

---

# Efecto de la corrección atmosférica en el dominio óptico en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico

---



VNIVERSITAT<sup>DE</sup> VALÈNCIA

Tesis Doctoral

Lucas Martínez Rodrigo

Programa de Doctorat 345 B Física del Medi Ambient  
Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

Facultat de Física  
Universitat de València

Octubre de 2014

Documento maquetado con TEXIS v.1.0.

Este documento está preparado para ser imprimido a doble cara.

# Efecto de la corrección atmosférica en el dominio óptico en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico

Memoria presentada por  
Lucas Martínez Rodrigo  
para optar al título de Doctor en Física

Dirigida por  
Enric Valor Micó  
Vicente Caselles Miralles

Programa de Doctorat 345 B Física del Medi Ambient  
Departament de Física de la Terra i Termodinàmica  
Facultat de Física  
Universitat de València

Octubre de 2014



Enric Valor Micó, Profesor Titular de Física de la Tierra de la Universitat de València

y

Vicente Caselles Miralles, Catedrático de Física de la Tierra de la Universitat de València

CERTIFICAN

Que la presente Memoria titulada “Efecto de la corrección atmosférica en el dominio óptico en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico” ha sido realizada bajo su codirección en el Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Universitat de València por Lucas Martínez Rodrigo, y constituye su Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Física.

Y para que así conste en acta, en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente certificado en Burjassot, el 30 de octubre de 2014.

Prof. Enric Valor Micó

Prof. Vicente Caselles Miralles



*Otium sine litteris, mors est et hominis vivi sepultura*  
*(Lucius Annæus Seneca)*



# Agradecimientos

Muchas son las personas e instituciones que con su aportación y cooperación han hecho posible la realización de esta Tesis Doctoral. A todas ellas deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

A los Directores, los profesores Vicente Caselles Miralles y Enric Valor Micó, por su acogida en el Grup de Teledetecció Tèrmica (GTT) de la Universitat de València. Me han acompañado a lo largo de los años de descubrimiento de la teledetección y la metodología científica. A ellos debo los fundamentos que han hecho posible la elaboración de esta Tesis Doctoral.

Al Profesor Joaquín Melià, por su acogida en la Unitat d'Investigació en Teledetecció (UIT), e igualmente a su sucesora en la dirección del Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, la Profesora Soledad Gandía.

A mi familia por todo el soporte y confianza. A mis amigos por caminar a mi lado. A mis compañeros de trabajo por algo más que discusiones científicas. A todos vosotros, porque esta Tesis se ha construido en parte con el tiempo que era vuestro.

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación económica de los siguientes proyectos: CGL2007-64666 (Ministerio de Educación y Ciencia), CGL2010-17577 (Ministerio de Ciencia e Innovación) y CGL2013-46862-C2-1-P (Ministerio de Economía y Competitividad).



# Resumen

La temperatura de la superficie de la Tierra es una magnitud física clave para el análisis de muchos procesos de la naturaleza. Su determinación desde satélite en el infrarrojo térmico implica resolver el efecto acoplado de la atmósfera y la emisividad térmica ( $\epsilon$ ) en dicho dominio espectral. El método de la cobertura vegetal (MCV) es un método para la determinación exacta de la emisividad, operativo y preciso, basado en la determinación de la cobertura vegetal ( $P_v$ ) con el índice de vegetación normalizada por diferencia ( $NDVI$ ). Los índices de vegetación se calculan con reflectividades del dominio óptico, que se encuentran afectadas, en cierta medida, por la interacción de la radiación solar con la atmósfera. En este trabajo, se analiza cómo la corrección atmosférica en el dominio óptico puede ayudar en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico con el MCV, así como su repercusión en la determinación de la temperatura. Para esto, se plantea y discute una metodología alternativa para el MCV con el uso de cualquier índice de vegetación que se resuelve de forma numérica para la obtención de la  $P_v$ . Los efectos de la atmósfera en el dominio óptico, que afectan a la determinación de la  $P_v$  y, por tanto, a la emisividad y temperatura, se modelizan con una ecuación de transferencia radiativa en el óptico. Esta ecuación se aplica con simulaciones de transferencia radiativa del *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S). Este método se aplica a espectros de píxeles puros y mixtos, generados a partir de nueve muestras de suelo y tres muestras de vegetación puras, seleccionadas de bibliotecas espetrales, a la máxima resolución espectral del modelo 6S. Posteriormente se computan los valores de canal del AVHRR, MODIS y MERIS en el visible, infrarrojo próximo e infrarrojo medio con los que calcular los índices de vegetación, de los que se deriva la  $P_v$  y la  $\epsilon$ . El análisis del efecto de la atmósfera se realiza para dos entornos de suelo y vegetación: suelo radiométricamente homogéneo y suelo radiométricamente heterogéneo. En todos los casos se calcula la desviación de los resultados por efecto de la atmósfera respecto a los datos sin efecto atmosférico. Adicionalmente, con los datos MODIS, se estudian veinte alternativas al  $NDVI$  en el MCV, con la metodología propuesta, para resolver si se puede salvar la dependencia del  $NDVI$  a la radiometría del suelo, y los efectos en la posterior determinación de la emisividad en el infrarrojo térmico. Para el mejor índice alternativo se calcula también el efecto de la

atmósfera para dos entornos de suelo y vegetación. El efecto atmosférico que más influye en el *NDVI* es la dispersión por aerosoles. Al emplear el *NDVI*, la  $P_v$  presenta una variación apreciable en el caso de un suelo radiométricamente heterogéneo, mientras que es poco apreciable en el caso homogéneo. En el primer caso, el comportamiento de la  $\epsilon$  es semejante al de la  $P_v$ , con una variación apreciable en el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, lo que implica leves variaciones en temperatura, comprendidas entre +0,07 K y -0,04 K. Sin embargo, en el caso heterogéneo, hay una importante variación de la  $\epsilon$  que comporta importantes variaciones en temperatura de entre +2,5 K y -1,0 K. La radiometría de un suelo desprovisto de vegetación, sin la concurrencia del efecto atmosférico, afecta tanto a la  $P_v$  como a la  $\epsilon$ , con una variación en temperatura de entre +3 K y -0,3 K. De esto se concluye que la emisividad térmica es poco sensible a la atmósfera pero muy sensible a la radiometría del suelo. El índice que mejor comportamiento demuestra frente al suelo en esta Tesis es el *WDVI* (*Weighted Difference Infrared Index*). El efecto atmosférico que más modifica el *WDVI* también es la dispersión por aerosoles. En este caso, tanto la  $P_v$  como la  $\epsilon$  se muestran menos sensibles que al calcularlas con el *NDVI*, con una variación en la temperatura de entre +0,9 K y -0,2 K. El efecto de la atmósfera en la  $P_v$  y la  $\epsilon$ , con todas las simulaciones atmosféricas y en los casos de un suelo radiométricamente homogéneo y heterogéneo, es inferior al del *NDVI*. En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, implica leves variaciones en temperatura comprendidas entre 0,14 K y -0,09 K, mientras que en el caso heterogéneo, implica variaciones en temperatura de entre +0,9 K y -0,2 K. Estos resultados con el *WDVI* son mejores que los correspondientes con el *NDVI*. En conclusión, se puede reducir la sensibilidad de la emisividad térmica a la atmósfera y a la radiometría del suelo desprovisto de vegetación utilizando en el MCV un índice como el *WDVI*, principalmente por su menor sensibilidad al efecto del suelo. Sin embargo, la línea de suelo no siempre está disponible para aplicar el MCV, por lo que la operatividad de esta alternativa puede ser limitada en tal caso.

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Glosario</b>	<b>XXVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Interés de la medida de la emisividad de la superficie . . . . .	1
1.2. La atmósfera en el dominio óptico . . . . .	4
1.3. Determinación precisa de la emisividad . . . . .	5
1.4. Objetivo y metodología de trabajo . . . . .	6
1.5. Estructura de la memoria . . . . .	7
<b>2. Metodología</b>	<b>9</b>
2.1. Emisividad térmica y método MCV . . . . .	9
2.2. Determinación alternativa de la $P_v$ . . . . .	12
2.2.1. $RVI$ . . . . .	13
2.2.2. $PVI$ . . . . .	14
2.2.3. $NDII$ . . . . .	14
2.2.4. $WDVI$ . . . . .	14
2.2.5. $SAVI$ . . . . .	15
2.2.6. $IPVI$ . . . . .	15
2.2.7. $TSAVI$ . . . . .	15
2.2.8. $GEMI$ . . . . .	16
2.2.9. $ARVI$ . . . . .	16
2.2.10. $MSAVI$ . . . . .	16
2.2.11. $MSAVI2$ . . . . .	17
2.2.12. $EVI$ . . . . .	17
2.2.13. $NDWI$ . . . . .	17
2.2.14. $OSAVI$ . . . . .	17
2.2.15. $AFRI1,6$ . . . . .	18
2.2.16. $AFRI2,1$ . . . . .	18

---

2.2.17. <i>TDVI</i> . . . . .	18
2.2.18. <i>VARI</i> . . . . .	18
2.2.19. <i>WDRVI</i> . . . . .	19
2.2.20. <i>NMDI</i> . . . . .	19
2.3. Generación de muestras a analizar . . . . .	19
2.4. Transferencia radiativa en el dominio óptico . . . . .	20
2.5. Simulaciones de transferencia radiativa con 6S . . . . .	22
2.6. Obtención de valores de canal . . . . .	23
2.7. Suelos radiométricamente homogéneo y heterogéneo . . . . .	25
2.8. Método de análisis de las diferencias . . . . .	27
<b>3. Datos</b>	<b>29</b>
3.1. Espectros de vegetación y suelo . . . . .	29
3.1.1. Selección de espectros de vegetación . . . . .	30
3.1.2. Selección de espectros de suelo . . . . .	31
3.1.3. Espectros mixtos y valores de la $P_v$ . . . . .	33
3.2. Configuraciones del modelo 6S . . . . .	34
3.3. Sensibilidad espectral . . . . .	37
<b>4. Resultados con <i>NDVI</i></b>	<b>41</b>
4.1. Atmósfera e índice <i>NDVI</i> . . . . .	42
4.2. Atmósfera y $P_v$ calculada con el <i>NDVI</i> . . . . .	51
4.2.1. Suelo radiométricamente homogéneo . . . . .	52
4.2.2. Suelo radiométricamente heterogéneo . . . . .	56
4.3. Atmósfera y $\epsilon$ calculada con el <i>NDVI</i> . . . . .	60
4.3.1. Suelo radiométricamente homogéneo . . . . .	60
4.3.2. Suelo radiométricamente heterogéneo . . . . .	64
4.4. Efecto del suelo en la $P_v$ y la $\epsilon$ calculadas con <i>NDVI</i> . . . . .	68
4.4.1. Suelo y $P_v$ calculada con el <i>NDVI</i> . . . . .	69
4.4.2. Suelo y $\epsilon$ calculada con el <i>NDVI</i> . . . . .	71
<b>5. Resultados con IV alternativo</b>	<b>73</b>
5.1. Alternativas al uso del índice de vegetación <i>NDVI</i> . . . . .	74
5.2. Atmósfera e índice <i>WDVI</i> . . . . .	80
5.3. Atmósfera y $P_v$ calculada con el <i>WDVI</i> . . . . .	87
5.3.1. Suelo radiométricamente homogéneo . . . . .	88
5.3.2. Suelo radiométricamente heterogéneo . . . . .	91
5.4. Atmósfera y $\epsilon$ calculada con el <i>WDVI</i> . . . . .	93
5.4.1. Suelo radiométricamente homogéneo . . . . .	94
5.4.2. Suelo radiométricamente heterogéneo . . . . .	96
<b>6. Conclusiones</b>	<b>101</b>

---

<b>Bibliografía</b>	<b>105</b>
<b>A. Artículo publicado</b>	<b>113</b>



## Índice de figuras

4.3. Diferencia porcentual en el índice <i>NDVI</i> , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en el MERIS. Valores promedio, máximo y mínimo de la diferencia en función de la $P_v$ . . . . .	44
4.4. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte baja de la atmósfera para las muestras puras y mixtas de suelo y vegetación. . . . .	46
4.5. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada una de las atmósferas consideradas en el estudio. . . . .	48
4.6. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los modelos de aerosoles considerados en el estudio. . . . .	48
4.7. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada una de las concentraciones de aerosoles consideradas en el estudio. . . . .	49
4.8. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de iluminación considerados en el estudio. . . . .	49
4.9. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de observación considerados en el estudio. . . . .	50
4.10. Histograma de los valores del <i>NDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada una de las diferencias de azimut, entre iluminación y observación, consideradas en el estudio. . . . .	50
4.11. Diferencia porcentual en la $P_v$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>AVHRR</i> y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	53
4.12. Diferencia porcentual en la $P_v$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MODIS</i> y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	53
4.13. Diferencia porcentual en la $P_v$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MERIS</i> y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	54
4.14. Diferencia porcentual en la $P_v$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>AVHRR</i> y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	57
4.15. Diferencia porcentual en la $P_v$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MODIS</i> y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	57
4.16. Diferencia porcentual en la $P_v$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MERIS</i> y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	58

4.17. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>AVHRR</i> y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	61
4.18. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MODIS</i> y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	62
4.19. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MERIS</i> y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	62
4.20. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>AVHRR</i> y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	65
4.21. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MODIS</i> y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	66
4.22. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ por el efecto atmosférico para el sensor <i>MERIS</i> y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	66
4.23. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , calculada con el <i>NDVI</i> por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal. . . . .	70
4.24. Diferencia porcentual en la emisividad, $\epsilon$ , calculada con el <i>NDVI</i> por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal. . . . .	72
5.1. PVI para todas las muestras mixtas y puras en la parte baja de la atmósfera y PVI obtenido con el MCV . . . . .	77
5.2. WDVI para todas las muestras mixtas y puras en la parte baja de la atmósfera y WDVI obtenido con el MCV . . . . .	77
5.3. <i>NDVI</i> para todas las muestras mixtas y puras en la parte baja de la atmósfera y <i>NDVI</i> obtenido con el MCV . . . . .	78
5.4. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , calculada con el <i>WDVI</i> por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal. . . . .	79
5.5. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $\epsilon$ , calculada con el <i>WDVI</i> por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal. . . . .	79

5.6. Diferencia porcentual en el índice de vegetación, <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de la diferencia de <i>WDVI</i> en función de la cobertura vegetal. . . . .	81
5.7. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte baja de la atmósfera para las muestras puras y mixtas de suelo y vegetación. . . . .	83
5.8. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada una de las atmósferas consideradas en el estudio. . . . .	84
5.9. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los modelos de aerosoles considerados en el estudio. . . . .	84
5.10. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada una de las concentraciones de aerosoles consideradas en el estudio. . . . .	85
5.11. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de iluminación considerados en el estudio. . . . .	85
5.12. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de observación considerados en el estudio. . . . .	86
5.13. Histograma de los valores del <i>WDVI</i> en la parte alta de la atmósfera para cada una de las diferencias de azimut, entre iluminación y observación, consideradas en el estudio. . . . .	86
5.14. Diferencia porcentual en la $P_v$ calculada con el <i>WDVI</i> por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	89
5.15. Diferencia porcentual en la $P_v$ calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	92
5.16. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	94
5.17. Diferencia porcentual en la $\epsilon$ calculada con el <i>WDVI</i> por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	97

