para, posteriormente, poder determinar la emisividad, aplicando los valores a los parámetros del modelo, obtenidos para dicha superficie.

Algoritmo de interpolación por proporción de áreas ocupadas

Este algoritmo se encarga de buscar, a partir de un píxel de la imagen AATSR, la información del píxel correspondiente en el mapa de usos de suelo (imagen GLC). Para ello, busca los distintos píxeles de la imagen GLC (resolución de 300 m) que ocupa el píxel original (resolución de 1 km).

Así, obtiene la proporción del área ocupada en cada uno, respecto al área total del píxel original, y su clase de suelo, para poder calcular, posteriormente, la media ponderada de cada valor de la tabla de emisividades, según los de cada clase, a partir de dichos porcentajes de todos los valores necesarios.

Devuelve la información obtenida de cada parámetro como una nueva clase de suelo llamada interpolado.

Coste: $O(N+M*P+P) \approx O(N+M) \approx O(N)$, siendo N el número total de píxeles de la imagen GLC, M el número de áreas distintas que ocupa el píxel original y P el número de campos (columnas) de la Tabla. Entonces, P es siempre constante. El coste N deriva de la función *obtener píxel (imgGLC, geoPos)*, que busca el píxel de la imagen con las coordenadas terrestres más parecidas a las indicadas, entre todos los píxeles de la imagen. El coste de buscar la clase en la Tabla de emisividades es constante, al serlo el número de clases de ésta. Pero, si tenemos en cuenta que M normalmente es 16 ($4*4$, ya que la relación de resoluciones es de $10/3$), salvo en contadas situaciones de excepción donde el píxel original puede caer en el borde de la imagen GLC, podríamos considerar que el coste es $O(N)$.

En la Figura 3.3 y la Tabla 3.3 se puede seguir un ejemplo de ejecución de éste algoritmo. En dicho ejemplo, se determinan los valores de las subáreas ocupadas por el píxel AATSR (en rojo), una vez superpuesto sobre el mapa de usos de suelo GlobCover, gracias a que ambas imágenes vienen geolocalizadas y se conocen las coordenadas geográficas de todos los píxeles.

Algoritmo 2 Función de interpolación por proporción de áreas ocupadas

Entrada: posición geográfica, imagen GLC, tabla de emisividades

Salida: nodo de la tabla de emisividades con valores de cada parámetro

```

1: píxel = obtener píxel (imgGLC, geoPos)
2: ratio = 1000/2
3: limInferior = (píxel - ratio)
4: limSuperior = (píxel + ratio)
5: distanciasOX = {}
6: distanciasOY = {}
7: i = limInferior.x
8: j = limSuperior.x
9: mientras i < j hacer
10:   añadir elemento (distanciasOX, calcular distancia al próximo píxel(i))
11:   i = i+ dist
12: fin mientras
13: i = limInferior.y
14: j = limSuperior.y
15: mientras i < j hacer
16:   añadir elemento (distanciasOY, calcular distancia al próximo píxel(i))
17:   i = i+ dist
18: fin mientras
19: valores = {}
20: areaTotal = 0
21: para todo x ∈ distanciasOX hacer
22:   para todo y ∈ distanciasOY hacer
23:     clase = Leer valor de clase del píxel (imgGLC, píxel(x,y))
24:     n = Leer información de clase (Tabla de emisividades)
25:     área = x*y
26:     áreaTotal += área
27:     para parámetro ∈ tablaE hacer
28:       valores[parámetro] = n.parámetro*área
29:     fin para
30:   fin para
31: fin para
32: para todo parámetro ∈ tablaE hacer
33:   valores[parámetro] = valor[parametro]/areaTotal
34: fin para
35: nInterpolado = nuevo nodo de tablaE()
36: nInterpolado.parametros = valores
37: devolver nInterpolado

```

3.3. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

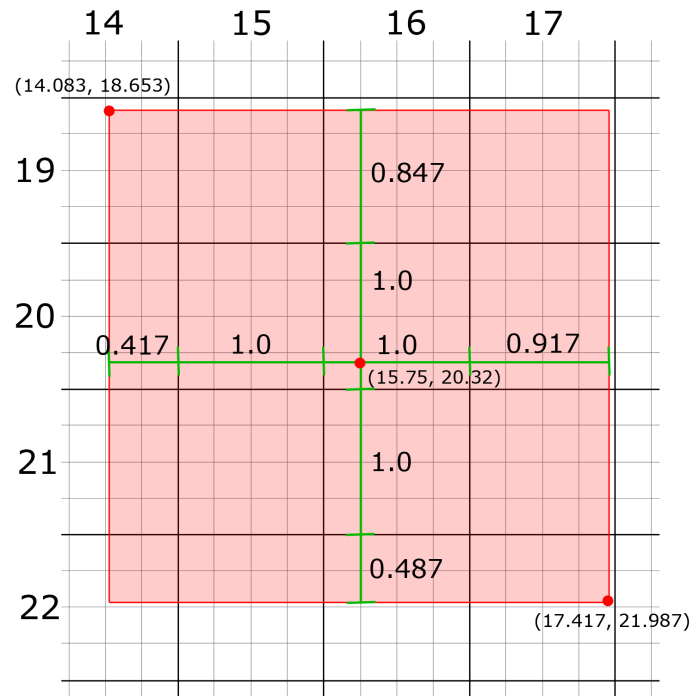


Figura 3.2: Ejemplo de píxel de 1km de resolución interpolado en píxeles de 300m, según el algoritmo de interpolación por proporción de áreas ocupadas.

Tabla 3.3: Ejemplo de ejecución del algoritmo de interpolación por proporción de áreas ocupadas, para el píxel de la Figura 3.3

Eje OX	Eje OY	Áreas ocupadas			
0,417	0,847	0,353	0,417	0,417	0,203
1,000	1,000	0,847	1,000	1,000	0,487
1,000	1,000	0,847	1,000	1,000	0,487
0,917	0,487	0,776	0,917	0,917	0,446
3,333	3,333	2,822	3,333	3,333	1,622

Interpolación por el vecino más próximo

Este algoritmo se encarga de buscar, a partir de un píxel de la imagen AATSR, la información del píxel correspondiente en el mapa de usos de suelo (imagen GLC). Para ello, los interpola a partir de sus coordenadas reales (geoPos), mediante el algoritmo del vecino más próximo. Devuelve la información correspondiente a la tabla de emisividades del píxel interpolado.

Algoritmo 3 Función que interpola por el vecino más próximo

Entrada: posición geográfica, imagen GLC, tabla de emisividades

Salida: nodo de la tabla de emisividades con valores de cada parámetro

- 1: píxel= obtener píxel (imgGLC, geoPos)
 - 2: clase= Leer valor de clase del píxel (imgGLC, píxel)
 - 3: n= Leer información de clase (Tabla de emisividades)
 - 4: **devolver** n
-

Coste: $O(N)$, siendo N el número total de píxeles de la imagen GLC. El coste deriva de la función *obtener píxel (imgGLC, geoPos)*, que busca el píxel de la imagen con las coordenadas terrestres más parecidas a las indicadas, entre todos los píxeles de la imagen. El coste de buscar la clase en la tabla de emisividades es constante, al serlo el número de clases diferentes de ésta.

3.4. Aceleración del sistema

En las anteriores secciones de este capítulo hemos presentado y analizado los detalles del sistema desarrollado para la producción de mapas de emisividad de la superficie terrestre, a partir de imágenes de satélite. También hemos estudiado el funcionamiento del algoritmo principal propuesto para este sistema. Algoritmo que se encarga de procesar las imágenes de satélite aplicando el modelo propuesto para generar mapas de emisividad.

Una vez visto todo esto, podemos proceder a analizar los principales problemas que presenta esta solución en términos de coste y tiempo computacional, así como la solución que proponemos para mejorar dicho rendimiento en este trabajo final de máster.

3.4.1. Necesidad de acelerar los cálculos

Como ya se explicó en el primer capítulo de este trabajo, el tiempo de cálculo y producción de los mapas de emisividad es un factor importante a tener en cuenta en la mayoría de las aplicaciones de estos mapas. Puesto que la temperatura es una magnitud física con gran variedad de aplicaciones y que el cálculo de la emisividad de la superficie

3.4. ACELERACIÓN DEL SISTEMA

resulta ser un parámetro corrector vital en la determinación de la misma a partir de medidas tomadas desde satélite.

Sin embargo, la obtención de la temperatura es un proceso complejo que puede llegar a ser largo y tedioso, según la metodología que empleemos y los recursos de los que dispongamos. El problema es en que muchas de sus aplicaciones, como la predicción meteorológica, la predicción de incendios forestales (Bisquert *et al.*, 2012), el cálculo de la evapotranspiración (Sánchez *et al.*, 2008) o la detección de bancos de pesca, el tiempo es un factor determinante y un recurso muy limitado, por lo que requieren disponer de los resultados del análisis con muy poco margen de tiempo, a veces prácticamente en tiempo real, ya que dichos resultados y su interpretación acarrearán diferentes decisiones en la planificación y distribución de los recursos disponibles. Ejemplos claros de esto son la predicción de incendios forestales y la gestión de los recursos antincendio para un día dado, el cálculo de la evapotranspiración en la agricultura de alta precisión o la detección y localización de los bancos de pesca en el mar.

De esta forma, queda patente la importancia de obtener la temperatura en el menor tiempo posible y por eso, el ser capaces de reducir al máximo el coste temporal de calcular la emisividad, como parámetro necesario para su correcto cálculo favorecerá a disminuir el tiempo de cálculo total de la misma.

Por todos los motivos expuestos anteriormente, queda clara la necesidad de readaptar nuestro sistema y el algoritmo principal que ejecuta, para conseguir agilizar lo máximo posible el tiempo de computación empleado por el mismo en producir los mapas de emisividad de la superficie terrestre. Constituyendo este punto uno de los principales objetivos de este trabajo.

3.4.2. Aceleración del algoritmo mediante el uso de la GPU

Como se ha visto en la sección 3.2 de este mismo capítulo, el algoritmo propuesto para producir los mapas de emisividad a partir de imágenes de satélite maneja gran cantidad de información, entre datos y parámetros, que determinan el valor del resultado final. Pero la mayoría de los cálculos que realiza, se aplican a nivel local, por cada píxel, lo que rápidamente nos deja ver que estamos ante un algoritmo cuya ejecución permite la paralelización del mismo a nivel de datos. Es decir, que podemos repartir todos los datos entre diferentes núcleos de computación, para que se procesen en grupos a la vez, en lugar de la tradicional ejecución secuencial en un único núcleo de computación.

Esto quiere decir que la mejor forma que tenemos de acelerar la ejecución del algoritmo propuesto en este trabajo se basa en la asunción de que todos los cálculos se realizan de forma completamente independiente sobre cada dato de entrada, en este caso, sobre cada píxel. Es decir, que sobre cada píxel de la imagen de entrada se realizan los mismos cálculos y éstos no dependen del resultado obtenido para ningún otro píxel de la imagen. Por lo que se puede repartir el trabajo a realizar entre los diferentes

núcleos, permitiendo que se procesen cientos de píxeles a la vez.