# Índice de Tablas

2.1. Canales del sensor AVHRR para el cálculo de índice de vegetación (Robel, 2009) . . . . .	24
2.2. Canales del sensor MODIS para el cálculo de índice de vegetación (NASA, 1999) . . . . .	24
2.3. Canales del sensor MERIS para el cálculo de índice de vegetación (ESA-Earth-Online, 2000) . . . . .	24
3.1. Muestras de vegetación de la biblioteca ASTER seleccionadas para representar la vegetación pura. . . . .	30
3.2. Muestras de suelo desprovisto de vegetación de la biblioteca ASTER seleccionadas para representar el suelo puro. . . . .	32
3.3. Descripción estadística de las categorías de la $P_v$ seleccionadas para el análisis del MCV con muestras mixtas de vegetación y suelo. . . . .	33
3.4. Magnitudes del modelo 6S consideradas como variables e intervalos empleados para las variables en las simulaciones. . . . .	35
4.1. Diferencia porcentual en el índice de vegetación, $NDVI$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de $NDVI$ entre las partes alta y baja de la atmósfera. . . . .	42
4.2. Diferencia porcentual en el índice $NDVI$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Valor de los cuartiles $Q1$ , $Q2$ y $Q3$ de la distribución de diferencias de $NDVI$ . . . . .	45
4.3. Diferencia porcentual de $NDVI$ , por el efecto atmosférico, para las muestras clasificadas por la $P_v$ y todas las simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias para cada intervalo de la $P_v$ . . . . .	46
4.4. Diferencia porcentual en la $P_v$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	52

4.5. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Cuartiles $Q1$ , $Q2$ y $Q3$ de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	55
4.6. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $P_v$ para cada intervalo de cobertura vegetal. . . . .	55
4.7. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	56
4.8. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles $Q1$ , $Q2$ y $Q3$ de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	59
4.9. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $P_v$ para cada intervalo de cobertura vegetal. . . . .	59
4.10. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	61
4.11. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores cuartiles $Q1$ , $Q2$ y $Q3$ de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	63
4.12. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal, $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $\epsilon$ para cada intervalo de cobertura vegetal. . . . .	64
4.13. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	65
4.14. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles $Q1$ , $Q2$ y $Q3$ de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	68

4.15. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal, $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $\epsilon$ para cada intervalo de cobertura vegetal.	69
4.16. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la $P_v$ .	70
4.17. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ .	71
 5.1. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, $P_v$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin efecto de la atmósfera, para el sensor MODIS. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la $P_v$ .	75
5.2. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, $\epsilon$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera, para el sensor MODIS. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ .	76
5.3. Diferencia porcentual en el índice de vegetación, $WDVI$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de $WDVI$ entre las partes alta y baja de la atmósfera.	80
5.4. Diferencia porcentual en el índice de vegetación, $WDVI$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Valores cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ de la distribución de diferencias de $WDVI$ .	82
5.5. Diferencia porcentual en el índice de vegetación, $WDVI$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal, y todas las simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de $WDVI$ para cada intervalo de la $P_v$ .	82
5.6. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el $WDVI$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $P_v$ .	88

5.7. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	89
5.8. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $P_v$ para cada intervalo de cobertura vegetal. . . . .	90
5.9. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	91
5.10. Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ de la distribución de diferencias de la $P_v$ . . . . .	92
5.11. Diferencia porcentual en la $P_v$ calculada con el <i>WDVI</i> por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la $P_v$ . . . . .	93
5.12. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	94
5.13. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores cuartiles $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	95
5.14. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal, $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $\epsilon$ para cada intervalo de cobertura vegetal. . . . .	96

5.15. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	97
5.16. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles $Q1$ , $Q2$ y $Q3$ de la distribución de diferencias de la $\epsilon$ . . . . .	98
5.17. Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el <i>WDVI</i> , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal, $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la $\epsilon$ para cada intervalo de cobertura vegetal. . . . .	98



# Glosario

*6S Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum.*

*a ángulo entre la línea de suelo y el eje NIR.*

*AFRI1,6 Aerosol Free Vegetation Index 1,6.*

*AFRI2,1 Aerosol Free Vegetation Index 2,1.*

*ANEM Adjusted Normalized Emissivity Method.*

*ARVI Atmospherically Resistant Vegetation Index.*

*ASCII American Standard Code for Information Interchange.*

*ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.*

*AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer.*

$A_i$  efecto atmosférico sobre la radiación directa para el canal  $i$  de un sensor.

$B_i$  efecto atmosférico sobre la radiación difusa para el canal  $i$  de un sensor.

$B_i(T)$  radiancia de cuerpo negro correspondiente a la temperatura real  $T$  en la banda  $i$ .

$B_i(T_{ai}^{\uparrow})$  radiancia ascendente emitida por la atmósfera en la banda  $i$ .

$B_i(T_i)$  radiancia medida por el sensor en la banda  $i$ .

*CBEM Classification-Based Emissivity Method.*

*EBM Emissivity Bounds Method.*

*EVI Enhanced Vegetation Index.*

$E_{is}$  irradiancia solar extraterrestre del canal  $i$ .

*GBE Grey Body Emissivity.*

*GEMI Global Environmental Monitoring Index.*

*IPVI Infrared Percentage Vegetation Index.*

*ISSTES Iterative Spectrally Smooth Temperature Emissivity Separation.*

$L_i^*$  radiancia medida por el canal  $i$  de un sensor.

$m$  pendiente de la línea de suelo.

*MCV Método de la cobertura vegetal.*

*MERIS MEdium Resolution Imaging Spectrometer.*

*MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.*

*MSAVI Modified Soil Adjusted Vegetation Index.*

- MSAVI2 Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index.*  
 $n$  ordenada de la línea de suelo.
- NBEM NDVI-Based Emissivity Method.*
- NDII Normalized Difference Infrared Index.*
- NDVI Normalized Difference Vegetation Index.*
- $NDVI_g$  valor del *NDVI* para el suelo desprovisto de vegetación.
- $NDVI_v$  valor del *NDVI* para la vegetación pura.
- NEM Normalization Emissivity Method.*
- NMDI Normalized Multiband Drought Index.*
- OSAVI Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index.*
- PVI Perpendicular Vegetation Index.*
- $P_v$  cobertura vegetal.
- $Q_i$  cuartil  $i$  de una distribución [ $i=1,2$  y  $3$ ].
- RCM Reference Channel Method.*
- RVI Ratio Vegetation Index.*
- $R_i^{ref}$  reflexión de la irradiancia atmosférica descendente en la banda  $i$ .
- SAVI Soil Adjusted Vegetation Index.*
- SNR relación señal ruido.
- $S_{ij}$  sensibilidad espectral para la longitud de onda  $j$  del canal  $i$  del sensor.
- $S_i$  albedo esférico de la atmósfera para el canal  $i$  de un sensor.
- $T$  temperatura termodinámica de la superficie observada.
- TDVI Transformed Difference Vegetation Index.*
- TES Temperature Emissivity Separation.*
- TISI Temperature-Independent Spectral Indices.*
- TSAVI Transformed Soil Adjusted Vegetation Index.*
- TSRM Two-Step Physical Retrieval Method.*
- TTM Two Temperature Method.*
- $T_4$  temperatura radiativa en el canal 4 del AVHRR.
- $T_5$  temperatura radiativa en el canal 5 del AVHRR.
- $T_i$  la temperatura radiativa en la banda  $i$ .
- VARI Visible Atmospheric Resistant Index.*
- WDRVI Wide Dynamic Range Vegetation Index.*
- WDVI Weighted Difference Infrared Index.*
- WDWI Normalized Difference Water Index.*
- $\delta T_a^\uparrow$  variación de temperatura radiativa de la atmósfera.
- $\epsilon$  emisividad térmica.
- $\epsilon(\theta)$  emisividad térmica en el ángulo  $\theta$ .
- $\epsilon_4(\theta)$  emisividad en el canal 4 del AVHRR en el ángulo  $\theta$ .
- $\epsilon_5(\theta)$  emisividad en el canal 5 del AVHRR en el ángulo  $\theta$ .
- $\epsilon_i(\theta)$  es la emisividad de la superficie en el canal  $i$  en el ángulo  $\theta$ .
- $\epsilon_{ig}$  es la emisividad de un suelo desprovisto de vegetación.

$\epsilon_{iv}$  es la emisividad de la vegetación pura.

$\mu_s$  coseno del ángulo cenital solar.

$\rho_{1g}$  reflectividad en rojo del suelo desprovisto de vegetación.

$\rho_{2g}$  reflectividad en infrarrojo próximo del suelo desprovisto de vegetación.

$\rho_{1v}$  reflectividad en rojo de la vegetación pura.

$\rho_{2v}$  reflectividad en infrarrojo próximo de la vegetación pura.

$\rho_{ai}$  radiancia retrodispersada por la atmósfera hacia el sensor para el canal  $i$  de un sensor.

$\rho_{blue}$  reflectividad en la región azul.

$\rho_{ci}$  reflectividad en la parte baja de la atmósfera de la superficie observada para el canal  $i$  de un sensor.

$\rho_{green}$  reflectividad del verde.

$\rho_i$  reflectividad en la banda  $i$ .

$\rho_i^*$  reflectividad extraterrestre equivalente, o reflectividad en el techo de la atmósfera, para el canal  $i$  de un sensor.

$\rho_{ig}$  reflectividad del suelo desprovisto de vegetación en la banda  $i$ .

$\rho_{iv}$  reflectividad de la vegetación pura en la banda  $i$ .

$\rho_j$  reflectividad espectral para la longitud de onda  $j$ .

$\rho_{nir}$  reflectividad del infrarrojo próximo.

$\rho_{red}$  la reflectividad del rojo.

$\rho_{swir1,2}$  reflectividad del infrarrojo medio ( $1, 2 \mu\text{m}$ ).

$\rho_{swir1,6}$  reflectividad del infrarrojo medio ( $1, 6 \mu\text{m}$ ).

$\rho_{swir2,1}$  reflectividad del infrarrojo medio ( $2, 1 \mu\text{m}$ ).

$\tau_4(\theta)$  transmisividad atmosférica en el canal 4 del AVHRR i ángulo  $\theta$ .

$\tau_5(\theta)$  transmisividad atmosférica en el canal 5 del AVHRR i ángulo  $\theta$ .

$\tau_i(\theta)$  transmisividad de la atmósfera en el ángulo  $\theta$  en la banda  $i$ .

$\langle d\epsilon_i \rangle$  es una estimación del término de cavidad promedio de la superficie considerada.

$\langle \rho_{ei} \rangle$  reflectividad en la parte baja de la atmósfera del entorno en el que se encuentra la superficie observada para el canal  $i$  de un sensor.



# Capítulo 1

## Introducción

**RESUMEN:** En este capítulo se discute la necesidad de conocer, de forma exacta, la emisividad del suelo en el infrarrojo térmico, por su implicación en la correcta determinación de la temperatura de la superficie terrestre. Esto permite contextualizar la Tesis respecto a los trabajos previos del Grupo. A continuación, se define el marco de trabajo en el que se desarrolla el estudio, justificando su necesidad y definiendo su alcance. Para ello, se presenta la limitación que supone no considerar el efecto de la atmósfera en el dominio óptico, y las repercusiones que puede tener la atmósfera en la determinación de la emisividad de la superficie terrestre. Para finalizar, se definen el objetivo y la metodología del trabajo, y se describe la estructura de la presente Memoria.

### 1.1. Interés de la medida de la emisividad de la superficie

La temperatura de la superficie de la Tierra es una magnitud física clave para muchos procesos biofísicos como los intercambios entre la atmósfera y la superficie, la circulación de los geofluidos, los fenómenos de evapotranspiración, etc. (Wan y Snyder, 1999; Running et al., 1994; Artigao, 2001; Sánchez, 2008).

La obtención de la temperatura implica diversos aspectos como la presencia de la atmósfera y las propiedades emisivas de la superficie observada. Estos dos fenómenos se encuentran acoplados, por lo que su resolución es vital para la medida precisa de la temperatura (Li et al., 2013).

Con los sensores de teledetección se obtienen imágenes que presentan una serie de alteraciones radiométricas y geométricas relacionadas, principalmente, con las propiedades emisivas de la superficie, los efectos de la atmósfera

y el calibrado del sensor (Melià, 1991).

Cada región espectral se ve afectada de manera diferente debido a sus características, por lo que el estudio de las alteraciones en la radiometría debe realizarse individualmente para cada una de ellas.

En el espectro terrestre, los sensores de teledetección miden la radiancia térmica emitida por el sistema superficie-atmósfera. En el caso ideal, sin atmósfera, la superficie emite energía debido a su temperatura tal y como describe la Ley de Planck para un cuerpo negro o emisor perfecto.

Puesto que la mayoría de la superficie terrestre dista del comportamiento de emisor perfecto, su emisión energética es inferior a la del correspondiente cuerpo negro a idéntica temperatura. Esta característica radiativa de las superficies reales se conoce como emisividad y, por tanto, su conocimiento es inexcusable para obtener medidas precisas de temperatura.

En el caso real, la radiación infrarroja, en su tránsito por la atmósfera hacia el sensor, se ve afectada por la absorción por parte de los componentes atmosféricos y por la emisión de radiación propia que modifica la señal original. Puesto que la emisión atmosférica es también hacia el suelo, y al no ser este un emisor perfecto, refleja hacia el sensor parte de la radiación recibida desde la atmósfera. En general, la reflexión atmosférica no compensa el efecto de la emisividad, del mismo modo que la emisión atmosférica no compensa la absorción.

Esto ya fue analizado por Coll (1994), que describió con detalle las dependencias y acoplamientos entre emisividad, atmósfera y temperatura. En particular, Coll (1994) detalla la ecuación monocanal de corrección como la expresión 1.1:

$$B_i(T_i) = [\epsilon_i(\theta)B_i(T) + R_i^{ref}]\tau_i(\theta) + B_i(T_{ai}^\uparrow)[1 - \tau_i(\theta)] \quad (1.1)$$

donde:

$B_i(T_i)$  es la radiancia medida por el sensor en la banda espectral  $i$ , y  $T_i$  es la temperatura radiativa en dicha banda,

$\epsilon_i(\theta)$  es la emisividad de la superficie en el ángulo  $\theta$ ,

$B_i(T)$  es la radiancia de cuerpo negro correspondiente a la temperatura real  $T$  de la superficie,

$R_i^{ref}$  es la reflexión de la irradiancia atmosférica descendente,

$\tau_i(\theta)$  es la transmisividad de la atmósfera en el ángulo  $\theta$ , y

$B_i(T_{ai}^\uparrow)$  es la radiancia ascendente emitida por la atmósfera, siendo  $T_{ai}$  una temperatura atmosférica efectiva.

De igual manera, Coll (1994) describe un modelo operativo de ecuación *split-window*, para los canales 4 y 5 del sensor AVHRR, como la expresión 1.2:

$$T = T_4 + A(T_4 - T_5) + \Delta + B(\epsilon) \quad (1.2)$$

donde:

$T$  es la temperatura termodinámica de la superficie observada,

$T_4$  es la temperatura radiativa en el canal 4, y

$T_5$  es la temperatura radiativa en el canal 5.

En la ecuación 1.2,  $A$  y  $\Delta$  representan el efecto atmosférico, mientras que  $B(\epsilon)$  es el efecto de la emisividad en el método de *split-window*. Estos tres términos se definen como:

$$A = \frac{1 - \tau_4(\theta)}{\tau_4(\theta) - \tau_5(\theta)} \quad (1.3)$$

$$\Delta = -[1 - \tau_5(\theta)]A\delta T_a^\uparrow \quad (1.4)$$

$$B(\epsilon) = \frac{1 - \epsilon_4(\theta)}{\epsilon_4(\theta)}b_4 + A\tau_5(\theta)\left[\frac{1 - \epsilon_4(\theta)}{\epsilon_4(\theta)}b_4 - \frac{1 - \epsilon_5(\theta)}{\epsilon_5(\theta)}b_5\right] \quad (1.5)$$

donde:

$\tau_4(\theta)$  es la transmisividad atmosférica en el canal 4 para el ángulo de observación  $\theta$ ,

$\tau_5(\theta)$  es la transmisividad atmosférica en el canal 5 para el ángulo de observación  $\theta$ ,

$\delta T_a^\uparrow$  es la variación de temperatura radiativa de la atmósfera,

$\epsilon_4(\theta)$  es la emisividad en el canal 4 para el ángulo de observación  $\theta$ , y

$\epsilon_5(\theta)$  es la emisividad en el canal 5 para el ángulo de observación  $\theta$ .

Analizando la ecuación 1.1 y la ecuación 1.2, puede observarse que tanto temperatura y emisividad, como emisividad y atmósfera se encuentran fuertemente acopladas. En particular, se deduce que la determinación de la temperatura termodinámica de la superficie pasa necesariamente por la medida o la estimación adecuada de su emisividad.

Una constante en los trabajos de nuestro grupo de investigación, el *Grup de Teledetecció Tèrmica* (GTT), es la búsqueda de métodos para la medida de la temperatura con el menor error posible. En esta línea, el grupo tiene

trabajos publicados con relación a la corrección atmosférica y de emisividad, elementos fundamentales para la determinación de la temperatura con un error moderado (Caselles y Sobrino, 1989; Valor y Caselles, 1996; Rubio et al., 1997; Coll y Caselles, 1997; Coll et al., 2003, 2006, 2007, 2012).

Así, para lograr una medida precisa de la temperatura, es necesario corregir el efecto combinado de la emisividad y la atmósfera, que se estima aproximadamente en  $\pm 1$  K para un 2% de error en la determinación de la emisividad (Coll et al., 1992).

## 1.2. La atmósfera en el dominio óptico

En el espectro solar, los sensores de teledetección pasiva miden la radiancia reflejada por el sistema superficie-atmósfera cuando este es iluminado por el Sol. En el caso ideal, sin atmósfera, toda la radiancia medida por el sensor es útil y proporcional a las propiedades reflectivas de la superficie. Sobre este modelo elemental, la radiancia medida por el sensor permite calcular la reflectividad aparente o reflectividad en la parte alta de la atmósfera.

Pero en el caso real, la radiancia medida por el sensor tiene dos orígenes: la superficie terrestre y la atmósfera. La fracción que proviene de la atmósfera no contiene información alguna sobre la superficie terrestre. El resto de la radiancia medida es proporcional a la reflectividad corregida o reflectividad en la parte baja de la atmósfera, pero se encuentra atenuada por fenómenos atmosféricos como la absorción y la dispersión (Lenoble, 1993).

Los gases de la atmósfera absorben la radiación solar mediante cambios de su estado energético. Puesto que este tipo de transición ocurre a valores de energía discretos, los coeficientes de absorción varían muy rápidamente con la longitud de onda, presentando una estructura muy compleja.

Por otro lado, la dispersión es un fenómeno de redirección del camino de propagación de la radiación electromagnética, causado por la interacción de la radiación con los gases y aerosoles de la atmósfera. Su comportamiento es dependiente de la geometría de propagación de la radiación en la atmósfera y, a su vez, presenta una dependenciapectral proporcional a  $\lambda^{-4}$  para la dispersión Rayleigh o molecular, y proporcional a  $\lambda^{-1}$  para la dispersión de Mie o dispersión por partículas (Iqbal, 1983). Por tanto, la dispersión será menos intensa cuanto mayor sea la longitud de onda.

Los fenómenos atmosféricos aquí descritos pueden alterar de manera sustancial la señal medida por los sensores de espectro óptico. Los procedimientos para obtener una reflectividad corregida de efectos atmosféricos que se encuentran en la bibliografía son muy diversos, tanto por la complejidad de los fenómenos atmosféricos implicados, como por lo poco operativo del trabajo de campo síncrono a la adquisición de las imágenes desde el sensor. Para sensores multiespectrales, algunos autores como Song et al. (2001) consideran los efectos atmosféricos despreciables para determinadas aplicaciones

como la clasificación. En el otro extremo, en Bolle y Langer (1991) se realizan medidas de los parámetros atmosféricos en la zona y hora de estudio, para ser introducidos en un modelo de transferencia radiativa. Entre ambos planteamientos hay también propuestas intermedias, como el uso de un método de normalización atmosférica (Caselles y López-García, 1989; Holben, 1986), el uso de valores estándares para los parámetros atmosféricos (Pons y Sole-Sugranyes, 1994), la determinación del espesor óptico de aerosoles con la aproximación DDV (*Dark Dense Vegetation*) de Liang et al. (1997) o con el método RC (Reducción del Contraste) de Tanré et al. (1988), etc. En el caso de sensores hiperespectrales también es posible deducir los parámetros atmosféricos necesarios a partir de las propias imágenes, como propone Guanter (2007).

### 1.3. Determinación precisa de la emisividad

La obtención de la emisividad de la superficie mediante teledetección térmica pasiva cuenta con el inconveniente de que no es posible calcular simultáneamente temperatura y emisividad, puesto que el número de incógnitas es siempre superior al número de medidas (Becker, 1980). Además, la absorción y emisión térmica de la atmósfera, así como la reflexión de esta en la superficie complican el problema. (Coll, 1994).

Para salir al paso de estos inconvenientes al estimar la emisividad, con medidas térmicas y desde la parte alta de la atmósfera, hay básicamente tres grandes aproximaciones (Li et al., 2013):

- Métodos semi-empíricos: obtienen la emisividad a partir de relaciones semiempíricas. Se distingue entre los basados en clasificación o CBEM (Classification-Based Emissivity Method) (Snyder et al., 1998; Sun y Pinker, 2003; Peres y DaCamara, 2005) y los basados en el índice de vegetación o NBEM (NDVI-Based Emissivity Method) (van de Griend y Owe, 1993; Valor y Caselles, 1996; Sobrino y Raissouni, 2000).
- Métodos multicanal TES (Temperature Emissivity Separation): obtienen la emisividad con la radiancia medida y algunas restricciones o hipótesis. Los métodos que usan las características del espectro son: GBE (Grey Body Emissivity) (Barducci y Pippi, 1996), TTM (Two Temperature Method) (Watson, 1992), ISSTES (Iterative Spectrally Smooth Temperature Emissivity Separation) (Borel, 1997) y EBM (Emissivity Bounds Method) (Jaggi et al., 1992). También puede usarse un canal como referencia, como en el RCM (Reference Channel Method) (Kahle et al., 1980), o un píxel como en el NEM (Normalization Emissivity Method) (Gillespie, 1985) y ANEM (Adjusted Normalized Emissivity Method) (Coll et al., 2003). Los métodos TES (Gillespie et al., 1998) y

TISI (Temperature-Independent Spectral Indices) (Becker y Li, 1990) completan este grupo.

- Métodos físicos: obtienen la emisividad con la radiancia medida y algunas restricciones o hipótesis físicas. Los métodos de este grupo más destacados son: TISI-físico (Becker y Li, 1990; Li y Becker, 1993; Li et al., 2000), método operacional noche/día (Wan y Li, 1997) y TSRM (Two-Step Physical Retrieval Method) (Ma et al., 2000, 2002; Li et al., 2007).

El MCV (método de la cobertura vegetal) de Valor y Caselles (1996), uno de los métodos NBEM de la clasificación anterior, se caracteriza por su sencillez matemática y por no presentar errores sistemáticos. Está basado en el modelo teórico de Caselles y Sobrino (1989) y en la idea sugerida por van de Griend y Owe (1993) de relacionar la emisividad en el infrarrojo térmico con el *NDVI* (Índice de Vegetación Normalizado por Diferencia) descrito por Rouse et al. (1974). El método de la cobertura vegetal es muy operativo y preciso para la medida de la emisividad desde satélite.

Sin embargo, la proporción de vegetación que contiene un píxel se obtiene a partir del *NDVI*, cuya determinación se basa en reflectividades del espectro solar. Estas medidas de reflectividad también están afectadas por la atmósfera, por lo que es de esperar que la determinación del porcentaje de vegetación y, por consiguiente, de la emisividad, esté afectada en cierta medida por la interacción de la atmósfera con la radiación solar (Martinez et al., 2008).

#### 1.4. Objetivo y metodología de trabajo

Este trabajo de Tesis Doctoral sigue la línea de investigación principal del GTT, que es el desarrollo y la mejora de metodologías para obtener información de temperatura de la superficie terrestre a partir de datos radiométricos en el infrarrojo térmico. Para lograr una medida precisa de la temperatura, es necesario corregir el efecto combinado de la emisividad y la atmósfera. El MCV es un método preciso y operativo para la determinación de la emisividad, pero depende de información del espectro solar para su funcionamiento. Esta información es la cobertura vegetal o proporción de vegetación de cada píxel. Su determinación se basa en el *NDVI* que emplea reflectividades del espectro solar y por tanto, afectadas por la interacción con la atmósfera. El objetivo de esta Tesis es analizar cómo la corrección atmosférica en el dominio óptico puede ayudar en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico con el MCV y, consecuentemente, en la determinación de la temperatura, como ya señalaron Valor y Caselles (1996).

La metodología seguida para conseguir el objetivo de esta Tesis Doctoral incluye la revisión de las hipótesis del MCV, en particular de las relacionadas

con el uso de información del espectro óptico. El análisis y la validación de estas hipótesis se realizarán mediante simulaciones, de las que se derivará el límite de validez de las hipótesis del MCV, y se propondrán alternativas. Así mismo, las alternativas propuestas se estudiarán con detalle para determinar su límite de validez, la mejora que puedan suponer, y su operatividad.

## 1.5. Estructura de la memoria

Esta memoria se ha estructurado en cinco capítulos. En el presente **Capítulo 1** se contextualizó y justificó el interés del estudio, aportando sus antecedentes. Por último, se definió el objetivo y metodología del trabajo. A continuación, en los capítulos 2 y 3 se presentan la metodología y los datos empleados. El **Capítulo 2** revisa el método MCV y plantea alternativas al índice *NDVI*, y también describe la transferencia radiativa en el espectro solar, y cómo aplicarla para la corrección atmosférica sobre combinaciones de espectros. Todo esto se particulariza en el **Capítulo 3**, donde se presentan los espectros seleccionados, las simulaciones de transferencia radiativa realizadas y la sensibilidad espectral de los canales de los sensores seleccionados para el estudio. En los capítulos 4 y 5 se exponen detalladamente los resultados de los análisis propuestos sobre los datos. En el **Capítulo 4** se discutirán las aproximaciones del MCV con relación al uso del *NDVI*, tanto por la influencia de la atmósfera como por la sensibilidad del índice de vegetación con la radiometría del suelo. Por su parte, el **Capítulo 5** contiene una propuesta alternativa al *NDVI*, cuyas ventajas y limitaciones también se discuten. Para finalizar, el **Capítulo 6** resume en forma de conclusiones los resultados más importantes de la Tesis. Adicionalmente, se incluye como **apéndice** una copia del trabajo publicado que ha contribuido a generar esta Tesis Doctoral, el cual se cita a lo largo de esta Memoria.



# Capítulo 2

## Metodología

**RESUMEN:** El objetivo de este capítulo es presentar al lector el MCV en detalle, así como discutir su dependencia respecto a la atmósfera en el dominio óptico y la línea de suelo. A continuación, se plantea y discute una metodología alternativa para el MCV con el uso de cualquier índice de vegetación y una resolución numérica. A tal efecto, se sugieren 20 índices de vegetación multiespectrales como alternativa al *NDVI* en la metodología alternativa para el MCV. Posteriormente, se describe el procedimiento para generar píxeles mixtos que analizar partiendo de muestras espectrales de librería. Seguidamente, se introduce la metodología empleada para describir la transferencia radiativa en el dominio óptico y su aplicación operativa con modelos de transferencia radiativa, como el *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S), así como la obtención de valores de canal a partir de los cálculos atmosféricos con 6S y la ecuación de transferencia radiativa en el dominio óptico. Para finalizar, se plantean dos escenarios para analizar los resultados, derivados del planteamiento del MCV de la vegetación pura y el suelo desprovisto de vegetación: un suelo radiométricamente homogéneo y un suelo radiométricamente heterogéneo. Para ambos, se analiza el alcance y representatividad. Por último, se describen las magnitudes cuyos valores, alterados por el efecto de la atmósfera en el dominio óptico o por el índice de vegetación empleado en el MCV, son objeto de análisis en posteriores capítulos con los estadísticos descritos en este capítulo.

### 2.1. Emisividad térmica y método MCV

El MCV es un modelo geométrico para el cálculo de la emisividad térmica que recurre a medidas realizadas dentro del espectro solar para salvar el

problema del acoplamiento de emisividad y temperatura que surge al hacer uso únicamente de medidas térmicas pasivas (Valor y Caselles, 1996). En su versión operativa para uso desde satélite, para una banda  $i$ , tiene la forma de la ecuación 2.1:

$$\epsilon_i = \epsilon_{iv}P_v + \epsilon_{ig}(1 - P_v) + 4\langle d\epsilon_i \rangle P_v(1 - P_v) \quad (2.1)$$

donde:

$\epsilon_{iv}$  es la emisividad de la vegetación,

$P_v$  es la cobertura vegetal,

$\epsilon_{ig}$  es la emisividad de un suelo desprovisto de vegetación, y

$\langle d\epsilon_i \rangle$  es una estimación del término de cavidad promedio de la superficie considerada.