Esta primera hipótesis resulta muy prometedora en principio, pero hay que ir con cuidado y analizar concienzudamente nuestro algoritmo, puesto que si se estudia un poco más en detalle el funcionamiento del algoritmo, nos daremos cuenta de que, por desgracia, no se trata de un algoritmo que podamos paralelizar completamente. Esto se debe a que hay alguna parte del mismo que no cumple la hipótesis de independencia entre datos, puesto que requiere conocer el valor del resto de píxeles de la imagen para poder realizarlos. Dicha parte es la que requiere escoger, al final de la primera fase del algoritmo, el máximo y mínimo valor del índice de vegetación (NDVI) obtenidos para toda la imagen, antes de poder proceder a ejecutar la segunda fase del algoritmo y calcular la proporción de cobertura vegetal y la emisividad.

Sin embargo, si conseguimos aislar dicha parte, el resto sí que cumplen perfectamente la condición de independencia, por lo que pueden paralelizarse completamente, permitiendo emplear todos los núcleos de una GPU para acelerar el procesamiento en dichas partes y, por tanto, disminuir drásticamente el tiempo de proceso total.

De este modo, paralelizar el algoritmo implica aislar cada píxel de la imagen AATSR que se va a procesar, junto con los parámetros necesarios, para que pueda ser procesado de forma completamente independiente al resto. Puesto que esto es lo que enviaremos a cada núcleo para que realice los cálculos pertinentes.

Por ello, lo primero que debemos hacer es cargar las imágenes y los datos de entrada que emplea el algoritmo y prepararlos para enviarlos a la GPU. Esto requiere un cambio en el algoritmo, de modo que dejemos de contemplar la imagen como una única unidad y pasemos a considerar cada píxel como unidades independientes a procesar.

Algoritmo principal (versión paralelizada)

El nuevo algoritmo, adaptado para poder aplicar la paralelización a nivel de datos y aprovechar así todo el potencial que ofrecen los múltiples núcleos incluidos en una unidad de computación gráfica (GPU), funciona de la siguiente forma:

1. En primer lugar, como ya se hacía en la versión original del algoritmo, se cargan los productos de entrada. Una vez hecho esto, se leen las bandas de la imagen AATSR que se emplean en los cálculos del modelo (los canales verde, rojo, infrarrojo cercano, etc.).
2. Posteriormente, se debe preparar un contexto propio para el empleo de la GPU, en nuestro caso empleando la tecnología OpenCL. Esto conlleva detectar los recursos disponibles en el sistema (GPUs, y CPUs compatibles con dicha tecnología), determinar cuáles se va a emplear en nuestro algoritmo y una vez conocidas las características de los mismos (número de núcleos, tamaño de memoria, etc.), se

3.4. ACELERACIÓN DEL SISTEMA

Algoritmo 4 Algoritmo principal versión paralelizada

Entrada: imagen AATSR, imagen GLC, tabla de emisividades

Salida: producto de emisividad

- 1: Crear producto
 - 2: Inicializar producto
 - 3: Cargar bandas de la imagen AATSR
 - 4: Crear contexto OpenCL
 - 5: Cargar kernel fase 1
 - 6: Copiar bandas en buffers para la GPU
 - 7: Ejecutar kernel fase 1
 - 8: Leer resultados de la fase 1
 - 9: Calcular NDVI máximo y mínimo.
 - 10: Cargar kernel fase 2
 - 11: Copiar valores de NDVI en buffer para la GPU
 - 12: Ejecutar kernel fase 2
 - 13: Leer resultados de la fase 2
 - 14: Almacenar resultados en producto de salida
 - 15: Cerrar producto de salida
-

puede preparar el entorno de trabajo de OpenCL (número de bloques, tamaño, etc.).

3. Una vez el contexto y el entorno de trabajo están listos, se puede proceder a la ejecución de la primera fase del algoritmo. Recordemos que esta fase es la encargada de calcular el índice de vegetación (NDVI) y la máscara de agua, nieve y hielo (mediante el método del NDSI) para cada píxel de la imagen AATSR que se recibe como entrada. Para ello:
 - Primero se debe cargar el kernel con el código de las instrucciones a realizar en la primera fase.
 - Se copian los datos de entrada de esta fase en los buffers a los que accederá el kernel en OpenCL.
 - Y una vez hecho esto, se puede dar la señal para que comience la ejecución de esta fase.
 - Se espera a que termine y se leen los datos resultantes de procesar todos los datos copiados en los buffers de entrada con el kernel cargado.
4. Una vez ha finalizado la ejecución de la primera fase, se requiere recomponer los resultados para volver a procesar los datos de forma secuencial. Esto permitirá seleccionar de entre todos los valores obtenidos del índice de vegetación, el máximo y el mínimo. Esto debe hacerse para poder pasárselos como datos de entrada a la siguiente fase, junto con los valores de NDVI correspondientes a cada píxel y el valor de la máscara de Agua y Nieve para ese píxel.

5. Del mismo modo que se hizo para la primera fase:
 - Antes de poder ejecutar la segunda, se necesita cargar el kernel con el código de las instrucciones a realizar en ésta segunda fase.
 - Copiar los resultados de la primera como datos de entrada de ésta en los correspondientes buffers.
 - Una vez están todos los datos copiados, se puede volver a dar la señal para que se ejecute la segunda fase.
 - Se vuelve a esperar a leer los resultados una vez haya terminado de procesar todos los datos copiados en los buffers de entrada.
6. Finalmente, una vez terminada la ejecución de ésta segunda fase y tras haber leído todos los datos resultantes, ya se puede proceder a recomponerlos como una única imagen para poder escribirlos en sus correspondientes bandas en el producto de salida y cerrarlo.

3.4. ACELERACIÓN DEL SISTEMA

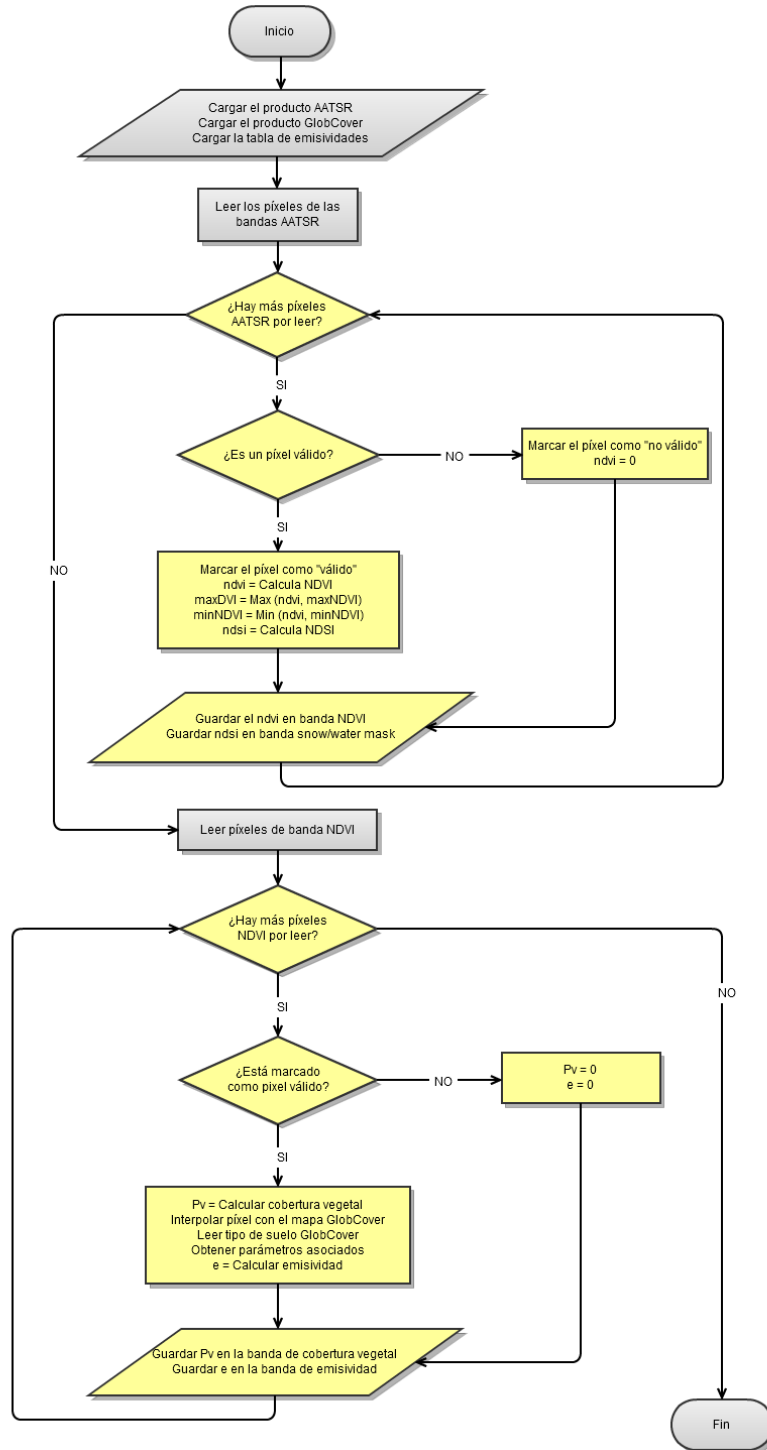


Figura 3.3: Diagrama de flujo con las partes procesadas por la GPU marcadas en amarillo.

Capítulo 4

Resultados

En los capítulos anteriores se ha descrito el modelo matemático propuesto para el cálculo de la emisividad, así como las características y necesidades del sistema desarrollado, haciendo una revisión exhaustiva de los requisitos y funcionalidades del mismo.

En este capítulo se presentan detalladamente diferentes aplicaciones realizadas del sistema con el modelo operativo propuesto. Se han seleccionado los ejemplos para mostrar el funcionamiento en zonas conocidas. En cada uno de los casos que se va a exponer se ha ejecutado el sistema con la misma configuración y tabla de emisividades.

Además de servir de ejemplo, algunos de los casos han permitido realizar una validación de la ecuación operativa desarrollada en el capítulo 3.

Por último, se realiza una comparativa de las dos implementaciones del algoritmo: el original (secuencial) y el paralelizado (mediante el uso de la GPU). Se analizarán las principales características de cada uno y se presentarán sus ventajas e inconvenientes.

4.1. Desarrollo de un ejemplo completo

Comenzaremos este capítulo con el estudio paso a paso de una ejecución del sistema. En él, presentaremos los diferentes productos de entrada escogidos, las imágenes producidas intermedias y el producto final resultante del proceso.

4.1.1. Datos de entrada

Como imagen de entrada para este ejemplo se ha seleccionado la siguiente imagen AATSR correspondiente al día 20 de julio de 2007. Como podemos observar en las Figuras 4.1 y 4.2, la superficie comprendida se centra en la Comunidad Valenciana (España). Ésta es la superficie de la que obtendremos los mapas de emisividad tras procesarla con el algoritmo.