El primer término de la ecuación 2.1 da cuenta de la emisividad de la superficie totalmente cubierta de vegetación en el píxel, mientras que el segundo representa la emisividad de la parte totalmente descubierta. El tercer término de la ecuación representa el efecto de las reflexiones internas entre vegetación y suelo, conocido como efecto de cavidad (Valor y Caselles, 1996).

Tanto la emisividad de la vegetación como la emisividad del suelo desprovisto de vegetación se suponen conocidas en el MCV, para lo que se precisarán bien medidas de campo (Rubio et al., 1997, 2003) o bien valores obtenidos de la bibliografía (Salisbury y D'Aria, 1992; Baldridge et al., 2009). Para el intervalo espectral  $8 - 13 \mu\text{m}$ , donde suelen realizarse las medidas térmicas, tenemos los valores de emisividad y término de cavidad siguientes:  $\epsilon_{iv} = 0,985 \pm 0,005$ ,  $\epsilon_{ig} = 0,93 \pm 0,03$  y  $\langle \epsilon_i \rangle = 0,03 \pm 0,02$ .

La figura 2.1 muestra la representación gráfica de la ecuación 2.1 con los valores indicados previamente para  $\epsilon_{iv}$ ,  $\epsilon_{ig}$  y  $\langle \epsilon_i \rangle$ . Como puede apreciarse, bajo estas condiciones, la ecuación presenta un máximo para valores próximos al 70 % de cobertura vegetal. Esta dependencia no lineal de la emisividad con la cobertura vegetal condicionará la desviación en el cálculo de la emisividad cuando la determinación de la cobertura vegetal no sea exacta.

Para la estimación del porcentaje de cobertura vegetal, Valor y Caselles (1996) propusieron, como aproximación inicial, el uso del índice *NDVI* atribuido a Rouse et al. (1974), aunque sugerían como posible mejora del método el uso de otros índices más precisos. El *NDVI* es un índice de vegetación de cociente. Se trata del más popular de los índices de vegetación, ya que todos los satélites multiespectrales cuentan con bandas adecuadas para su cálculo que, por otro lado, es sencillo, como puede observarse en la ecuación 2.2:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (2.2)$$

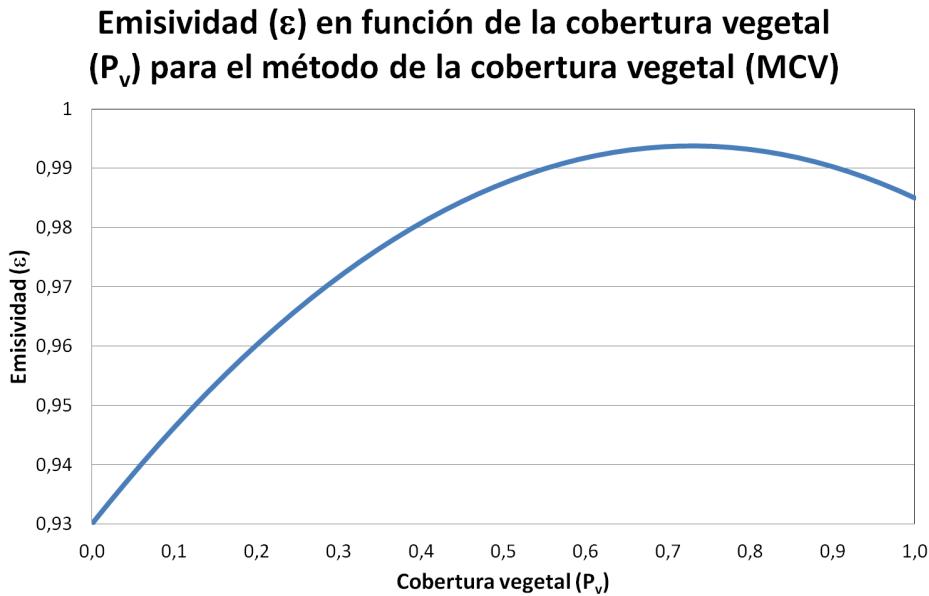


Figura 2.1: Emisividad en función de la cobertura vegetal para el método de la cobertura vegetal con los valores  $\epsilon_{iv} = 0,985 \pm 0,005$ ,  $\epsilon_{ig} = 0,93 \pm 0,03$  y  $\langle \epsilon_i \rangle = 0,03 \pm 0,02$ .

donde:

$\rho_{nir}$  es la reflectividad del infrarrojo próximo, y

$\rho_{red}$  es la reflectividad del rojo.

Con estas aproximaciones, y utilizando un modelo lineal de reflectividad de dos componentes (suelo y vegetación) para las bandas rojo e infrarrojo próximo, se obtiene la  $P_v$  mediante la ecuación 2.3:

$$P_v = \frac{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_g}\right)}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_g}\right) - K \left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_v}\right)} \quad (2.3)$$

donde  $K$  viene dado por la ecuación 2.4:

$$K = \frac{\rho_{2v} - \rho_{1v}}{\rho_{2s} - \rho_{1g}} \quad (2.4)$$

siendo:

$NDVI_g$  el valor del  $NDVI$  para el suelo desprovisto de vegetación,

$NDVI_v$  el valor del  $NDVI$  para la vegetación pura,

$\rho_{2v}$  la reflectividad en infrarrojo próximo de la vegetación pura,  
 $\rho_{1v}$  la reflectividad en rojo de la vegetación pura,  
 $\rho_{2g}$  la reflectividad en infrarrojo próximo del suelo desprovisto de vegetación, y  
 $\rho_{1g}$  la reflectividad en rojo del suelo desprovisto de vegetación.

El error estimado para el MCV en la determinación de la emisividad oscila desde un 0,5 %, debido a las limitaciones experimentales de la medida de la emisividad, hasta un 2 % en el caso de que no se disponga de información de campo sobre el área de aplicación (Valor y Caselles, 1996).

En esta Tesis, se analiza la idoneidad de la aproximación de Valor y Caselles (1996) de utilizar el *NDVI* para determinar la cobertura vegetal,  $P_v$ , tanto debido al efecto de la atmósfera, como por la sensibilidad del índice de vegetación a la reflectividad del suelo sobre el que se asienta la vegetación.

## 2.2. Determinación alternativa de la $P_v$

En la sección 2.1, para la deducción de la ecuación 2.3 de Valor y Caselles (1996), se asume un modelo de reflectividad para píxeles mixtos en el dominio óptico. Este modelo desprecia las reflexiones internas debidas a la rugosidad y el efecto de las sombras. Su expresión analítica para la banda  $i$  es la ecuación 2.5:

$$\rho_i = P_v \rho_{iv} + (1 - P_v) \rho_{is} \quad (2.5)$$

donde:

$\rho_i$  es la reflectividad en la banda  $i$ ,

$P_v$  es la cobertura vegetal,

$\rho_{iv}$  es la reflectividad de la vegetación pura en la banda  $i$ , y

$\rho_{ig}$  es la reflectividad del suelo desprovisto de vegetación en la banda  $i$ .

Teniendo en cuenta el modelo de la ecuación 2.5 y la definición del índice *NDVI* de Rouse et al. (1974) se obtiene la ecuación 2.3, de la sección 2.1, despejando la  $P_v$  de la misma. Pero si se desea emplear un índice alternativo al *NDVI*, la estrategia de Valor y Caselles (1996) aquí descrita para obtener la  $P_v$  no siempre es factible.

La alternativa propuesta en esta Tesis para la obtención de la  $P_v$  consiste en los siguientes pasos:

1. Calcular el índice de vegetación para el píxel a analizar utilizando los valores de reflectividad del dominio óptico del mismo ( $IV$ ).
2. Calcular una reflectividad para el píxel como combinación de la reflectividad de las muestras puras de suelo y vegetación, con la ecuación 2.5, y como función de la  $P_v$ . Con estas reflectividades, calcular el índice de vegetación para el píxel como función de la  $P_v(IV(P_v))$ .
3. Determinar numéricamente el valor de la  $P_v$  como aquel que verifica que los dos índices obtenidos son iguales ( $IV = IV(P_v)$ ).

El procedimiento propuesto en esta Tesis difiere del de Valor y Caselles (1996) en que es general e independiente del índice de vegetación concreto que se emplee, y también en que no es un procedimiento analítico. Lo primero es una ventaja, puesto que permite adaptar el MCV a cualquier índice de vegetación, pero lo segundo es una desventaja. Los procedimientos numéricos son más lentos de computar que los analíticos, aunque en la actualidad la potencia y velocidad de los equipos informáticos dejan esta objeción en un orden inferior. Por otro lado, los métodos numéricos también son susceptibles de problemas de convergencia derivados de las limitaciones de los algoritmos empleados para su resolución, lo que podría llegar a ser una limitación para el uso operativo de la metodología propuesta en este trabajo.

Como se ha comentado previamente, el índice de vegetación *NDVI* de Rouse et al. (1974) es uno de los más empleados, tanto por sus buenos resultados como por la facilidad de su cálculo con canales presentes en prácticamente la totalidad de sensores de teledetección óptica. Sin embargo, este índice presenta dos problemas: la dependencia de las muestras de suelo y el efecto de la atmósfera. Para salir al paso de una o ambas dificultades, se han publicado infinidad de índices de vegetación multiespectrales. Como señalaban Valor y Caselles (1996), el MCV puede aplicarse con cualquiera de ellos, siendo la única dificultad la obtención de la  $P_v$  que en esta Tesis se propone realizar, según se ha descrito en esta misma sección. Para analizar esta posibilidad, se propone el uso de diversos índices multiespectrales, para determinar si alguno de ellos resuelve las carencias del *NDVI* con el MCV en términos de exactitud de la emisividad térmica apuntadas por Valor y Caselles (1996).

Las subsecciones siguientes describen los índices de vegetación propuestos en esta Tesis como alternativa al *NDVI* para la determinación de la emisividad con el MCV.

### 2.2.1. *RVI*

El *RVI* (*Ratio Vegetation Index*), atribuido a Jordan (1969), es un índice de vegetación muy sencillo, que se calcula como el cociente de las regiones del rojo e infrarrojo próximo, como se expresa en la ecuación 2.6:

$$RVI = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}} \quad (2.6)$$

### 2.2.2. PVI

El *PVI* (*Perpendicular Vegetation Index*) de Richardson y Wiegand (1977) es un índice ortogonal que se calcula a partir de las regiones del rojo, infrarrojo próximo y la línea de suelo. La ecuación 2.7 muestra cómo se obtiene:

$$PVI = \sin(a)\rho_{nir} - \cos(a)\rho_{red} \quad (2.7)$$

donde:

$a$  es el ángulo entre la línea de suelo y el eje NIR.

La línea de suelo es un gráfico biespectral (el eje  $X$  es el infrarrojo próximo y el  $Y$  es el rojo) de la posición de los píxeles de suelo desprovisto de vegetación de diversos tipos, que tienden a distribuirse sobre una línea. Las primeras referencias a la misma se encuentran en Kauth y Thomas (1976). En la medida en que la cobertura de vegetación se incrementa, este suelo de fondo llegará a ser enmascarado con los píxeles de vegetación, que mostrarán una tendencia al incremento de la distancia perpendicular desde la línea de suelo. Por tanto, los píxeles que caen cerca de la línea de suelo o en ella son de suelo, mientras que los que caen lejos de esta, se asumen como vegetación.

### 2.2.3. NDII

El *NDII* (*Normalized Difference Infrared Index*) de Hardisky et al. (1983), es un índice de vegetación de cociente, que se calcula a partir de las regiones del infrarrojo próximo e infrarrojo medio ( $1,6 \mu\text{m}$ ), como indica la ecuación 2.8:

$$NDII = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir1,6}}{\rho_{nir} + \rho_{swir1,6}} \quad (2.8)$$

donde:

$\rho_{swir1,6}$  es la reflectividad del infrarrojo medio ( $1,6 \mu\text{m}$ ).

### 2.2.4. WDVI

El *WDVI* (*Weighted Difference Infrared Index*) de Clevers (1988) es un índice ortogonal que se calcula con las regiones del rojo, infrarrojo próximo y la línea de suelo. La ecuación 2.9 muestra cómo se define:

$$WDVI = \rho_{nir} - m \cdot \rho_{red} \quad (2.9)$$

donde:

$m$  es la pendiente de la línea de suelo.

### 2.2.5. SAVI

El *SAVI* (*Soil Adjusted Vegetation Index*) de Huete (1988) es un índice de vegetación híbrido con las regiones del rojo e infrarrojo próximo, según la ecuación 2.10:

$$SAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L} (1 + L) \quad (2.10)$$

donde:

$L$  es un parámetro que Huete (1988) introduce para compensar el efecto del suelo. Huete (1988) encontró que un valor constante de  $L = 0,5$  ya reduce el efecto del suelo para una gran variedad de coberturas vegetales, sin necesidad de un conocimiento previo o procesos iterativos.

### 2.2.6. IPVI

El *IPVI* (*Infrared Percentage Vegetation Index*) de Crippen (1990) es un índice de vegetación de cociente sencillo, que se calcula con las regiones del rojo e infrarrojo próximo, como indica la ecuación 2.11:

$$IPVI = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red} + \rho_{nir}} \quad (2.11)$$

### 2.2.7. TSAVI

El *TSAVI* (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) descrito en Baret et al. (1989) es un índice de vegetación híbrido que se calcula con las regiones del rojo e infrarrojo próximo, así como con la línea de suelo. La ecuación 2.12 muestra su definición:

$$TSAVI = \frac{m \cdot (\rho_{nir} - m \cdot \rho_{red} - n)}{n \cdot \rho_{nir} + \rho_{red} - n \cdot m + X(1 + m^2)} \quad (2.12)$$

donde:

$n$  es la ordenada de la línea de suelo, y

$X$  es un parámetro que Baret et al. (1989) cuantifican en  $X = 0,08$ .

### 2.2.8. *GEMI*

El *GEMI* (*Global Environmental Monitoring Index*) de Pinty y Verstraete (1991) es un índice de vegetación híbrido que se calcula con las regiones del rojo e infrarrojo próximo, como puede verse en la ecuación 2.13:

$$GEMI = eta \cdot (1 - 0,25 \cdot eta) - \frac{\rho_{red} - 0,125}{1 - \rho_{red}} \quad (2.13)$$

donde:

$$eta = \frac{2(\rho_{nir}^2 - \rho_{red}^2) + 1,5 \cdot \rho_{nir} + 0,5 \cdot \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + 0,5}$$

### 2.2.9. *ARVI*

El *ARVI* (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) de Kaufman y Tanré (1992) es un índice de vegetación híbrido que se calcula con las regiones del azul, roja e infrarrojo próximo. La ecuación 2.14 muestra su expresión:

$$ARVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{rb}}{\rho_{nir} + \rho_{rb}} \quad (2.14)$$

donde:

$\rho_{rb} = \rho_{red} - \gamma(\rho_{blue} - \rho_{red})$  es una combinación de las reflectividades en la región roja y azul,

donde:

$\rho_{blue}$  es la reflectividad en la región azul, y

$\gamma$  es un parámetro relacionado con el tipo de aerosoles presentes. Según (Kaufman y Tanré, 1992) fijar  $\gamma = 1$  evita depender de conocimiento previo sobre los aerosoles o de procesos iterativos.