De dicha imagen nos interesan específicamente las bandas correspondientes a los canales rojo (centrada en los 650 nm) e infrarrojo próximo (centrada en los 865 nm) medidas por el sensor AATSR para la fecha anteriormente mencionada, Figuras 4.1 y 4.2 respectivamente. Como se explicó en anteriores capítulos, éstas bandas se emplean para el cálculo del índice de vegetación y por tanto, de la cobertura vegetal (proporción de vegetación de la superficie).

También se utilizará la banda del canal verde (ver Figura 4.3, centrada en los 1,6 μm , para la determinación del índice NDSI, que como ya explicamos, sirve para detectar superficies temporalmente cubiertas por agua, hielo o nieve.

Por otro lado, tenemos el mapa de usos de suelo del territorio europeo de la colección GlobCover. Éste mapa, con una resolución espacial de 300 m, indica el tipo de suelo y vegetación para cualquier zona del territorio europeo, como podemos ver en la Figura 4.4. De él extraeremos el tipo de suelo asociado a la superficie de la imagen que estamos procesando, permitiéndonos obtener los diferentes usos de suelo correspondientes a dicha superficie, como veremos más adelante.

4.1. DESARROLLO DE UN EJEMPLO COMPLETO



Figura 4.1: Imagen AATSR de la Comunidad Valenciana (20/07/2007), con las reflectividades en el rojo (canal de 650 nm).



Figura 4.2: Imagen AATSR de la Comunidad Valenciana (20/07/2007), con las reflectividades en el infrarrojo próximo (canal de 865 nm).

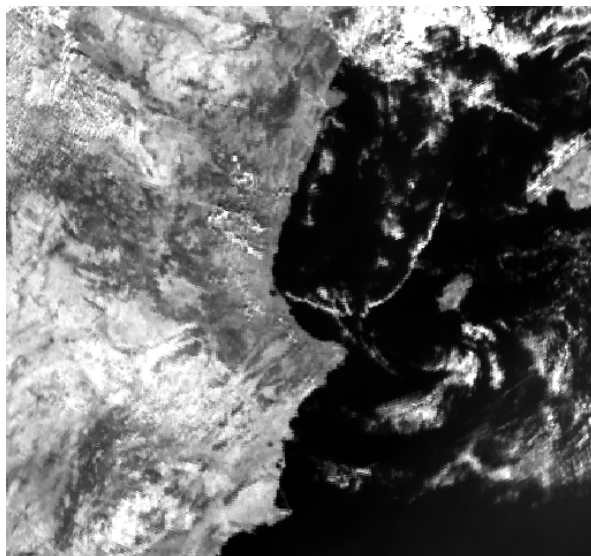


Figura 4.3: Imagen AATSR de la Comunidad Valenciana (20/07/2007), con las reflectividades en el verde (canal de 555 nm).



Figura 4.4: Imagen GlobCover para Europa Occidental (ver la leyenda regional asociada en el Apéndice B)

4.1. DESARROLLO DE UN EJEMPLO COMPLETO

4.1.2. Datos intermedios

Una vez presentados los diferentes productos de entrada elegidos para este ejemplo, pasamos a mostrar los primeros resultados producidos por el sistema.

En primer lugar presentamos el mapa de usos de suelo (Figura 4.5), que representa los diferentes tipos de suelo correspondientes a la superficie de estudio contenida por la imagen AATSR de entrada. Éste mapa es el resultado de superponer dicha superficie al mapa de usos de suelo de la colección GlobCover mostrado en la Figura 4.4, a partir de las coordenadas geográficas de cada píxel.

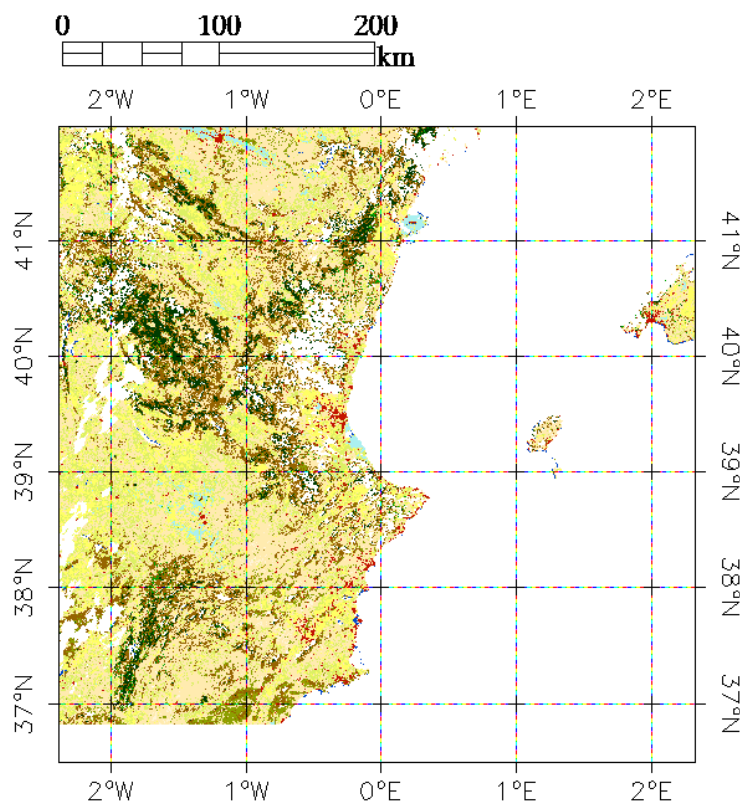


Figura 4.5: Mapa de usos de suelo, según clasificación GLC (ver la leyenda regional asociada en el Apéndice B) de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).

Por otro lado, como resultados de la ejecución de la primera fase del algoritmo, obtenemos la imagen con los valores correspondientes al índice de vegetación NDVI y el mapa de cobertura vegetal de la superficie contenida en la imagen AATSR escogida para este ejemplo.

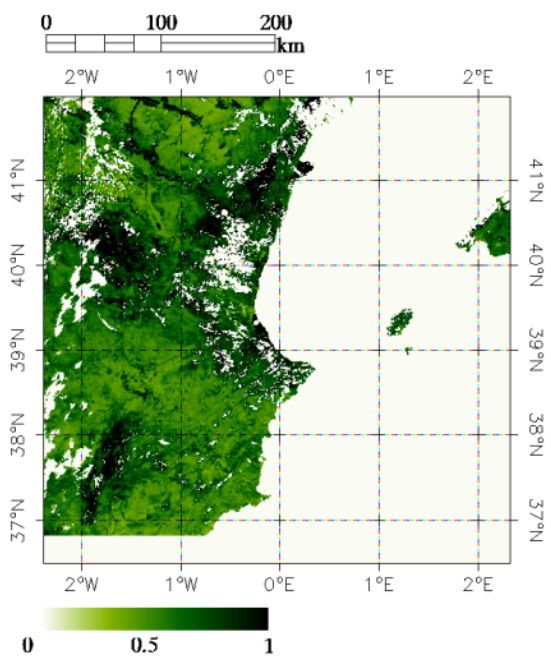


Figura 4.6: Mapa de NDVI de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).

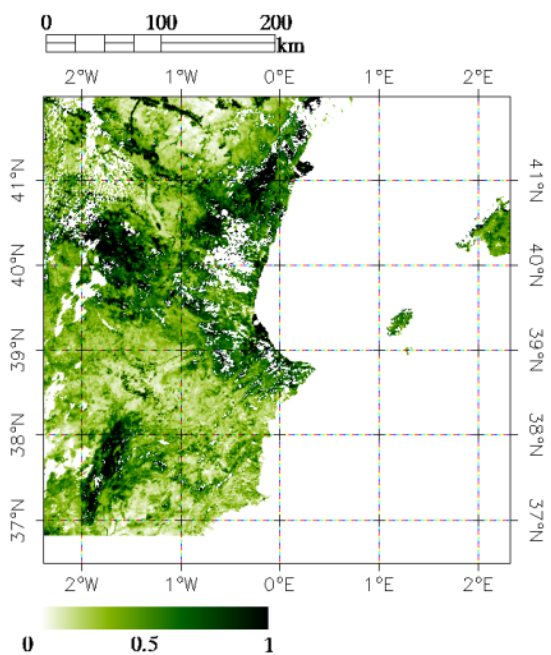


Figura 4.7: Mapa de cobertura vegetal (P_v) de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).

4.1. DESARROLLO DE UN EJEMPLO COMPLETO

Cabe recordar que estos dos mapas serán empleados como datos de entrada en la segunda fase del algoritmo, en la que calcularemos la emisividad de la superficie escogida.

4.1.3. Datos de salida

Finalmente, tras la ejecución completa del algoritmo para calcular la emisividad de la superficie terrestre, obtenemos los mapas de emisividad para cada uno de los dos canales, 11 y 12 μm .

En este ejemplo, se ha decidido mostrar el mapa de la emisividad media entre ambos canales, como puede verse en la Figura 4.8. En esta Figura puede observarse el mapa resultante del procesamiento de la imagen AATSR de entrada.

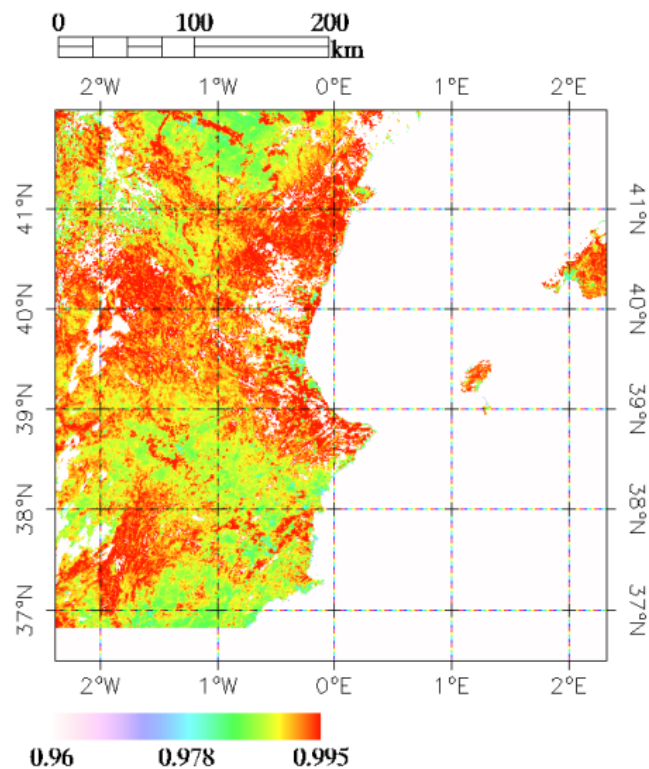


Figura 4.8: Mapa de emisividad media (canales 11 y 12 μm) de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).

Por último, como parte del producto de salida producido por el sistema que ejecuta el algoritmo de cálculo de la emisividad, se incluye una banda de confianza, que se muestra en la Figura 4.9. En ella, se marcan los píxeles que han podido procesarse de forma correcta y por tanto, sus valores se consideran válidos y los que no. Los principales

motivos por los que un píxel no pueda considerarse válido son que el sensor haya fallado en el momento de tomar la medida (por ejemplo saturándose) o que la superficie esté cubierta por una capa nubosa suficientemente densa como para no poder medir de forma válida las características de la superficie. Por ello, ésta banda es vital para el correcto uso de este producto en posteriores procesos como el cálculo de la temperatura terrestre.