### 2.2.10. *MSAVI*

El *MSAVI* (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) de Qi et al. (1994) es un índice de vegetación híbrido que se puede definir a partir de la región del rojo e infrarrojo próximo, así como de otros índices, como muestra la ecuación 2.15:

$$MSAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L'}(1 + L') \quad (2.15)$$

donde:

$$L' = 1 - 2 \cdot m \cdot (NDVI \cdot WDVNI).$$

### 2.2.11. MSAVI2

El *MSAVI2* (*Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index*), también de Qi et al. (1994), es una variación del *MSAVI* que se define a partir de las regiones del rojo y del infrarrojo próximo, como indica la expresión 2.16:

$$MSAVI2 = \frac{1}{2} \left( 2 \cdot \rho_{nir} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{nir} + 1)^2 - 8(\rho_{nir} - \rho_{red})} \right) \quad (2.16)$$

### 2.2.12. EVI

El *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*) de Liu y Huete (1995) es un índice híbrido calculado con las regiones azul, roja e infrarroja, como indica la ecuación 2.17:

$$EVI = G \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue} + L''} \quad (2.17)$$

donde según Liu y Huete (1995):

$G$  es un parámetro que vale  $G = 2,5$ ,

$C_1$  es un parámetro que vale  $C_1 = 6,0$ ,

$C_2$  es un parámetro que vale  $C_2 = 7,5$ , y

$L''$  es un parámetro que vale  $L'' = 1$ .

### 2.2.13. NDWI

El *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*) de Gao (1996) es un índice de vegetación de cociente, que se calcula a partir de las regiones del infrarrojo próximo e infrarrojo medio ( $1,2 \mu\text{m}$ ), como indica la ecuación 2.18:

$$NDWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir1,2}}{\rho_{nir} + \rho_{swir1,2}} \quad (2.18)$$

donde:

$\rho_{swir1,2}$  es la reflectividad del infrarrojo medio ( $1,2 \mu\text{m}$ ).

### 2.2.14. OSAVI

El *OSAVI* (*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*) de Rondeaux et al. (1996) es un índice híbrido calculado con las regiones azul, roja e infrarroja, como indica la ecuación 2.19:

$$OSAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + Y} \quad (2.19)$$

donde:

$Y$  es un parámetro que vale  $Y = 0,16$  según Rondeaux et al. (1996).

### 2.2.15. *AFRI1,6*

El  $AFRI_{1,6}$  (*Aerosol Free Vegetation Index 1,6*) de Karnieli et al. (2001) es un índice de vegetación híbrido que se define a partir de la región del infrarrojo próximo y del infrarrojo medio ( $1,6 \mu\text{m}$ ), tal y como indica la ecuación 2.20:

$$AFRI_{1,6} = \frac{\rho_{nir} - 0,66 \cdot \rho_{swir1,6}}{\rho_{nir} + 0,66 \cdot \rho_{swir1,6}} \quad (2.20)$$

### 2.2.16. *AFRI2,1*

El  $AFRI_{2,1}$  (*Aerosol Free Vegetation Index 2,1*), también de Karnieli et al. (2001) es otra forma del *NDII* que se define con las del infrarrojo próximo y el infrarrojo medio ( $2,1 \mu\text{m}$ ), como señala la ecuación 2.21:

$$AFRI_{2,1} = \frac{\rho_{nir} - 0,5 \cdot \rho_{swir2,1}}{\rho_{nir} + 0,5 \cdot \rho_{swir2,1}} \quad (2.21)$$

donde:

$\rho_{swir2,1}$  es la reflectividad del infrarrojo medio ( $2,1 \mu\text{m}$ ).

### 2.2.17. *TDVI*

El *TDVI* (*Transformed Difference Vegetation Index*), descrito por Banari et al. (2002), es un índice de vegetación no lineal construido a partir del *NDVI*, que se define como la ecuación 2.22:

$$TDVI = \sqrt{NDVI} \quad (2.22)$$

### 2.2.18. *VARI*

El *VARI* (*Visible Atmospheric Resistant Index*), descrito en Gitelson et al. (2002), es un índice de vegetación híbrido calculado a partir de las regiones azul, verde y roja, que se define como la ecuación 2.23:

$$VARI = \frac{\rho_{green} - \rho_{red}}{\rho_{green} + \rho_{red} - \rho_{blue}} \quad (2.23)$$

donde:

$\rho_{green}$  es la reflectividad del verde.

### 2.2.19. *WDRVI*

El *WDRVI* (*Wide Dynamic Range Vegetation Index*) de Gitelson (2004) es un índice de vegetación híbrido que emplea las regiones roja e infrarroja, que se define como la ecuación 2.24:

$$WDRVI = \frac{a' \cdot \rho_{nir} - \rho_{red}}{a' \cdot \rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (2.24)$$

donde:

$$a' = 2 \frac{\bar{\rho}_{red}}{\max(\rho_{nir})},$$

donde:

$\bar{\rho}_{red}$  es el valor promedio en la escena de la reflectividad del rojo, y

$\max(\rho_{nir})$  es el valor máximo en la escena de la reflectividad del infrarrojo próximo.

### 2.2.20. *NMDI*

El *NMDI* (*Normalized Multiband Drought Index*) descrito por Wang y Qu (2007) es un índice de vegetación de cociente que emplea las regiones del infrarrojo próximo e infrarrojo medio ( $1,6$  y  $2,1\text{ }\mu\text{m}$ ) y se define como la ecuación 2.25:

$$NMDI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir1,6} + \rho_{swir2,1}}{\rho_{nir} + \rho_{swir1,6} - \rho_{swir2,1}} \quad (2.25)$$

## 2.3. Generación de muestras a analizar

En la sección 2.2, se describe la determinación de la  $P_v$  para píxeles mixtos. En dicha sección, se indica que la reflectividad de todo píxel mixto se asume como una combinación lineal, tal como describe la ecuación 2.5, de las reflectividades de píxeles puros de suelo y vegetación. Esta Tesis se plantea en términos globales y, por tanto, precisa de un conjunto amplio de muestras de píxeles puros y mixtos sobre los que analizar la precisión en la determinación de la  $P_v$ , por los mencionados efectos de la atmósfera y de la sensibilidad al suelo del índice de vegetación empleado.

La biblioteca de espectros ASTER, descrita en Baldridge et al. (2009), es una colección de espectros puros especialmente adecuado para los objetivos de este trabajo. La biblioteca incluye pocas muestras de vegetación pura, así como una gran cantidad de espectros de suelo, desde los más oscuros hasta los más brillantes. El uso de toda esta variedad de muestras puras de suelo y vegetación contribuye a que los resultados de la Tesis sean generales.

Para que los resultados del trabajo sean también representativos de todas las superficies naturales, se analizan además espectros mixtos de vegetación, con la ecuación 2.5 y espectros de reflectividad de suelo y vegetación puros. Estos espectros de reflectividad mixtos se calculan haciendo variar la  $P_v$  real de la ecuación 2.5 en el rango  $]0,1[$ . Todas estas muestras puras y mixtas constituyen un gran banco de pruebas para aplicar el MCV descrito en la sección 2.1 con los efectos atmosféricos simulados como se describe en los próximos apartados.

## 2.4. Transferencia radiativa en el dominio óptico

La radiancia medida por el canal  $i$  de un sensor  $L_i^*$ , puede relacionarse con la reflectividad extraterrestre equivalente, o reflectividad en la parte alta de la atmósfera  $\rho_i^*$ , como en la ecuación 2.26:

$$\rho_i^* = \frac{\pi L_i^*}{\mu_s E_{is}} \quad (2.26)$$

donde:

$E_{is}$  es la irradiancia solar extraterrestre del canal  $i$ , y

$\mu_s$  es el coseno del ángulo cenital solar.

Teniendo en cuenta los fenómenos de interacción con la atmósfera descritos en la sección 1.2, y según Staenz y Williams (1997), es posible notar la reflectividad en la parte alta de la atmósfera  $\rho_i^*$ , que observa el canal  $i$  de un sensor de teledetección, para una superficie horizontal, como la ecuación 2.27:

$$\rho_i^* = A_i \frac{\rho_{ci}}{1 - S_i \langle \rho_{ei} \rangle} + B_i \frac{\langle \rho_{ei} \rangle}{1 - S_i \langle \rho_{ei} \rangle} + \rho_{ai} \quad (2.27)$$

donde para el canal  $i$ :

$\rho_{ci}$  es la reflectividad en la parte baja de la atmósfera de la superficie observada,

$\langle \rho_{ei} \rangle$  es la reflectividad en la parte baja de la atmósfera del entorno en el que se encuentra la superficie observada,

$S_i$  es el albedo esférico de la atmósfera,

$\rho_{ai}$  es la radiancia retrodispersada por la atmósfera hacia el sensor,

$A_i$  da cuenta del efecto atmosférico sobre la radiación directa, y

$B_i$  da cuenta del efecto atmosférico sobre la radiación difusa.

Los parámetros  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$  describen tanto la geometría y posición en la atmósfera de sensor y área observada, como las condiciones atmosféricas para cada canal en las que se realiza la medida. Su valor no depende ni de la reflectividad de la superficie observada ni de la de su entorno. Así, su cálculo se realiza canal a canal a partir de las magnitudes  $\rho_{gi}$ , o fracción de la reflectividad correspondiente a la radiancia que alcanza el sensor desde la superficie observada, y  $\rho_{pi}$ , o fracción de la reflectividad correspondiente a la radiancia que alcanza el sensor desde el entorno de la superficie observada y por la atmósfera. Según Staenz y Williams (1997), para un medio de reflectividad uniforme,  $\rho_{gi}$  y  $\rho_{pi}$  se calculan con las ecuaciones 2.28 y 2.29, respectivamente:

$$\rho_{gi} = A_i \frac{\rho_{ci}}{1 - S_i \langle \rho_{ei} \rangle} \quad (2.28)$$

$$\rho_{pi} = B_i \frac{\langle \rho_{ei} \rangle}{1 - S_i \langle \rho_{ei} \rangle} + \rho_{ai} \quad (2.29)$$

Ambas magnitudes  $\rho_{gi}$  y  $\rho_{pi}$  pueden obtenerse mediante modelos de transferencia radiativa, como el *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) descrito en la sección 2.5, funcionando en modo directo para dos valores de la reflectividad de la superficie observada y su entorno. En dicha simulación de transferencia radiativa es donde se introducen los datos geométricos y atmosféricos sincrónicos a la obtención de la imagen. De esta manera, la obtención del valor de  $A_i$  y  $S_i$  es resultado directo de la resolución del sistemas de dos ecuaciones formado a partir de la ecuación 2.28 y los dos cálculos de transferencia radiativa para los dos valores de la reflectividad. De igual manera,  $B_i$  y  $\rho_{ai}$  es resultado directo de la resolución del sistema de dos ecuaciones formado con la ecuación 2.29 y los mencionados cálculos de transferencia radiativa.

Si la magnitud  $\langle \rho_{ei} \rangle$  o reflectividad del medio en el que se encuentra la superficie observada se considera indistinguible de la reflectividad del píxel ( $\langle \rho_{ei} \rangle = \rho_{ci}$ ), entonces la ecuación 2.27 queda como la ecuación 2.30:

$$\rho_i^* = (A_i + B_i) \frac{\rho_{ci}}{1 - S_i \rho_{ci}} + \rho_{ai} \quad (2.30)$$

Así, según se ha descrito en esta sección, con un valor de reflectividad real en la parte baja de la atmósfera,  $\rho_{ci}$ , y un conjunto de parámetros,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$ , junto a la ecuación 2.30, es posible obtener la reflectividad que se observaría desde la parte alta de la atmósfera y, por tanto, con el efecto atmosférico añadido.

Con ambas reflectividades (en la parte baja y alta de la atmósfera) se determina el índice de vegetación y, como se describe en la sección 2.1, la cobertura vegetal y emisividad en las partes baja y alta de la atmósfera. La comparación de la emisividad térmica a nivel de techo respecto a la original

en la parte baja de la atmósfera sirve como indicador de la idoneidad de la ya mencionada aproximación de Valor y Caselles (1996) del uso del *NDVI* para el MCV. Análogamente, con las reflectividades en las partes baja y alta de la atmósfera, y siguiendo el planteamiento de la sección 2.2, es posible deducir si alguno de los índices alternativos presenta ventajas respecto al *NDVI* adoptado por Valor y Caselles (1996) en la determinación de la emisividad con el MCV.

Por tanto, en esta Tesis se analiza cómo impacta el efecto de la atmósfera y la sensibilidad a la reflectividad del suelo del índice de vegetación empleado, al determinar la cobertura vegetal  $P_v$ , y de ésta, la emisividad térmica  $\epsilon$ , para las muestras puras y mixtas descritas en la sección 2.3.

## 2.5. Simulaciones de transferencia radiativa con 6S

En el apartado 2.4 se menciona la necesidad de cálculos de transferencia radiativa para simular el efecto de la atmósfera. Existen muchos modelos de transferencia radiativa, aunque entre los más populares está el 6S de Vermote et al. (1997b), por su potencia y porque se distribuye libremente a la comunidad científica para tareas de investigación.

El 6S permite estimar la radiancia que observaría un sensor de teledetección pasiva en el espectro solar, colocado a bordo de un satélite o de una plataforma en el interior de la atmósfera, cuando observa un blanco ubicado a nivel del mar o elevado a una cierta altura. El modelo simula el efecto de absorción de los gases de la atmósfera, en concreto de las especies absorbentes siguientes:  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  y  $CO$ . Para calcular la transmisividad de los gases, se emplean modelos aleatorios de bandas exponenciales (el de Goody (1964) para el  $H_2O$  y el de Malkmus (1967) para el resto de especies), considerando los parámetros de las líneas de absorción atmosférica del *Air Force Geophysics Laboratory*. Respecto a la dispersión, utiliza el método SOS (*Successive Order of Scattering*), uno de los más vanguardistas en el momento de su publicación. Para los cálculos anteriores, modeliza la atmósfera por estratos, para los que se consideran: altura, presión atmosférica, temperatura y humedad. El modelo permite considerar blancos con reflectividad uniforme y también diversos modelos de reflectividad bidireccional. La resolución espectral máxima del 6S es  $10\text{ cm}^{-1}$  (2,5 nm), mientras que su intervalo de trabajo es [250 – 4000] nm, lo que supone un máximo de 1.501 longitudes de onda donde se realiza la simulación (Vermote et al., 1997a).

De entre los parámetros de salida que proporciona el modelo 6S, cabe destacar tanto los valores de reflectividad en la parte alta de la atmósfera como diferentes radiancias e irradiancias en el techo y la parte baja de la atmósfera, respectivamente (Vermote et al., 1997b). Para el caso que nos ocupa, son de especial interés los valores necesarios para resolver las ecuaciones 2.28 y 2.29 del apartado 2.4, ya que nos permiten obtener los valores

de  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$  para cada simulación.

## 2.6. Obtención de valores de canal

Los modelos de transferencia radiativa como el 6S permiten trabajar en el denominado modo espectral, y por tanto a máxima resolución espectral. Como se indicó en la sección 2.4, cada simulación de transferencia radiativa estará asociada a unas condiciones geométricas y atmosféricas. El número total de simulaciones es función del intervalo y discretización de todos los parámetros de entrada. De aquí se deriva que trabajar en modo espectral es un inconveniente, puesto que implica un esfuerzo de computación importante. Por otro lado, trabajar en dicho modo es, a su vez, una ventaja, ya que las costosas simulaciones espetrales pueden adaptarse a la sensibilidad espectral de cualquier sensor y canal, lo que minimiza el esfuerzo de computación.

Siguiendo este razonamiento, los valores  $A_j$ ,  $B_j$ ,  $S_j$  y  $\rho_{aj}$  se calculan a la máxima resolución espectral del modelo 6S y para cada conjunto de parámetros de entrada. En este caso,  $j$  representa cada una de las longitudes de onda en las que el modelo de transferencia radiativa realiza el cálculo. Una vez obtenidos  $A_j$ ,  $B_j$ ,  $S_j$  y  $\rho_{aj}$  para cada simulación, se hace imperativo implementar la obtención de los valores de canal con los que aplicar el método del apartado 2.1.

Pese a estar ubicados en las mismas regiones espetrales, los diversos sensores de teledetección tienen canales cuyas sensibilidades espetrales son diferentes, bien por su longitud de onda central, bien por su intervalo espectral, o bien por la función filtro particular de cada canal. Las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 contienen las bandas roja e infrarroja próxima a utilizar con el método MCV y el *NDVI* cuando se trabaja como describe el apartado 2.1 para los sensores AVHRR, MODIS y MERIS. Las tablas incluyen el número de canal, su intervalo espectral, la longitud de onda central y el error radiométrico SNR (relación señal ruido).

En este punto, dispondremos de la reflectividad espectral, en la parte baja de la atmósfera, de un píxel cualquiera (puro o mixto) según se describe en la sección 2.3. Igualmente, dispondremos de tantos conjuntos de parámetros espetrales  $A_j$ ,  $B_j$ ,  $S_j$  y  $\rho_{aj}$  como simulaciones de transferencia radiativa se realicen. Los datos referidos alimentan a la ecuación 2.30 para todas las longitudes de onda, de manera que se obtiene un espectro de reflectividad con el efecto atmosférico simulado y, por tanto, en la parte alta de la atmósfera. De lo anterior se deduce que el número de espectros simulados en la parte alta de la atmósfera por cada espectro en la base será el número de simulaciones de transferencia radiativa  $j$ . Por último, se pondrá cada longitud de onda de los espectros según la sensibilidad espectral del canal,  $S_{ij}$ , de manera que cada simulación de transferencia radiativa acaba produciendo  $i$  magnitudes

Canales AVHRR				
Región	Número de canal	Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de onda central ( $\mu\text{m}$ )	Error radiométrico SNR
Rojo	1	0,58-0,68	0,64	$\geq 9$
Inf.próximo	2	0,73-1,00	0,86	$\geq 9$

Tabla 2.1: Canales del sensor AVHRR para el cálculo de índice de vegetación (Robel, 2009).

Canales MODIS				
Región	Número de canal	Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de onda central ( $\mu\text{m}$ )	Error radiométrico SNR
Azul	3	0,459-0,479	0,465	$\geq 243$
Verde	4	0,545-0,565	0,554	$\geq 228$
Rojo	1	0,620-0,670	0,646	$\geq 128$
Inf.próximo	2	0,841-0,876	0,856	$\geq 201$
Inf.medio 1,2	5	1,22-1,27	1,24	$\geq 74$
Inf.medio 1,6	6	1,60-1,66	1,63	$\geq 275$
Inf.medio 2,1	7	2,06-2,18	2,11	$\geq 110$

Tabla 2.2: Canales del sensor MODIS para el cálculo de índice de vegetación (NASA, 1999).

Canales MERIS				
Región	Número de canal	Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de onda central ( $\mu\text{m}$ )	Error radiométrico SNR
Rojo	8	0,678-0,685	0,681	$\geq 589$
Inf.próximo	13	0,855-0,875	0,865	$\geq 457$

Tabla 2.3: Canales del sensor MERIS para el cálculo de índice de vegetación (ESA-Earth-Online, 2000).

de canal, tantas como canales ópticos tenga el sensor en cuestión. Esto se expresa matemáticamente como la ecuación 2.31:

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_{ij} \cdot \rho_j}{\sum_{j=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_{ij}} \quad (2.31)$$

donde:

$S_{ij}$  es la sensibilidad espectral para la longitud de onda  $j$  del canal  $i$  del sensor,

$\rho_i$  es la reflectividad para el canal  $i$  del sensor, y

$\rho_j$  es la reflectividad espectral para la longitud de onda  $j$ .

Para el estudio de las alternativas al *NDVI*, y en particular de la sensibilidad al suelo en el cálculo de la emisividad térmica, se emplea únicamente el sensor MODIS ya que, como señala la tabla 2.2, presenta todas las bandas necesarias para calcular los índices de vegetación propuestos como alternativa al *NDVI* y que están descritos en las subsecciones 2.2.1 a 2.2.20.

## 2.7. Suelos radiométricamente homogéneo y heterogéneo

Cuando se emplea el MCV, Valor y Caselles (1996) señalan que se deben emplear como píxeles puros de suelo y vegetación aquellos que presentan valores máximos y mínimos de *NDVI*. Como esta Tesis pretende obtener unos resultados generales, válidos para cualquier tipo de suelo y vegetación, como indica la sección 2.3, se tiene en cuenta una gran cantidad de muestras de suelo sin vegetación y de vegetación pura. Además, a partir de los anteriores se generan gran cantidad de píxeles mixtos, como se indica en la sección 2.3. Adicionalmente, este trabajo emplea índices de vegetación diferentes del *NDVI*, por lo que no solo se da continuidad a la metodología de Valor y Caselles (1996), sino que se amplía: se consideran píxeles puros de suelo y vegetación pura aquellos que presentan valores, máximo y mínimo respectivamente, del índice de vegetación correspondiente.

Aunque, como se ha señalado, el MCV únicamente considera una muestra como suelo y vegetación pura, en este trabajo se consideran múltiples muestras de píxeles puros de suelo y vegetación obtenidos de bibliotecas especales. Por tanto, se tomarán por píxeles mixtos algunos que en realidad no lo son. Esta confusión de muestras puras es representativa de algunas

regiones, mientras que en otras zonas apenas es posible encontrar variación radiométrica de la vegetación y el suelo.

Para tener en cuenta esta eventualidad, en esta Tesis se plantean dos escenarios en la aplicación del MCV a un conjunto de muestras que contiene diversas muestras de suelo desprovisto de vegetación y de vegetación pura. A continuación, se describen ambas opciones, junto a una descripción de los entornos radiométricos a los que corresponde cada una de ellas:

- Suelo radiométricamente homogéneo: esta aproximación describe todas aquellas regiones donde al aplicar el MCV se observa una homogeneidad radiométrica en el suelo, tanto entre los píxeles totalmente cubiertos de vegetación como en los píxeles de suelo desprovisto de vegetación. Lógicamente, pueden presentarse muchas imágenes distintas, donde la vegetación pura y el suelo puro sean diferentes de los de otra imagen, aunque homogéneos dentro de cada una de ellas. Este planteamiento es válido bien para regiones muy uniformes, o bien cuando la zona de estudio se limita a un área pequeña. En consecuencia, en esta Tesis y con la aproximación de un suelo homogéneo, se analizan los espectros puros y mixtos, así como sus simulaciones atmosféricas, para cada pareja de muestras puras de suelo y vegetación tomadas de las bibliotecas espectrales. Los resultados de todas las parejas de suelo y vegetación puros se analizan posteriormente para obtener un resultado unificado de validez global.
- Suelo radiométricamente heterogéneo: por su parte, esta aproximación describe todas aquellas otras regiones donde al aplicar el MCV hay una heterogeneidad radiométrica del suelo entre todos los píxeles totalmente vegetados o entre todos los píxeles de suelo desprovisto de vegetación. Este caso, con mucha mezcla de tipos de suelo y tipos de vegetación, es el más probable cuando la resolución espacial es muy alta o cuando las especies vegetales y los suelos desprovistos de vegetación de la imagen son especialmente diversos. En tal caso, y con la aproximación de un suelo heterogéneo, se analizan todos los espectros puros y mixtos, así como sus simulaciones atmosféricas, conjuntamente. Por tanto, algunos píxeles de vegetación pura y suelo desprovisto de vegetación serán tratados por el MCV como píxeles mixtos. Los resultados tendrán validez global y son representativos de las regiones muy heterogéneas en suelos desprovistos de vegetación y vegetación pura, siempre desde el punto de vista radiométrico.

Como se señaló en la sección 2.1, el índice de vegetación *NDVI* presenta especial sensibilidad a la radiometría del suelo desprovisto de vegetación sobre el que ésta se asienta. Pese a ello, en este trabajo se considera que tanto la vegetación como el suelo desprovisto de vegetación pueden afectar

en la determinación de la emisividad, debido al índice de vegetación y a la atmósfera. Por tanto, para ambos entornos se analizan todas las parejas de suelo y vegetación puros disponibles en esta Tesis.

## 2.8. Método de análisis de las diferencias

Las magnitudes que se analizan para determinar el impacto de la atmósfera al emplear el MCV, tanto para el caso homogéneo como para el heterogéneo, son las siguientes:

- Índice de vegetación
- Cobertura vegetal
- Emisividad

El objeto de estudio de la Tesis son las diferencias al considerar el efecto de la atmósfera respecto a no considerarlo. De esta manera, se comparan las desviaciones de los valores de las magnitudes (índice de vegetación, cobertura vegetal y emisividad) en la parte alta de la atmósfera respecto a los valores genuinos de dichas magnitudes en la parte baja de la atmósfera. Los estadísticos empleados para el análisis de las diferencias (valor en la parte alta de la atmósfera menos valor en la parte baja de la atmósfera) son los siguientes:

- Valor promedio de las diferencias.
- Valor máximo de las diferencias.
- Valor mínimo de las diferencias.
- Cuartiles  $Q_1, Q_2$  y  $Q_3$  (25, 50 y 75 %) de las diferencias.

Se computan las diferencias para todas las coberturas de vegetación empleadas en la generación de muestras. Posteriormente, dichas diferencias se analizan por categorías de cobertura vegetal y también de manera global para todas las coberturas vegetales. En el caso de las diferencias porcentuales se dividirá entre el valor en la parte baja de la atmósfera.

Por su parte, el estudio de las alternativas al *NDVI* se realiza sobre las siguientes magnitudes:

- Cobertura vegetal
- Emisividad

En el estudio de las alternativas al *NDVI*, se hace uso de los mismos estadísticos que en el caso anterior. El objeto de estudio es, por analogía, la diferencia entre los valores de las magnitudes enumeradas (cobertura vegetal y emisividad) y sus correspondientes valores verdaderos (valor en la parte alta de la atmósfera menos valor en la parte baja de la atmósfera). Estos últimos se conocen de antemano de la fase de generación de muestras a analizar, donde se establece la discretización que se aplica a la cobertura vegetal, y de esta se calcula la emisividad.

Como en el caso anterior, se calculan las diferencias para todas las coberturas de vegetación empleadas en la generación de las muestras. Posteriormente, las diferencias se analizan por categorías de cobertura vegetal y de manera unificada para todas las coberturas vegetales. De nuevo, como en el caso anterior, para calcular diferencias porcentuales se dividirá entre el valor en la parte baja de la atmósfera.

# Capítulo 3

## Datos

**RESUMEN:** El objetivo de este capítulo es presentar los datos con los que se realiza esta Tesis y discutir su elección para alcanzar los objetivos de la misma. Primero se presentan los espectros de vegetación y suelos seleccionados de la biblioteca espectral ASTER, se justifica y discute su elección. A continuación, se detalla qué valores de la  $P_v$  se emplean en este trabajo, para generar una base de espectros con los que aplicar la metodología propuesta, sin un excesivo coste de computación, y su almacenamiento. Seguidamente, se describen las variables del modelo de transferencia radiativa 6S con que simular las condiciones geométricas y atmosféricas que los sensores encuentran en el dominio óptico, los valores que adoptan estas magnitudes y cómo se procesan y almacenan las simulaciones. Para finalizar, se muestra la sensibilidad espectral de los sensores AVHRR, MODIS y MERIS y se justifica su elección para esta Tesis, en particular la del MODIS por su riqueza espectral. Por último, se describe la aplicación de las simulaciones de transferencia radiativa y espectros antes descritos, su transformación a valores de canal y su almacenamiento para posteriores análisis.

### 3.1. Espectros de vegetación y suelo

En la sección 2.3 del capítulo 2 se describe la generación de espectros mixtos, con la  $P_v$  en el intervalo  $]0,1[$  para analizar el MCV según se describe en dicho capítulo. La generación de espectros mixtos requiere del uso de espectros de reflectividad de vegetación y suelo puros. Estos espectros se seleccionan de entre los presentes en la biblioteca espectral ASTER, descrita en Baldridge et al. (2009).

### 3.1.1. Selección de espectros de vegetación

La biblioteca espectral ASTER contiene un total de cuatro espectros en la categoría de vegetación: dos correspondientes a hierba y otros dos a bosque. De todos ellos, se han seleccionado los tres espectros descritos en la tabla 3.1. El cuarto, denominado *dry-grass*, se ha descartado, puesto que radiométricamente es más próximo a un suelo desprovisto de vegetación que a una vegetación, lo que podría provocar un sesgo en los resultados.

Muestras de vegetación pura (biblioteca ASTER)		
Nombre	ID muestra	Clase/subclase
Hierba	grass.doc	hierba/hierba vigorosa
Conífera	conifers.doc	Bosque/conífera
Caduco	decidous.doc	Bosque/caduco

Tabla 3.1: Muestras de vegetación de la biblioteca ASTER seleccionadas para representar la vegetación pura.