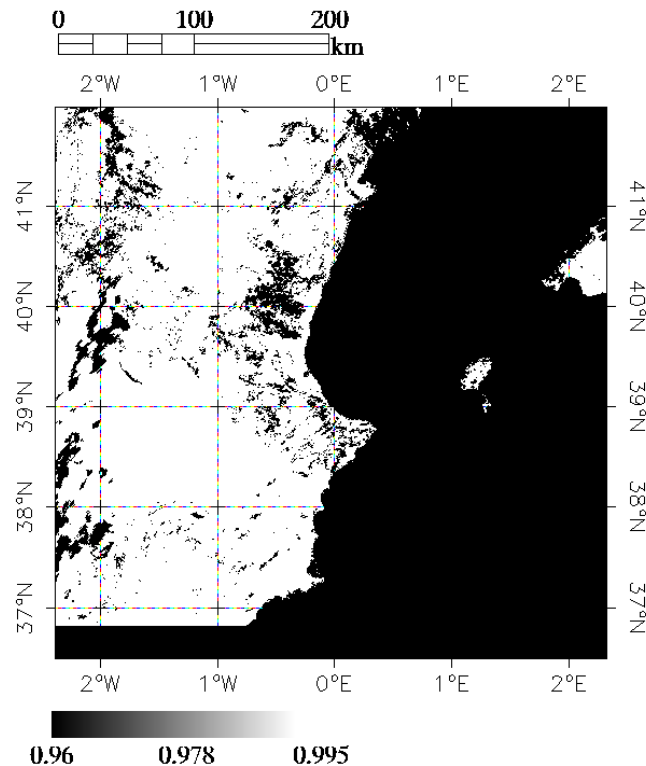


Figura 4.9: Banda de confianza generada (píxeles válidos en blanco) para el producto de emisividad de la Comunidad Valenciana (20/07/2007).

4.2. Desarrollo de una composición mensual

Ahora que ya hemos visto un ejemplo del producto generado con el sistema, a partir de una única imagen AATSR, vamos a ver un ejemplo de composición mensual a partir de todas las imágenes AATSR correspondientes a mediciones del satélite de la superficie europea en un mismo mes.

Para poder crear una composición mensual, primero es necesario generar, empleando el sistema desarrollado, los productos de emisividad para todas y cada una de las imágenes tomadas por el sensor en cada una de las pasadas del satélite por Europa en dicho mes. Para este ejemplo, se ha escogido el mes de julio de 2007.

4.2. DESARROLLO DE UNA COMPOSICIÓN MENSUAL

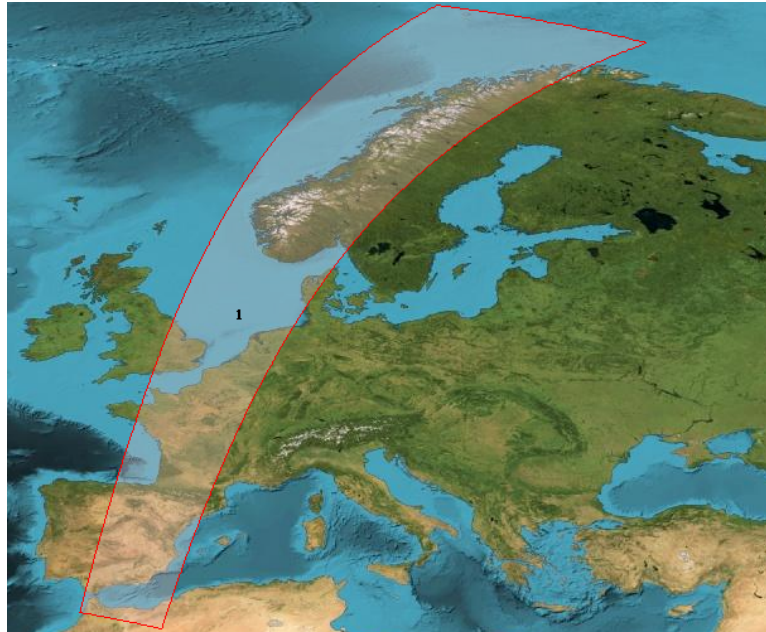


Figura 4.10: Mapa de Europa en el que se muestra la superficie medida por el sensor AATSR en una pasada del satélite Envisat por Europa (07/07/07 10:27).

Una vez hemos creado los mapas de emisividad de todas las pasadas del sensor ese mes, sólo queda combinarlas para crear el mosaico mediante cualquier software de tratamiento de imágenes de satélite (para más detalle consultar Caselles *et al.*, 2009b) y así obtener un mapa completo de la emisividad en Europa para el mes de estudio.

Así pues, en nuestro caso, a partir de las diferentes bandas incluidas en el producto de salida, podemos obtener los siguientes mapas de Europa en julio de 2007:

1. Cobertura vegetal (Figura 4.11).
2. Emisividad media (Figura 4.12).
3. Banda de confianza (Figura 4.11).

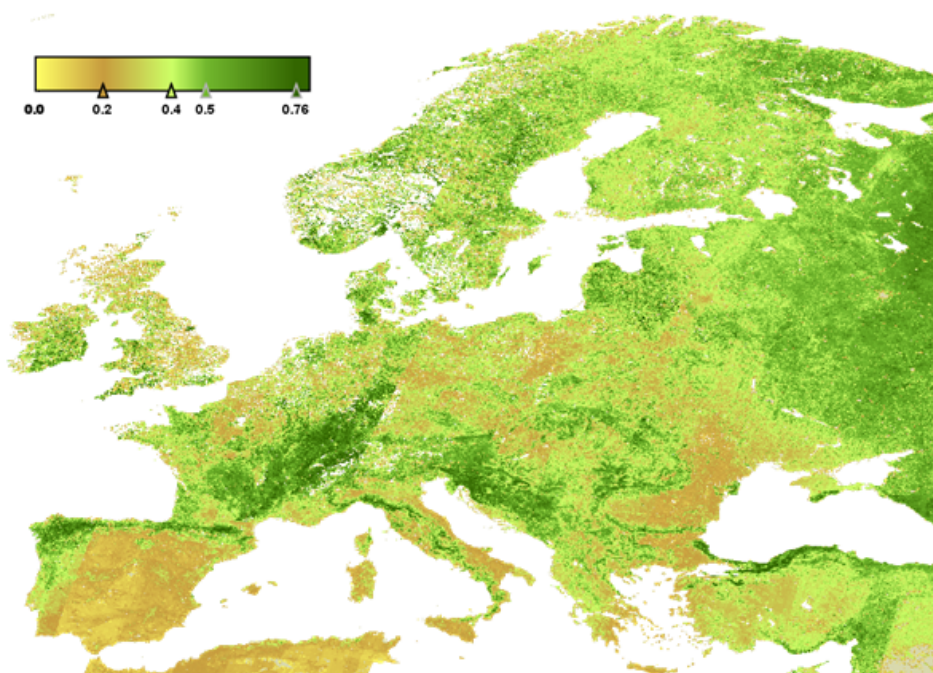


Figura 4.11: Mapa de cobertura vegetal (P_v) de Europa (julio de 2007).

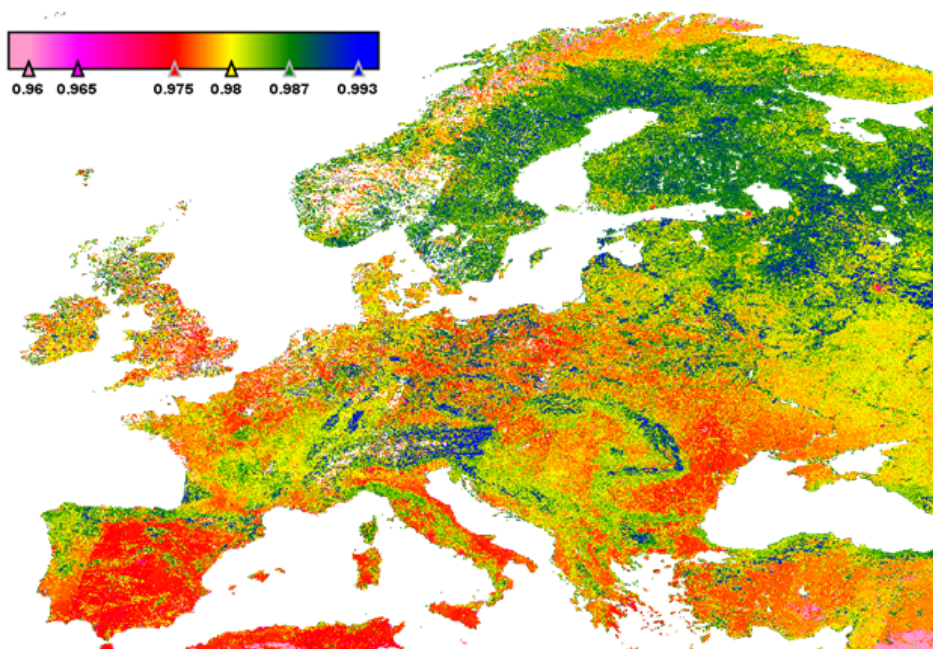


Figura 4.12: Mapa de emisividad media (canales 11 y 12 μm) de Europa (julio de 2007).



Figura 4.13: Banda de confianza (píxeles válidos en blanco) generada para el producto compuesto de Europa (julio de 2007).

4.3. Estudio de la emisividad a nivel anual

Del mismo modo, se pueden producir mapas de emisividad para cada mes de un mismo año, empleando todas las imágenes AATSR disponibles. En este trabajo, se procesaron 2.257 imágenes correspondientes al año 2007, para poder crear mapas de emisividad de cada uno de los 12 meses del año.

En la Figura 4.14 se presenta la cobertura vegetal mensual, en ella se puede observar fácilmente cómo varía la cobertura vegetal de la superficie europea a lo largo del año. Los mayores valores se alcanzan en primavera y otoño, y se observa una clara reducción de la superficie cubierta por vegetación en los meses de verano y sobre todo invierno.

Por otro lado, se observa que hay varias zonas de montañas: la península escandinava, los Alpes o los Pirineos; que presentan valores muy bajos de cobertura vegetal durante todo el invierno. Esto es debido a la presencia de agua y nieve de forma prácticamente continua en dichas zonas durante este tiempo.

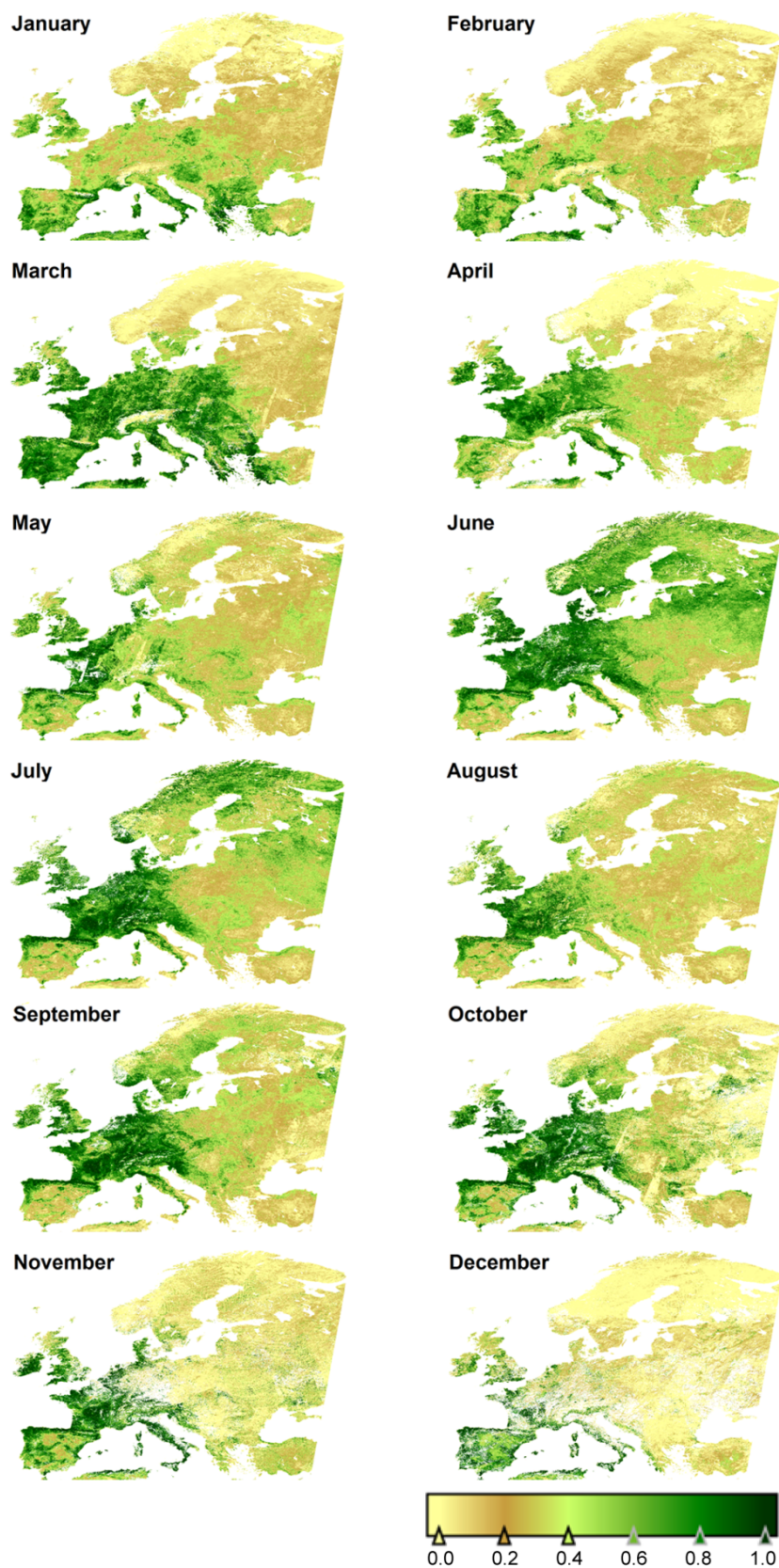
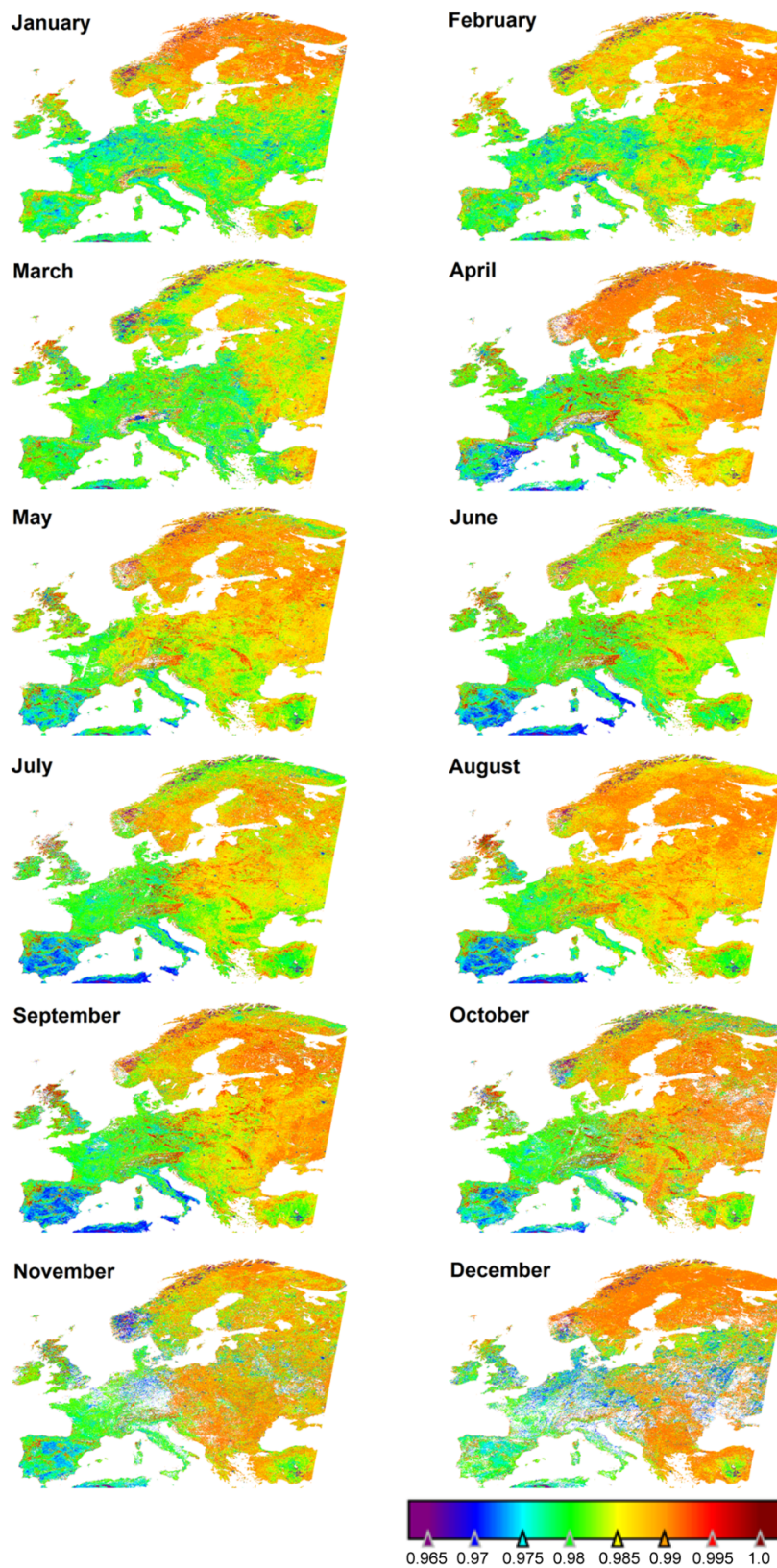


Figura 4.14: Mapas mensuales de cobertura vegetal de la superficie europea durante el año 2007. Los píxeles en blanco corresponden a superficies con agua o nubes.

4.3. ESTUDIO DE LA EMISIVIDAD A NIVEL ANUAL



75 **Figura 4.15:** Mapas de emisividad mensuales de la superficie europea durante el año 2007 para el canal de $11 \mu\text{m}$ del sensor AATSR.

La Figura 4.15 muestra los mapas de emisividad para cada mes del año 2007 en el canal AATSR de los 11 μm . El valor de emisividad de cada píxel fue obtenido como la media de todos los valores obtenidos a lo largo de un mismo mes para cada píxel.

Sobre estos resultados, se estudió la variación de la emisividad en cada mes, como la diferencia entre el valor máximo y mínimo para cada píxel, obteniendo valores despreciables. Este hecho aporta confianza en la estabilidad del método propuesto y el algoritmo diseñado.

4.4. Evaluación del sistema

4.4.1. Análisis de sensibilidad

Caselles *et al.* (1997) llegan a que el error del método para los canales centrados en 11 y 12 μm es de $\pm 0,01\%$, eligiendo un caso medio correspondiente a una superficie con porcentaje de cobertura vegetal del 50 % y suponiendo condiciones óptimas de aplicación para el método, esto es, conocimiento suficiente del área de estudio,

4.4.2. Validación con datos de suelo

La validación del sistema se llevó a cabo comparando los datos de los mapas de emisividad (Caselles *et al.*, 2009c) producidos por el sistema, con las medidas realizadas por el método de la caja (Rubio *et al.*, 1997), empleando radiómetros de mano, en campañas experimentales llevadas a cabo en la zona de arrozales de Valencia (Coll *et al.*, 2007), durante dos momentos diferentes del año (ver Tabla 4.1). Esta zona y estas medidas se emplean como referencia en la validación de diversos satélites de la ESA y la NASA, debidos a sus características.

Primero, se realizó la comparación con el valor de emisividad cuando la superficie estaba completamente cubierta de vegetación (arrozales), con agua debajo (en el mes de julio). En el canal AATSR de 11 μm , la emisividad medida para dicha zona fue de $0,985 \pm 0,002$ y el valor obtenido por el sistema fue de $0,982 \pm 0,001$. Obteniendo una diferencia de $+0,003$. Mientras que para el canal de 12 μm , el valor de emisividad medido fue de $0,980 \pm 0,005$ y el valor del sistema fue de $0,988 \pm 0,002$, con una diferencia de $-0,008$.

En segundo lugar, se realizó la misma comparación en el mes de abril, cuando los arrozales están en barbecho y secos (Coll *et al.*, 2012b). En este caso, el valor medido en el campo para el canal AATSR de 11 μm fue de $0,957 \pm 0,005$ (Mira *et al.*, 2007) y el valor obtenido por el sistema fue de $0,970 \pm 0,001$, mostrando una diferencia de $-0,013$. Mientras que para el canal de 12 μm , el valor medido fue de $0,954 \pm 0,005$ y el valor del sistema fue de $0,977 \pm 0,001$, con una diferencia de $-0,023$.

4.5. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LA VERSIÓN PARALELIZADA

Tabla 4.1: Comparación de valores experimentales y calculados, para las emisividades de los canales centrados en 11 y 12 μm (Caselles et al., 2009c).

Canal (μm)	Valor experimental	Valor calculado
10,5-11,5	$0,985 \pm 0,002$	$0,982 \pm 0,001$
	$0,957 \pm 0,005$	$0,970 \pm 0,001$
11,5-12,5	$0,980 \pm 0,005$	$0,988 \pm 0,002$
	$0,954 \pm 0,005$	$0,977 \pm 0,001$

Esto prueba que los resultados de validación están siempre dentro del intervalo esperado de $\pm 0,001$, excepto para el caso de suelo desprovisto de vegetación en el canal de 12 μm , que muestra un resultado razonablemente bueno para la zona empleada de validación.