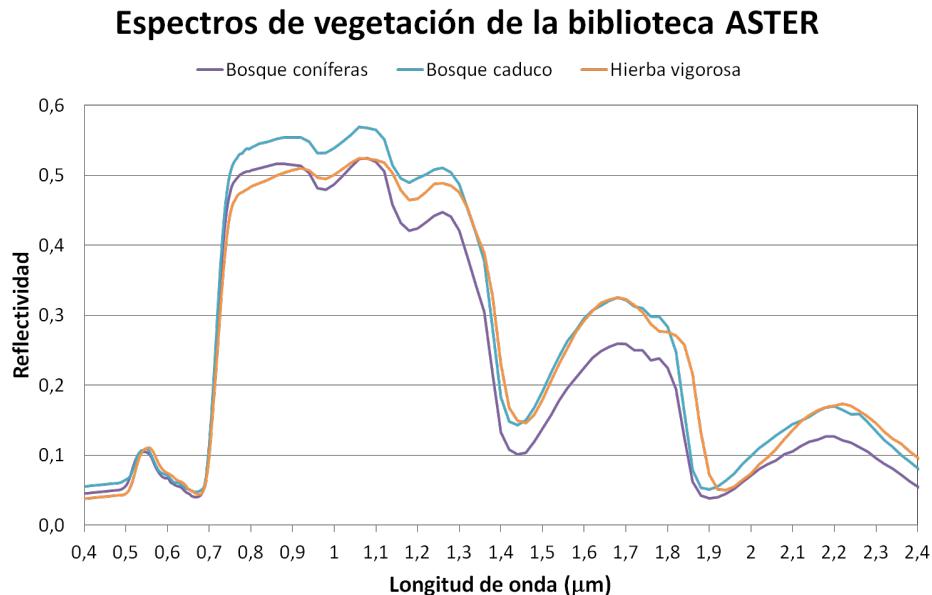


Figura 3.1: Espectros de vegetación de la biblioteca ASTER seleccionados.

La figura 3.1 muestra los espectros descritos en la tabla 3.1. Estos espectros de vegetación son radiométricamente indistinguibles en el visible y semejantes en el infrarrojo próximo y el infrarrojo medio, por lo que se consideran suficientes para representar a las especies vegetales en esta Tesis.

### 3.1.2. Selección de espectros de suelo

La biblioteca espectral ASTER, descrita en Baldridge et al. (2009), contiene un total de sesenta y nueve espectros en la categoría de suelos. Esta cantidad se antoja excesiva para ser considerada en su totalidad, puesto que, aunque esta Tesis pretende obtener unos resultados generales, hay muchos de los suelos que presentan comportamientos radiométricos indistinguibles en el dominio óptico. Su inclusión no aportaría generalidad al resultado y penalizaría el desarrollo de la Tesis al ser necesario un volumen de computación excesivo, sin que esto repercuta en una mejora de los resultados. Por los motivos expuestos, de los sesenta y nueve se han seleccionado nueve, entre el más oscuro y el más claro, de los presentes en la biblioteca. Los nueve espectros seleccionados se describen en la tabla 3.2.

La figura 3.2 muestra los espectros de suelo descritos en la tabla 3.2. Como puede observarse en la figura, contrariamente a lo discutido en la subsección 3.1.1 respecto a los espectros de vegetación pura, los espectros ahora seleccionados son muy diferentes radiométricamente en el visible, infrarrojo próximo e infrarrojo medio. Esta evidencia valida la hipótesis de que los nueve espectros de suelo son suficientemente representativos de todos los suelos de la biblioteca espectral. Por este motivo, se considera que son adecuados para representar a los suelos desprovistos de vegetación en esta Tesis.

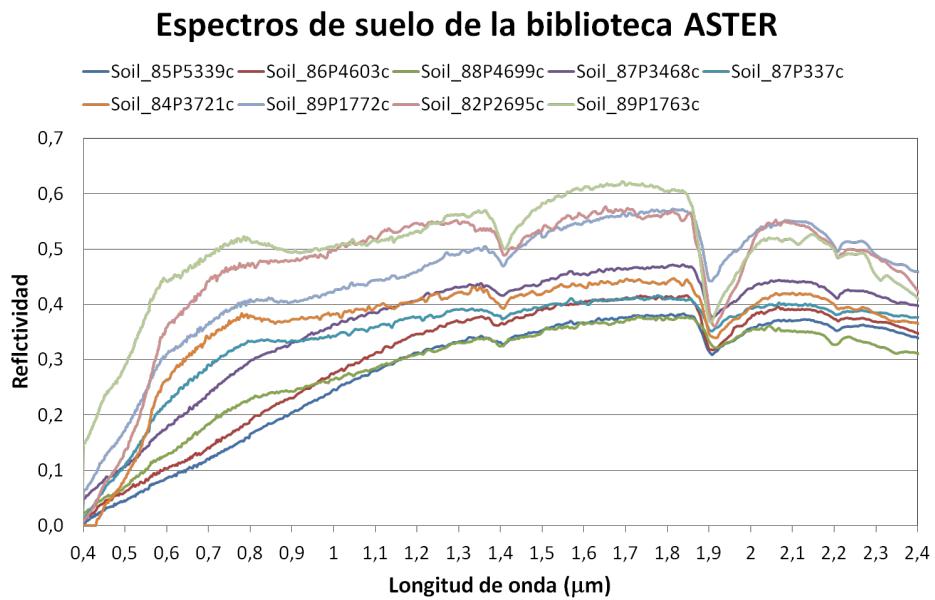


Figura 3.2: Espectros de suelo de la biblioteca ASTER seleccionados.

Muestras de suelo desprovisto de vegetación (biblioteca ASTER)			
Nombre	ID muestra	Clase/subclase	Composición
Arcilla-limo oscuro-grisácea	85P5339	Mollisol/Agialboll	2,29 % carbono orgánico, 30,3 % arcilla, 63,4 % limo, 6,3 % arena
Arcilla limosa gris	86P4603	Mollisol/Haplaquoll	1,88 % carbono orgánico, 25,6 % arcilla, 63,1 % limo, 11,3 % arena, 9 % $CaCO_3$
Limo oscuro	88P4699	Inceptisol/Haplumbrept	-
Arena fina oscura y limosa	87P3468	Alfisol/Haplustalf	0,86 % carbono orgánico, 6,3 % arcilla, 8,5 % limo, 85,2 % arena
Limo oscuro	87P337	Aridisol/Camborthid	0,89 % carbono orgánico, 7,2 % arcilla, 64,3 % limo, 28,5 % arena
Arcilla oscura amarillenta	84P3721	Aridisol/Calciorthid	1,02 % carbono orgánico, 18,1 % arcilla, 70,7 % limo, 11,2 % arena
Arcilla-arena oscura amarillenta	89P1772	Aridisol/Camborthid	0,13 % carbono orgánico, 4,0 % arcilla, 8,3 % limo, 87,7 % arena
Limo arenoso marrón pálido	82P2695	Aridisol/Gypsiorthid	0,47 % carbono orgánico, 16,4 % arcilla, 41,7 % limo, 41,9 % arena
Arcilla oscula amarillenta	89P1763	Aridisol/Salorthid	0,68 % carbono orgánico, 51,5 % arcilla, 18,8 % limo, 29,7 % arena

Tabla 3.2. Muestras de suelo desprovisto de vegetación de la biblioteca ASTER seleccionadas para representar el suelo puro.

### 3.1.3. Espectros mixtos y valores de la $P_v$

Una vez definidos los tres espectros de vegetación (subsección 3.1.1) y los nueve espectros de suelo desprovisto de vegetación (subsección 3.1.2), es directo deducir que el número de parejas posibles de espectros puros vegetación y suelo totaliza 27. Todos estos son los conjuntos de espectros provenientes de la librería espectral, que se consideran en esta Tesis. Como indica la sección 2.3, a partir de cada una de las 27 parejas de espectros vegetación-suelo, se consideran muchos casos mixtos para analizar el comportamiento del MCV para todos los valores de la  $P_v$ . Esto se realiza con la ecuación 2.5 descrita en la sección 2.2. En este trabajo, se consideran 50 valores de cobertura vegetal,  $P_v$ , entre cero y uno, de manera que a partir de cada una de las parejas de espectros puros se obtienen 48 espectros mixtos. Con esto, y teniendo en cuenta que en este trabajo el número de parejas de espectros puros es 27, el número total de espectros, puros y mixtos, alcanza 1.308, de los cuales 1.296 son mixtos. Esta elección en el número de valores de cobertura vegetal responde a la necesidad posterior de analizar los resultados para todos los valores de la  $P_v$  en categorías o intervalos. El número de intervalos seleccionados para este estudio es cinco, de manera que cada categoría de  $P_v$  estará formada por 10 valores de  $P_v$  en el rango [0,1], como puede observarse en la tabla 3.3. La discretización de la  $P_v$  seleccionada es un compromiso entre el volumen de datos y computación totales y el número de valores que conforman cada categoría de  $P_v$ , de manera que los estadísticos que se aplican a los mismos, descritos en la sección 2.8, proporcionen información significativa.

Estadística de la $P_v$ por categorías					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>Promedio</b>	0,092	0,296	0,50	0,704	0,908
<b>Máximo</b>	0,184	0,388	0,592	0,786	1
<b>Mínimo</b>	0	0,204	0,408	0,612	0,808

Tabla 3.3: Descripción estadística de las categorías de la  $P_v$  seleccionadas para el análisis del MCV con muestras mixtas de vegetación y suelo.

Los valores de reflectividad de las muestras de suelo y vegetación obtenidas de las librerías espetrales se almacenan en archivos ASCII con la resolución espectral original de la biblioteca ASTER. Los espectros mixtos obtenidos al hacer variar la  $P_v$  como se ha descrito no se almacenan físicamente, sino que se calculan en tiempo de ejecución a partir de los espectros puros (los de la biblioteca) y el número de valores de la  $P_v$ . Este criterio se considera adecuado para minimizar la información almacenada, puesto que en este caso su cálculo apenas tiene coste computacional en tiempo de ejecución.

En la figura 3.3 se representan las muestras de suelo y vegetación puras, así como las muestras mixtas descritas en este apartado para el sensor MODIS. Puede observarse cómo las muestras de suelo puro se alinean sobre la denominada línea de suelo, representada en la figura con trazo discontinuo. La figura evidencia que las muestras de vegetación elegidas en la subsección 3.1.1 son bastante similares radiométricamente, lo que refuerza su elección como representantes de la vegetación. De igual manera, la figura destaca que las muestras de suelo puro elegidas en la subsección 3.1.2 son suficientemente diversas como para resultar representativas de la radiometría de los suelos desprovistos de vegetación y para que los resultados de esta Tesis sean considerados generales.

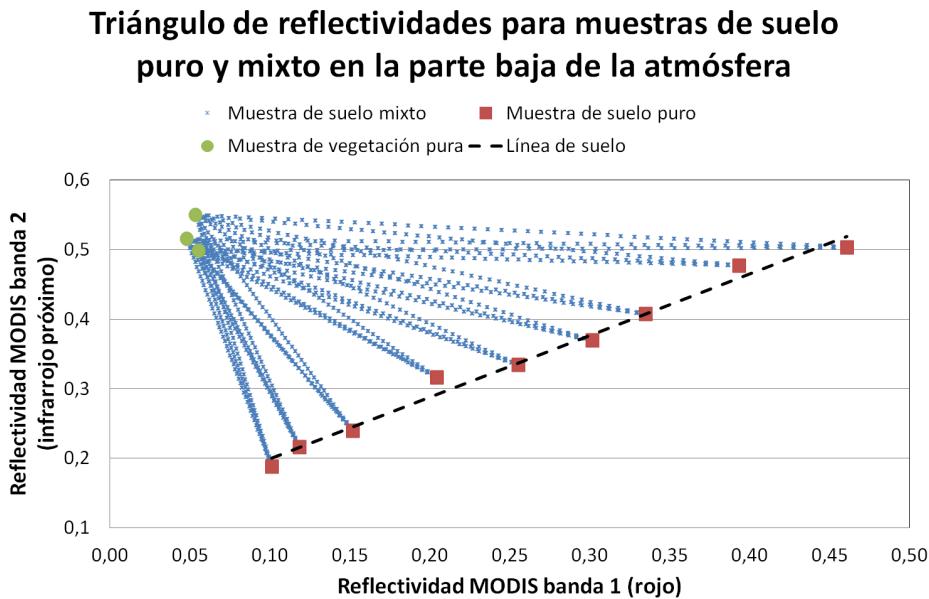


Figura 3.3: Triángulo de reflectividades rojo-infrarrojo próximo de los espectros de vegetación y suelo puros, y los espectros mixtos en la parte baja de la atmósfera. Detalle de la línea de suelo.

### 3.2. Configuraciones del modelo 6S

El modelo de transferencia radiativa 6S se utiliza para simular el efecto de la atmósfera en el espectro solar. Como se indica en las secciones 2.4 y 2.5, cada una de las simulaciones de transferencia radiativa se realiza para unas condiciones geométricas y atmosféricas particulares. En este estudio, las magnitudes que se tienen en cuenta para la configuración del 6S son: tipo de atmósfera, modelo aerosol, cantidad total de aerosoles, geometría de

iluminación y geometría de observación. La tabla 3.4 muestra el conjunto de magnitudes y valores considerados en las simulaciones en esta Tesis. La inspección de la tabla permite deducir que se ha considerado la mayor cantidad de condiciones posibles que se suelen presentar en las imágenes de satélite, tanto por geometría y estado de la atmósfera.

<b>Simulaciones con el modelo 6S. Magnitudes y valores</b>	
<b>Modelo atmosférico</b>	US standard 62, Tropical, Mid-latitude winter, Mid-latitude summer, Sub-arctic summer, y Sub-arctic winter
<b>Modelo de aerosoles</b>	Continental, maritime y urban
<b>Concentración de aerosoles</b> (visibilidad atmosférica)	7, 5, 15, 30 60 y 120 km
<b>Ángulo cenital iluminación</b> (cenit = 0 °)	15, 30, 45, 60 y 75 °
<b>Ángulo cenital observación</b> (cenit = 0 °)	0, 15, 30, 45 y 60 °
<b>Diferencia de azimut</b>	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315 °

Tabla 3.4: Magnitudes del modelo 6S consideradas como variables e intervalos empleados para las variables en las simulaciones.

Vale la pena recordar que cada simulación permite la obtención de un conjunto de parámetros,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$ , luego el número total de conjuntos de parámetros resulta de combinar todos los valores de la tabla 3.4. Con cada una de estas simulaciones se obtiene el conjunto de los cuatro parámetros ( $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$ ) que en este trabajo se almacenan en un archivo ASCII con la nomenclatura "*Simula-i-ii-iii-iv-v-vi.par*" donde los valores  $i$  a  $vi$  se interpretan como los valores de la tabla 3.4 de esta manera:

- i* es valor del modelo atmosférico [1 a 6],
- ii* es valor del modelo de aerosol [1 a 3],
- ii* es valor de la concentración de aerosoles [1 a 5],
- iv* es el ángulo cenital de iluminación [1 a 5],
- v* es el ángulo cenital de observación [1 a 5], y

$vi$  es la diferencia de azimut [1 a 8].