4.5. Análisis del rendimiento de la versión paralelizada

Una vez hemos validado los resultados obtenidos por el algoritmo, comparándolos con los valores reales medidos in situ en campañas, en esta última sección del capítulo, vamos a analizar el rendimiento de la versión paralelizada, mediante el empleo de la unidad de proceso gráfico (GPU) y la tecnología OpenCL presentada en el capítulo 2 de esta misma memoria, del algoritmo principal de nuestro sistema.

Como hemos explicado en anteriores capítulos, el cálculo de la emisividad es un paso muy importante para estimar correctamente la temperatura de la superficie terrestre (LST) a partir de imágenes de satélite. También hemos comentado y razonado la importancia en la mayoría de las principales aplicaciones que tiene el hecho de que estos cálculos se realicen en el menor tiempo posible.

Por todo ello, en el presente Trabajo Fin de Máster, se decidió emplear una tecnología como es la de OpenCL que permitiera mejorar el rendimiento del algoritmo mediante la paralelización a nivel de datos del mismo, como se ha explicado detalladamente en el capítulo de metodología de esta misma memoria.

Pero ahora, todavía está por determinar su resultado, es decir, el efecto resultante de dotar a nuestro sistema con la capacidad de emplear esta tecnología. Debemos intentar cuantificar y validar la mejoría que el empleo de la técnica de aceleración mediante el empleo de la GPU ha aportado a nuestro problema.

De modo que parece lógico dedicar una última sección de este capítulo de análisis de resultados a comparar el tiempo de ejecución de las dos versiones del algoritmo

(original y paralelizada) presentadas en el capítulo anterior. El objetivo final de esta comparación es el de evaluar los beneficios que aporta el empleo de la GPU para aliviar el coste temporal de la producción de los mapas de emisividad de la superficie terrestre, a partir de imágenes de satélite del sensor AATSR.

4.5.1. Preparación de los experimentos

Para la realización de este análisis se preparó una versión especial de ambos algoritmos que permitiera medir el tiempo de cálculo de cada uno de los pasos, de forma que se pudiera estudiar el rendimiento de cada una de las fases, así como del total del tiempo de ejecución de procesar una imagen AATSR.

A su vez, se creó una aplicación externa que ejecuta ambos algoritmos sobre las mismas imágenes, midiendo los tiempos de ejecución de cada uno y comprobando que el resultado es el mismo en ambos casos.

Por último, para evaluar el rendimiento de cada versión del algoritmo, se medirá el tiempo de cómputo que emplea cada versión en procesar diferentes imágenes sintéticas en formato AATSR. Estas imágenes han sido generadas específicamente para este experimento, variando su tamaño de forma incremental, con la finalidad de evaluar las prestaciones de ambas versiones del algoritmo según se incrementa el tamaño de la imagen de entrada.

El motivo de hacerlo así se debe a que, en nuestro caso, el resto de entradas del algoritmo: el mapa de usos de suelo GlobCover y la tabla de emisividades; son siempre los mismos, independientemente de la imagen AATSR que se vaya a evaluar.

4.5.2. Comparación del rendimiento de ambos algoritmos

Una vez estaban preparadas ambas versiones del algoritmo (original/secuencial y paralelizada), tras aplicarles las modificaciones pertinentes para poder realizar las medidas en cuestión, se comenzó con la ejecución del experimento.

Dicho experimento consistió en ejecutar ambas versiones del algoritmo con imágenes generadas sintéticamente, cuyo tamaño, en número de píxeles, variaba entre 1 millón y 200 millones de píxeles. De cada ejecución se midieron los tiempos de ejecución de cada versión del algoritmo, para poder compararlos posteriormente. Para ello, se empleó el núcleo de una CPU Intel Core i7 a 2.67 GHz para evaluar el algoritmo original. Mientras que para evaluar el optimizado, se empleó un tarjeta gráfica Nvidia GeForce GT 240 (dispone de 96 núcleos CUDA).

El resultado de éste experimento se muestra en la Figura 4.16. En esta imagen se ha representado la evolución del tiempo de ejecución (en milisegundos) de cada una de las versiones del algoritmo conforme va aumentando el tamaño de las imágenes (número

4.5. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LA VERSIÓN PARALELIZADA

de píxeles de las mismas).

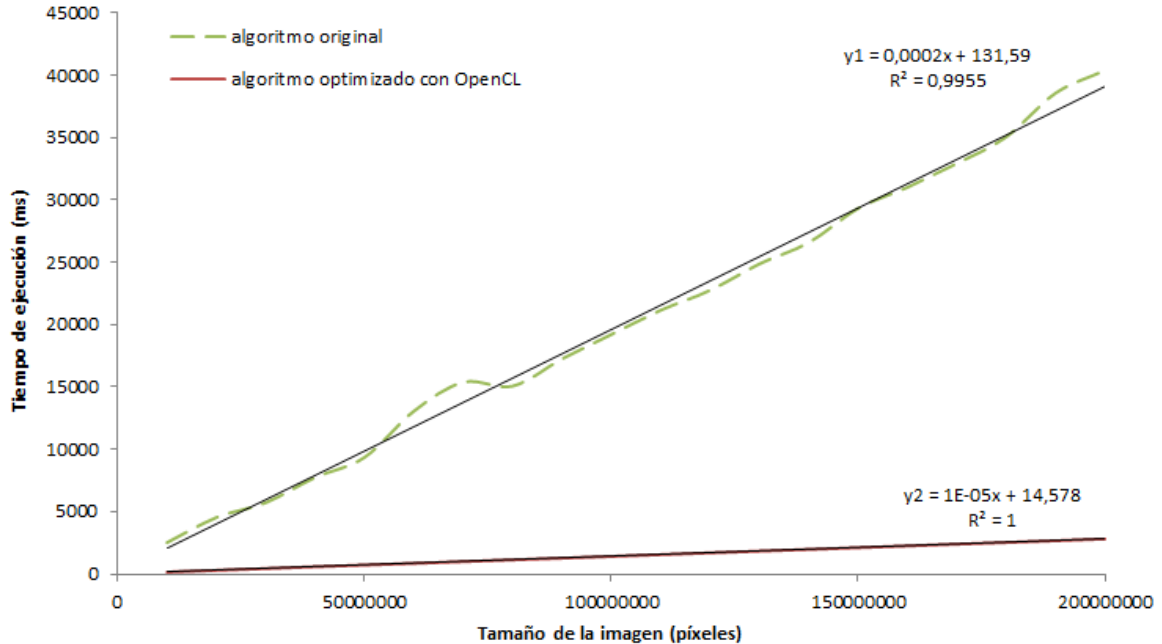


Figura 4.16: Comparación del tiempo de ejecución (en milisegundos) de cada una de las versiones (secuencial y paralelizada) del algoritmo principal del sistema, en función del número de píxeles de la imagen procesada.

Observando la Figura 4.16, se aprecia claramente la ganancia, en cuanto a tiempo de ejecución se refiere, de la versión paralelizada mediante el uso de la GPU, respecto a la versión original (secuencial) del algoritmo. De modo que, en el momento que comenzamos a trabajar con imágenes relativamente grandes, como suele ser normalmente nuestro caso (imágenes del orden de 1,000,000 de píxeles en adelante), vemos como el coste computacional de la aplicación tradicional (ejecutada en la CPU) crece más rápidamente, mientras que el coste de la aplicación que emplea OpenCL crece mucho más lentamente, ya que como se puede ver en la gráfica, su pendiente es mucho menor.

Con esta optimización del algoritmo original, se obtiene una aceleración de hasta 20 veces la velocidad de ejecución inicial, según el tamaño de la imagen de entrada. Ésta diferencia permite incrementar enormemente el trabajo realizado en la misma cantidad de tiempo, lo que permite producir mapas de emisividad de varios días e incluso meses rápidamente.

Por ejemplo, para producir los mapas de un mes, como los que se han mostrado en secciones anteriores de este mismo capítulo, se requiere procesar unas 290 imágenes de media por mes. El ahorro en tiempo que la versión optimizada aporta es de casi 2 horas. Una diferencia nada despreciable, sobre todo en aplicaciones en las que se han

de tomar decisiones y planificar recursos en función del resultado de este proceso para el mismo día.

Con esto se demuestra claramente que el uso de OpenCL (y la GPGPU en general) en el algoritmo principal de nuestro sistema permite acelerar el procesamiento de las imágenes drásticamente, ayudando a reducir notablemente el tiempo consumido para procesar las imágenes de satélite y generar los mapas de emisividad resultantes.

Capítulo 5

Conclusiones

A lo largo de esta memoria hemos presentado un problema actual con infinidad de aplicaciones futuras, hemos propuesto un método operativo para resolverlo y hemos desarrollado un sistema capaz de aplicar dicho método de forma automática y rápida.

En este último capítulo, vamos a presentar las conclusiones a las que llegamos después de realizar el presente Trabajo Fin de Máster. Así como posibles trabajos futuros para seguir evolucionando el algoritmo diseñado y el sistema desarrollado hacia el objetivo final: la generación automática de mapas de emisividad de la superficie terrestre a nivel global.

5.1. Conclusiones del trabajo realizado

A continuación, destacamos las que consideramos las conclusiones más importantes y que resumen mejor el trabajo realizado al desarrollar este Trabajo Fin de Máster. Éstas son las siguientes:

En este trabajo, se ha propuesto un método que determina la emisividad térmica de la superficie terrestre a partir de datos del dominio visible-infrarrojo cercano (V/IC). Éste método tiene su fundamento en el modelo teórico desarrollado por Valor y Caselles (1996).

Dada la escasa sensibilidad del método al error en el cálculo de la cobertura vegetal (P_v), se ha elegido un método basado en el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) como modo para estimar este parámetro vegetal. El motivo de esta elección se basa en que este método resulta suficiente, dado el estrecho margen de emisividad en que nos estamos moviendo ($0,950 \leq \varepsilon \leq 0,990$).

Se ha estudiado el modo de simplificar el método original para facilitar el diseño de un algoritmo que permita aplicarlo de forma completamente automática, llegando a determinar una ecuación para estimar la emisividad en la región 10,0-12,5 μm , basada en coeficientes medios dependientes únicamente del tipo de superficie, que es completamente operativa:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + 4 < d\varepsilon > P_v (1 - P_v)$$

Éste nuevo algoritmo se basa en la combinación del método original (Valor y Caselles 1996) con la clasificación de tipos de suelo GlobCover. Esto permite considerar todo tipo de superficies, no sólo las superficies naturales, relacionadas con la cobertura vegetal, si no también con otras zonas no vegetadas como por ejemplo: zonas urbanas, áreas con agua o nieve. En vez de aplicar parámetros predefinidos y fijos para todas las superficies, nuestro algoritmo permite también ajustar los coeficientes del método para calcular la emisividad dependiendo en las características del tipo de superficie (composición, geometría, etc.).

Además, el algoritmo está dotado con la capacidad de estimar de forma dinámica la cobertura vegetal (P_v) en cada época del año. Esto permite capturar las posibles variaciones de la emisividad terrestre (LSE) debidas a los cambios en las características de la superficie, incluyendo la detección de posibles apariciones de agua, nieve o hielo de forma temporal. El análisis de sensibilidad del método muestra que en la mayoría de casos se puede determinar la emisividad de la superficie terrestre con un error del orden de $\pm 1\%$ o menor, lo que implica un error en la determinación de la temperatura terrestre menor de ± 1 K.

Éstos resultados se han confirmado con una validación llevada a cabo con datos tomados en campañas de campo en la zona de arrozales de Valencia. La diferencia entre los valores estimados por el algoritmo y los valores medidos en las dos campañas

5.2. PUBLICACIONES DERIVADAS

en épocas distintas del año ha sido siempre menor que el error calculado por el análisis de sensibilidad del método propuesto.

Éste sistema, con el empleo de la función simple de interpolación entre áreas medidas por satélite y los mapas de usos de suelo, podría ser la solución más adecuada para el cálculo de la emisividad, pues hallar el tipo de suelo de cada área y así obtener los coeficientes adecuados para la misma, es siempre un procedimiento más exacto que considerar un valor único de emisividad o coeficientes fijos.

Por otro lado, en este trabajo se ha explicado y razonado la importancia de realizar el cálculo de la emisividad, como paso imprescindible en la estimación de la temperatura de la superficie terrestre a partir de imágenes de satélite. También se ha justificado la necesidad de que este proceso se realice en el menor tiempo posible. Para conseguir este objetivo, se ha empleado el paradigma de la programación de propósito general en GPUs (GPGPU), junto a la tecnología que ofrece OpenCL para mejorar el rendimiento del algoritmo, mediante la paralelización a nivel de datos del mismo.

Se ha realizado un experimento para evaluar la aceleración obtenida con la paralelización del algoritmo original. Dicho experimento ha demostrado claramente que el uso de OpenCL (y la GPGPU en general) en el algoritmo principal del sistema desarrollado ha mejorado el rendimiento del mismo notablemente. Se ha reducido drásticamente el tiempo de ejecución del mismo y, por tanto, se ha acelerado sensiblemente la producción de los mapas de emisividad a partir de imágenes de satélite.

Por tanto, el algoritmo diseñado en este trabajo, junto al sistema desarrollado que lo implementa, vienen a llenar el hueco existente en la actualidad entre los distintos modos de generar de mapas de emisividad a partir de imágenes de satélite.

Cabe destacar que, aunque en este trabajo, la metodología desarrollada se ha aplicado sobre imágenes del sensor AATSR, puede ser fácilmente adaptada y completamente válida para otros sensores del infrarrojo térmico (TIR).

5.2. Publicaciones derivadas

Las siguientes publicaciones han surgido con motivo de la realización de este Trabajo Fin de Máster:

Comunicaciones en congresos:

1. Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J.M. y Caselles, V., *An enhanced vegetation cover method for automatic generation of land surface emissivity maps*, **SPIE OP090 Optical Engineering + Applications Symposium**. Agosto 2009. San Diego (USA).
2. Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J.M. y Caselles, V., *Automatic generation*

of emissivity maps on a European scale, **2009 IGARSS**. Julio 2009. Cape Town (South Africa).

3. Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J.M. y Caselles, V., *Generación automática de mapas de emisividad*, **XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección**. Septiembre 2009. Calatayud (Spain).

Capítulos de libro:

1. Caselles, E., Abad, F., Valor, E. y Caselles, V. (2011). *Automatic Generation of Land Surface Emissivity Maps*, **Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation**, Juan Blanco y Houshang Kheradmand (Ed.), ISBN: 978-953-307-621-8, InTech.

Artículos en revistas:

1. Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J. M. y Caselles, V., *Generación automática de mapas de emisividad para el sensor AATSR*, **Revista de Teledetección**. ISSN: 1988-8740. 2009. 32: 14-24.
2. Caselles, E., Valor, E., Abad, F., y Caselles, V., *Automatic classification-based generation of thermal infrared land surface emissivity maps using AATSR data over Europe*, **Remote Sensing of Environment**. 2012. (En prensa). *Factor de impacto 2010*: 3.951 (según el *Thomson Reuters Journal Citation Reports* de 2011).

5.3. Trabajo futuro

En este proyecto hemos conseguido que, de forma totalmente automática, se pueda determinar la emisividad de la superficie terrestre, con un error del $\pm 1\%$, en un tiempo muy reducido. Aunque lo hemos validado en la zona de Valencia, comprobando que se comete dicho error tanto en situación de máxima vegetación como en situación de suelo descubierto; sería necesario, en un futuro cercano, seguir validándolo con medidas de campo de otras zonas de Europa.

Por otro lado, en principio, el sistema se ha desarrollado para que sea tan exacto como el modelo ha permitido. Pero en el futuro, sería interesante continuar evolucionando los algoritmos que emplea, de modo que se logre bajar el coste computacional de los mismos, sin perder la exactitud en los cálculos. Esto es, hacer más eficiente el sistema.

También se ha dotado al sistema de la capacidad de detectar la presencia de agua, nieve o hielo de forma dinámica, permitiendo una menor dependencia en las condiciones

5.3. TRABAJO FUTURO

climatológicas. Pero sería interesante hacer que el sistema fuera capaz de diferenciar entre imágenes de distintas épocas del año, ya que no todas las superficies mantienen las mismas características de vegetación y suelo a lo largo de las diferentes estaciones del año. Así, podríamos realizar con mayor exactitud los cálculos, según la fecha en la que fue tomada la imagen AATSR original, al aplicar valores a los coeficientes y parámetros más precisos.

Por supuesto, ésta solución se ha aplicado para el territorio europeo, pero teniendo en todo momento en mente la necesidad de poder permitir, en un futuro cercano, aplicarlo a nivel mundial. Pues aunque haya algunas diferencias más a tener en cuenta, en la actualidad se dispone de herramientas suficientes para poder hacerlo.

Por otro lado, en un primer intento por acelerar la producción de los mapas de emisividad, se ha conseguido mejorar notablemente el rendimiento del sistema mediante el empleo de la GPU, optimizando el algoritmo principal. Pero sería interesante seguir trabajando en la mejora del rendimiento de los demás algoritmos empleados por el sistema. Especialmente, el algoritmo de interpolación por áreas ocupadas que permite obtener los parámetros más adecuados para los coeficientes del método, pero conlleva bastantes cálculos adicionales. Optimizar su funcionamiento supondría otra mejora notable en el rendimiento del sistema.

Bibliografía

Anding, D. y Kauth, R., 1970, Estimation of sea surface temperature from space, *Remote Sensing of Environment*, 1: 217-220.

Adams, J.B., Smith, M.O. y Johnson, P.E., 1986, Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site, *Journal of Geophysical Research*, 91: 8098-8112.

Anton, Y.A. y Ross, Y.K., 1990, Emissivity of a soil-vegetation system, *Soviet Journal of Remote Sensing*, 7(5): 859-869.

Asrar, G. (ed.), 1989, *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New York.

Becker, F., 1980, Thermal infrared remote sensing principles and applications, en *Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology* (G. Fraysse ed.), Balkema.

Baldrige, A. M., Hook, S. J., Grove, C. I. and Rivera, G., 2009, The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113: 711-715.

Becker, F. y Li, Z.-L., 1990, Towards a local split-window method over land surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, 11: 369-394.

Becker, F. y Li, Z.-L., 1995, Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems, *Remote Sensing Reviews*, 12: 225-253.

Bisquert, M., Caselles, E., Sánchez, J.M. y Caselles, V. 2012. Application of Artificial Neural Networks and Logistic Regression to the Prediction of Forest Fire Danger in Galicia Using MODIS Data. *International Journal of Wildland Fire*. (En prensa).

Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J. M. y Caselles, V., 2009a, An enhanced vegetation cover method for automatic generation of land surface emissivity maps, *SPIE OP09O Optical Engineering + Applications Symposium*, San Diego (USA), 2-6 agosto.

Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J. M. y Caselles, V., 2009b, Automatic generation of emissivity maps on a European scale, *2009 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Ciudad del Cabo (África), 12-17 julio.

Caselles, E., Abad, F., Valor, E., Galve, J. M. y Caselles, V., 2009c, Generación auto-

mática de mapas de emisividad, *Revista de Teledetección*.

Caselles, V. y Sobrino, J.A., 1989, Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 29: 135-146.

Caselles, V., Sobrino, J.A. y Coll, C., 1992, A physical model for interpreting the land surface temperature obtained by remote sensors over incomplete canopies, *Remote Sensing of Environment*, 39: 203-211.

Caselles, V., Coll, C., Valor, E. y Rubio, E., 1997, Thermal band selection for the PRISM instrument 2. Analysis and Comparison of the existing atmospheric and emissivity correction methods for land surface temperature recovery, *Journal of Geophysical Research*, 102(D16): 19.611–19.627.

Coll, C., Valor, E., Galve, J.M., Mira, M., Bisquert, M., García-Santos, V., Caselles, E. y Caselles, V., 2012b, Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 116: 211-225.

Coll, C., Caselles, V., Valor, E., Niclòs, R., Sánchez, J.M., Galve, J.M. y Mira, M. (2007). Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 110: 162-175.

Coll, C. y Caselles, V., 1997, A split-window algorithm for land surface temperature from AVHRR data: Validation and algorithm comparison, *Journal of Geophysical Research*, 102(D14): 16.697–16.713.

Coll, C., Caselles, V. y Valor, E., 1993, Atmospheric correction and determination of sea surface temperature in midlatitudes from NOAA-AVHRR data, *Atmospheric Research*, 30: 233-250.

Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J.A. y Valor, E., 1994, On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, 15: 105-122.

Di Gregorio, A. y Jansen, L., 2000, Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User, FAO Corporate Document Repository.

Gilabert, M.A., Segarra, D. y Meliá, J., 1994, Simulation of citrus orchard reflectance by means of a geometrical canopy model, *International Journal of Remote Sensing*, 15(13): 2559-2582.

Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DeGirolamo, N. E., Bayr, K. J. y Jin, J. M., 2002, MODIS Snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83: 181-194.

Horwitz, H.M., Nalepka, R.F., Hyde, P.D. y Morgenstern, J.P., 1971, Estimating the proportions of objects within a single resolution element of a multispectral scanner, en *Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 1307-1320.

Bibliografía

- Huete, A.R., 1988, A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- ISO/IEC 9899. 2011. *Programming Languages – C*. International Standards Organization.
- Jasinski, M.F. y Eagleson, P.S., 1989, The structure of red-infrared scattergrams of semi-vegetated landscapes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(4): 441-451.
- Kaufman, Y.J. y Tanré, D., 1992, Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30: 261-270.
- Kealy, P.S. y Hook, S.J., 1993, Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(6): 1155-1164.
- Khailany, B.K., Williams, T., Lin, J., Long, E.P., Rygh, M., Tovey, D.W. y Dally, W.J., 2008, A Programmable 512 GOPS Stream Processor for Signal, Image, and Video Processing, *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol.43, no.1, pp.202-213.
- Kreith, F., 1962, *Radiation heat transfer*, International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania.
- Labeled, J. y Stoll, M.P., 1991, Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: Laboratory investigations on bare soil, *International Journal of Remote Sensing*, 12: 2299-2310.
- Li, Z.-L. y Becker, F., 1993, Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 43: 67-85.
- Masuda, K., Takashima, T. y Takayama, Y., 1988, Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions, *Remote Sensing of Environment*, 24: 313-329.
- McMillin, L.M., 1975, Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption, *Journal of Geophysical Research*, 36: 5113-5117.
- McMillin, L.M. y Crosby, D.S., 1984, Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique, *Journal of Geophysical Research*, 89(C3): 3655-3661.
- Mira, M., Valor, E., Boluda, R., Caselles, V. y Coll, C., 2007, Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils: Implication for land surface temperature determination. *Journal of Geophysical Research* 112, doi: 10.1029/2007JF000749.
- Munshi, A., Gaster, B.R., Mattson, T.G., Fung, J. y Ginsburg, D., 2011, *OpenCL Programming Guide*. Edición: 1. Addison-Wesley Educational Publishers Inc. ISBN-10: 0321749642
- Norman, J.M., Castello, S. y Balick, L.K., 1994, Directional infrared temperature and

emissivity of vegetation: measurements and models, Proceedings of the 6th Symposium Int. "Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing", Val d'Isère, ESA, pp. 749-758.

Oliosio, A., 1995, Simulating the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index, *International Journal of Remote Sensing*, 16(16): 3211-3216.

Prabhakara, C., Dalu, G. y Kunde, V.G., 1974, Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 to 13 μm window region, *Journal of Geophysical Research*, 79: 5039-5044.

Prata, A.J., Caselles, V., Coll, C., Ottlé, C. y Sobrino, J.A., 1995, Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects, *Remote Sensing Reviews*, 12: 175-224.

Price, J.C., 1984, Land surface temperature measurements from the split-window channels of the NOAA 7 AVHRR, *Journal of Geophysical Research*, 89(D5): 7231-7237.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. y Harlan, J.C., 1974, Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, pp. 371.

Rubio, E., Caselles, V. y Badenas, C., 1997, Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8 - 14 mm wave band: Analysis of two field methods, *Remote Sensing of Environment*, 59: 490-521.

Salisbury, J.W. y D'Aria, D.M., 1992, Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window, *Remote Sensing of Environment*, 42: 83-106.

Salisbury, J.W. y D'Aria, D.M., 1994, Emissivity of terrestrial materials in the 3-5 μm atmospheric window, *Remote Sensing of Environment*, 47: 345-361.

Sánchez, J.M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V.A. y Telesca, V., 2008, Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region, *Journal of Hydrology*, Volume 351, Issues 172, 30 March 2008, Pages 58-70, ISSN 0022-1694, 10.1016/j.jhydrol.2007.11.041.

Schmugge, T.J., 1995, Radiometry at infrared and microwave frequencies, en *Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions*, B.J. Choudury, Y.H. Kerr, E.G. Njoku y P. Pampaloni eds., Utrecht, The Netherlands, pp. 193-204. Bibliografía 165

Strong, A.E. y McClain, E.P., 1984, Improved ocean surface temperatures from space -Comparisons with drifting buoys, *Bulletin of the American Meteorology Society*, 65(2): 138-142.

Sutherland, R.A. y Bartholic, J.F., 1977, Significance of interpreting thermal radiation from a terrestrial surface, *Journal of Applied Meteorology*, 16: 759-763.

Bibliografía

Valor, E. y Caselles, V., 1996, Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas, *Remote Sensing of Environment*, 57: 167-184.

Valor, E., 1997, Determinación de la emisividad de la superficie terrestre a partir de imágenes de satélite. Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.

Valor, E., Caselles, V., Coll, C., Sánchez, F., Rubio, E. y Sospedra, F., 2000, Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR, *Revista de Teledetección*, 14: 5-10.

Valor, E. y Caselles, V., 2005, Validation of the Vegetation Cover Method for land Surface Emissivity Estimation, en *Recent Advances in Thermal Remote Sensing* (ISBN: 81-7736-164-3), 1-20, Research Signpost, Kerala (India).

Van de Griend, A.A. y Owe, M., 1993, On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1119-1131.

Ying Zhang, Xuejun Yang, Guibin Wang, Ian Rogers, Gen Li, Yu Deng y Xiaobo Yan, 2008, Scientific Computing Applications on a Stream Processor, *ispass*, pp.105-114, ISPASS 2008 - IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and software.

Bibliografía *on-line*

- Bicheron, P., Huc, M., Henry, C., Bontemps, S. y Lacaux, J. P. (2008) Globcover: Products Description Manual. Issue 2, Rev. 2.
Obtenido de http://ionia1.esrin.esa.int/images/GLOBCOVER_Product_Specification_v2.pdf
- Brockmann Consult GmbH. (2009a). BEAM Project 4.6 API.
Obtenido de <http://www.brockmann-consult.de/beam/doc/apidocs/index.html>
- Brockmann Consult GmbH. (2009b). BEAM User Manual.
Obtenido de <http://www.brockmann-consult.de/beam/doc/help/index.html>
- Burbeck, S. (1992). Applications Programming in Smalltalk-80(TM): How to use Model-View-Controller (MVC).
Obtenido de <http://st-www.cs.uiuc.edu/users/smarch/st-docs/mvc.html>
- Di Gregorio, A. y Jansen, L. (2000) Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User. FAO Corporate Document Repository.
Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>
- EEA. (2000). Corine land cover 2000 (CLC2000) seamless vector database. Obtenido de <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=950>
- ESA. (2009). Ionia GlobCover Portal. Obtenido de <http://ionia1.esrin.esa.int/>
- ESA. (2007). The AATSR Handbook. Obtenido de <http://envisat.esa.int/handbooks/aatsr/>
- IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic," *IEEE Std 754-2008*, pp.1-58, Aug. 29 2008. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4610935&isnumber=4610934>
- Khronos OpenCL Working Group. 2011. The OpenCL Specification Version: 1.1.
Obtenido de: <http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opencl-1.1.pdf>
- Moore, G.E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. Electronics Magazine, Volumen 38, N. 8. Obtenido de http://download.intel.com/museum/Moores_Law/ArticlesPress_Releases/Gordon_Moore_1965_Article.pdf
- Riggs, G.A., Barton, J.S., Casey, K.A., Hall, D.K. y Salomonson, V.V., 2000, MODIS Snow Products Users Guide.
<http://www.icesb.ucsb.edu/modis/SnowUsrGuide/usrguide.html>.

Bibliografía

Ritter, N. y Ruth, M. (2000) GeoTIFF Format Specification: GeoTIFF Revision 1.0.
Obtenido de <http://www.remotesensing.org/geotiff/spec/geotiffhome.html>

Apéndice A

Lista de símbolos, siglas y abreviaturas

AATSR: Advanced Along-Track Scanning Radiometer.

CLC2000: versión del año 2000 del producto Corine Land Cover.

d : parámetro que define la corrección de emisividad en el método monocanal.

d_i : término corrector en la relación NDVI-porcentaje de cobertura vegetal.

EEA: European Environment Agency.

ENVISAT: Environmental Satellite.

ESA: European Space Agency.

F : factor de forma pared-suelo (en radiancia).

F' : factor de forma pared-pared (en radiancia).

F_{p-s} : factor de forma pared-suelo (en flujo).

F_{s-p} : factor de forma suelo-pared (en flujo).

F_{p-p} : factor de forma pared-pared (en flujo).

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

G: factor de forma suelo-pared (en radiancia).

GLC: producto Ionia GlobCover de la ESA.

GLC 2.2: versión 2.2 del producto GlobCover.

GPU: unidad de procesamiento gráfico.

GPGPU: programación de ámbito general en la GPU.

H: altura de la planta.

i : abreviatura para NDVI.

APÉNDICE A. LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS

i_v : abreviatura para NDVI de la vegetación.

i_s : abreviatura para NDVI del suelo.

IC: canal del infrarrojo cercano.

IM: canal del infrarrojo medio.

L: anchura de una planta.

LCCS: Land Cover Classification System.

MERIS: MEdium Resolution Imaging Spectrometer.

OpenCL: Open Computing Language.

P_v : porcentaje de cobertura vegetal.

V: canal del visual.

$d\varepsilon_k$: término de cavidad en el canal k.

$\langle d\varepsilon \rangle$: término de cavidad medio para la ecuación operativa.

$\langle d\varepsilon \rangle_{ef}$: término de cavidad efectivo representativo de una zona determinada.

δx o $\delta(x)$: error en la variable x.

ε_k : emisividad efectiva en el canal k.

ε_{k0} : término directo de la emisividad efectiva en el canal k.

ε_{ks} o ε_s : emisividad del suelo en el canal k.

ε_{kp} o ε_p : emisividad de la pared en el canal k.

ε_{kt} o ε_t : emisividad del techo en el canal k.

ε_{kv} o ε_v : emisividad de la vegetación en el canal k.

ρ_k : reflectividad en el canal k.

ρ_{kv} : reflectividad de la vegetación en el canal k.

ρ_{ks} : reflectividad del suelo en el canal k.

θ : ángulo cenital de observación.

Apéndice B

Leyenda GlobCover (Western Europe)

Valor	Descripción	Rojo	Verde	Azul
11	Post-flooding or irrigated croplands (or aquatic)	170	240	240
14	Rainfed croplands	255	255	100
20	Mosaic cropland (50-70%) / vegetation (grassland/shrubland/forest) (20-50%)	220	240	100
30	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)	205	205	102
40	Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (>5m)	0	100	0
50	Closed (>40%) broadleaved deciduous forest (>5m)	0	160	0
60	Open (15-40%) broadleaved deciduous forest/woodland (>5m)	170	200	0
70	Closed (>40%) needleleaved evergreen forest (>5m)	0	60	0
90	Open (15-40%) needleleaved deciduous or evergreen forest (>5m)	40	100	0
100	Closed to open (>15%) mixed broadleaved and needleleaved forest (>5m)	120	130	0
110	Mosaic forest or shrubland (50-70%) / grassland (20-50%)	140	160	0
120	Mosaic grassland (50-70%) / forest or shrubland (20-50%)	190	150	0
130	Closed to open (>15%) (broadleaved or needleleaved, evergreen or deciduous) shrubland (<5m)	150	100	0
140	Closed to open (>15%) herbaceous vegetation (grassland, savannas or lichens/mosses)	255	180	50
150	Sparse (<15%) vegetation	255	235	175
170	Closed (>40%) broadleaved forest or shrubland permanently flooded - Saline or brackish water	0	150	120
180	Closed to open (>15%) grassland or woody vegetation on regularly flooded or waterlogged soil - Fresh, brackish or saline water	0	220	130
190	Artificial surfaces and associated areas (Urban areas >50%)	195	20	0
200	Bare areas	255	245	215
210	Water bodies	0	70	200
220	Permanent snow and ice	255	255	255
230	No data (burnt areas, clouds,...)	0	0	0

Figura B.1: Leyenda GlobCover con la clasificación regional de usos de suelo para Europa occidental.