En atención a todo lo anterior, el número de simulaciones diferentes (y de archivos como los descritos) totaliza 18.000. En cada uno de los archivos, y de manera espectral, se procede según describe la sección 2.4 para obtener un conjunto de cuatro parámetros ( $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$ ) para cada una de las longitudes de onda del modelo 6S, que según se indica en la sección 2.5 son 1.501. Por tanto, cada uno de los 18.000 archivos de simulación contiene 1.501 grupos (filas) de 4 parámetros (columnas). Es importante recordar que en la sección 2.6 se discute sobre la conveniencia de proceder de esta manera para que sea factible reutilizar las simulaciones de transferencia radiativa, que tienen un importante coste de computación, para cuantos sensores se considere oportuno en este o futuros trabajos.

En la figura 3.4, se representan las muestras de suelo y vegetación puras y mixtas MODIS, del apartado 3.1, tras ser sometidas a la simulación atmosférica "2 1 1 4 5 3" (modelo atmosférico tropical, modelo de aerosoles continental, visibilidad atmosférica 7,5 km, ángulo cenital de iluminación 60°, ángulo cenital de iluminación 60° y diferencia de azimut 90°).

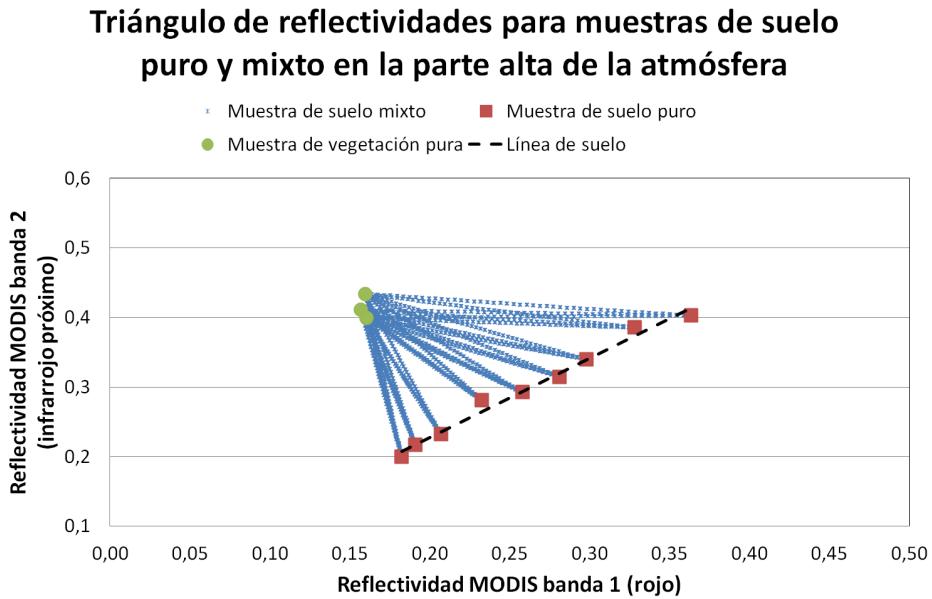


Figura 3.4: Triángulo de reflectividades rojo-infrarrojo próximo de los espectros de vegetación y suelo puros, y los espectros mixtos en la parte alta de la atmósfera (Simulación 2 1 1 4 5 3). Detalle de la nueva línea de suelo en la parte alta de la atmósfera.

Según lo descrito en este apartado, se trata de la simulación de unas condiciones geométricas y atmosféricas severas, lo que permite resaltar el efecto

de la atmósfera en la reflectividad de los canales rojo e infrarrojo próximo. La comparación con la figura 3.3 permite deducir que las reflectividades reducen su intervalo, por acción de la atmósfera. Esto redundaría en una disminución de su contraste, pero cabe esperar a posteriores análisis para determinar en qué medida dicha alteración de los intervalos de reflectividades afecta a la determinación exacta de la emisividad.

### 3.3. Sensibilidad espectral

En la sección 2.6 se desarrolla cómo pasar los valores de reflectividad espectral a valores de canal con los que computar los índices de vegetación. Esto es necesario para poder aplicar el MCV con el *NDVI* o con cualquier otro índice de vegetación, como ya se ha descrito en capítulos anteriores. El *NDVI* es un índice muy popular por la sencillez de su cálculo, pero también porque las bandas espectrales que precisa están presentes en todos los sensores multiespectrales. De entre todos los sensores, el AVHRR, MODIS y MERIS, son particularmente interesantes. Las bandas roja e infrarroja próxima de los tres están ubicadas aproximadamente sobre la misma longitud de onda central, como se deduce de las tablas 2.1 a 2.3 de la sección 2.6. Pero, tanto dichas tablas como las figuras 3.5 a 3.7 muestran que los canales AVHRR tienen un intervalo espectral grande, mientras que los de MERIS presentan un intervalo espectral muy pequeño. Los canales MODIS tienen un intervalo espectral intermedio, entre AVHRR y MERIS. Esta característica de los canales de MODIS, además de su riqueza espectral adicional, que muestra la figura 3.8, hacen de MODIS el sensor idóneo para el estudio de alternativas al NDVI en la determinación de la emisividad con el MCV, puesto que permite explorar con mayor cantidad de índices que el AVHRR y el MERIS.

En la sección 3.1 se describe la obtención de los espectros de vegetación estudiados. Por su parte, en la sección 3.2 se hace lo propio con las simulaciones de transferencia radiativa. Con ambas informaciones y las sensibilidades espectrales de los canales aquí descritas, se genera el siguiente paso en los cálculos para cada uno de los sensores (AVHRR, MODIS y MERIS). Cada uno de los 18.000 archivos "Simula-i-ii-iii-iv-v-vi.par" descritos en la sección 3.2 es aplicado sobre los 1.308 espectros descritos en la sección 3.1.3 para generar otros 18.000 archivos ASCII, por sensor, con la nomenclatura "TOA-i-ii-iii-iv-v-vi.par", donde los valores  $i$  a  $vi$  se interpretan como en la sección 3.2. En cada uno de estos archivos, se almacena la aplicación de los parámetros  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  y  $\rho_{ai}$  con la ecuación 2.30 a los 1.308 espectros, que antes de ser guardados son filtrados por la sensibilidad espectral del sensor, según se describe en la sección 2.6. Por tanto, cada uno de los 18.000 archivos de reflectividad en la parte alta de la atmósfera contiene 1.308 muestras de vegetación (filas) para los canales de cada sensor (columnas).

### Sensibilidad espectral de los canales AVHRR 1 y 2 (par NDVI)

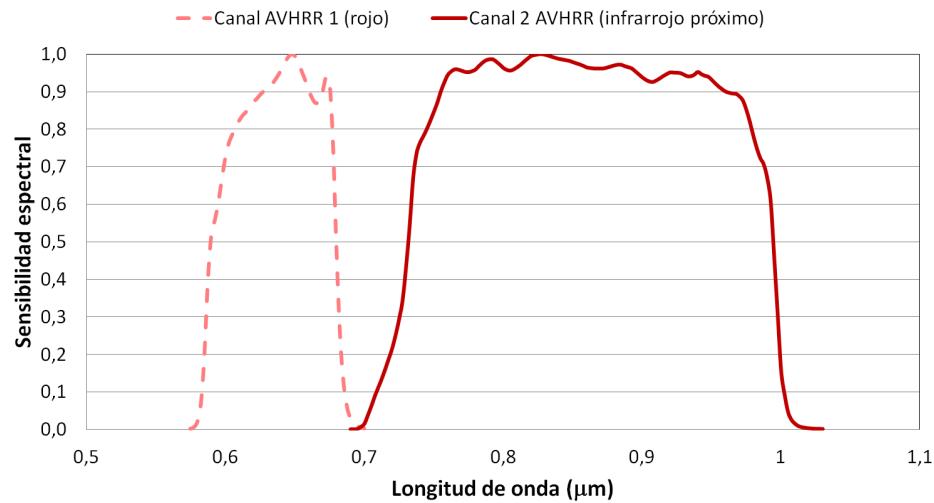


Figura 3.5: Sensibilidad espectral de los canales 1 y 2 de AVHRR (rojo e infrarrojo próximo) empleados en el cálculo del *NDVI*.

### Sensibilidad espectral de los canales MERIS 8 y 13 (par NDVI)

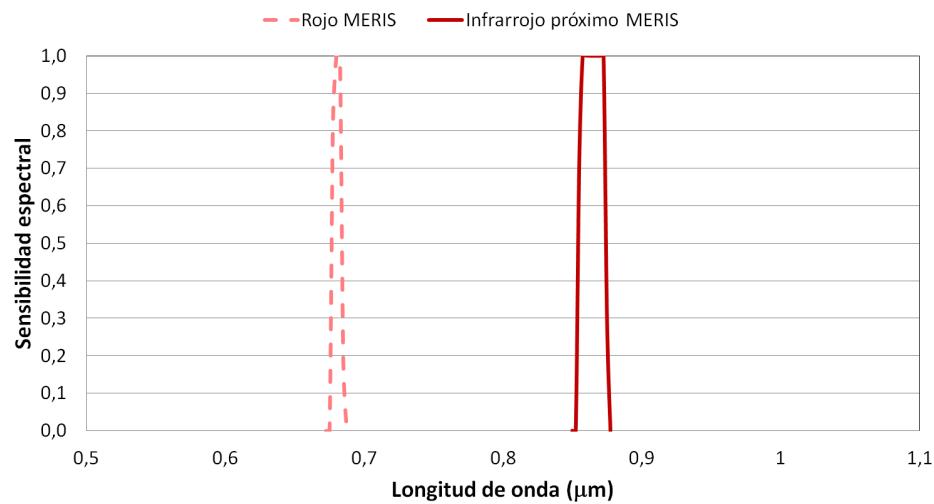


Figura 3.6: Sensibilidad espectral de los canales 8 y 13 de MERIS (rojo e infrarrojo próximo) empleados en el cálculo del *NDVI*.

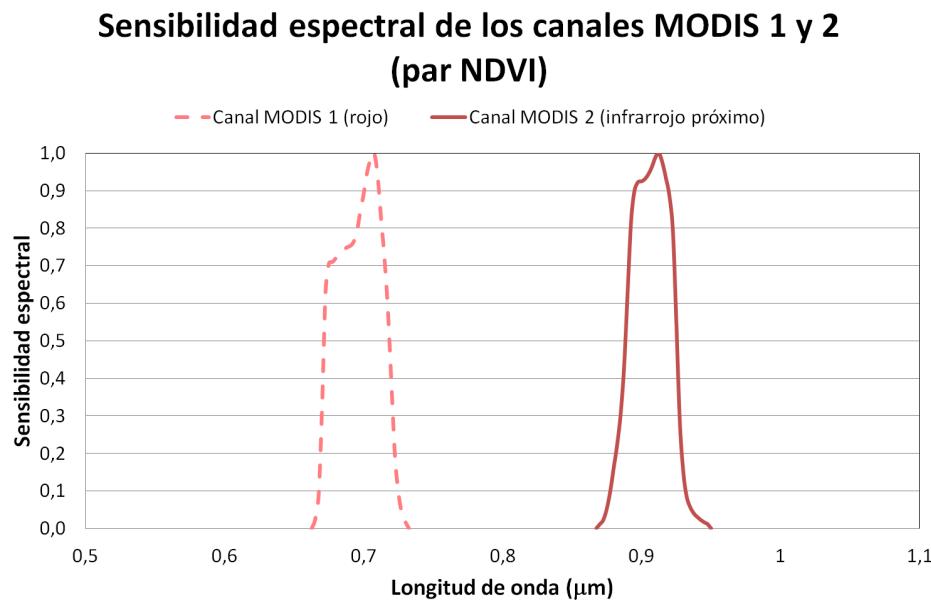


Figura 3.7: Sensibilidad espectral de los canales 1 y 2 de MODIS (rojo e infrarrojo próximo) empleados en el cálculo del *NDVI*.

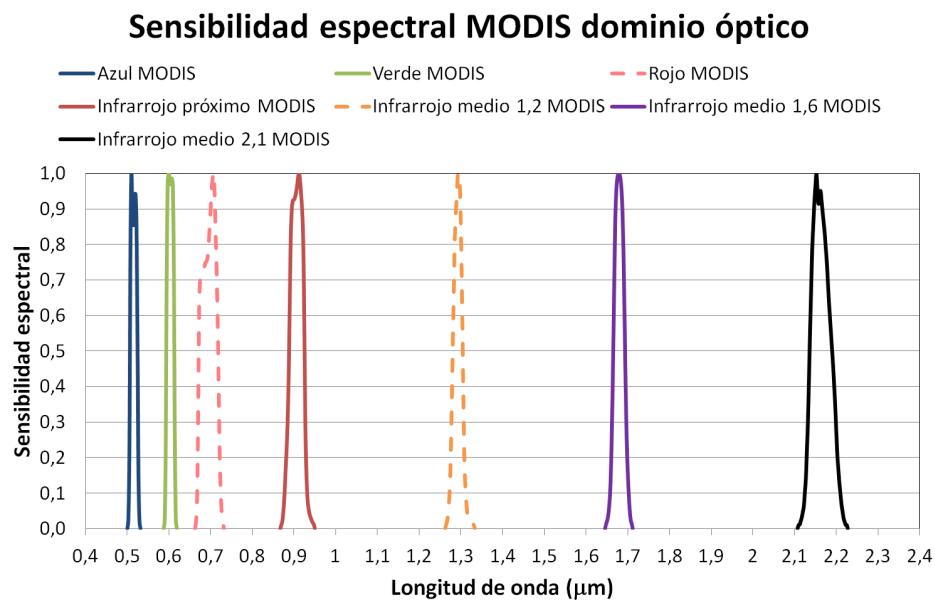


Figura 3.8: Sensibilidad espectral de los canales MODIS empleados para todos los índices de vegetación.



## Capítulo 4

# Resultados con $NDVI$

**RESUMEN:** En este capítulo se inicia el análisis de los resultados de la Tesis. Las metodologías y datos de capítulos precedentes proporcionan una profusión de resultados que analizar y de los que extraer conclusiones. El primer apartado guía al lector por los efectos de la atmósfera en el índice de vegetación  $NDVI$  para los sensores AVHRR, MODIS y MERIS. Este efecto resulta muy apreciable, es función del sensor y gobernado por la dispersión de los aerosoles. Los siguientes resultados analizados son los relativos a la cobertura vegetal obtenida con el algoritmo genuino del MCV, es decir, a partir del  $NDVI$ . Este es un paso intermedio hacia la obtención de la emisividad térmica. La  $P_v$  presenta una variación apreciable en el caso de un suelo radiométricamente heterogéneo, mientras que es poco apreciable en el caso homogéneo. Y así, se alcanza el análisis que es uno de los objetivos de esta Tesis. Se trata del efecto de la atmósfera en la emisividad térmica con la cobertura vegetal obtenida a partir del  $NDVI$ . El comportamiento de la  $\epsilon$  es semejante al de la  $P_v$ , con una variación poco apreciable en el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, lo que implica leves variaciones en temperatura comprendidas entre +0,07 K y -0,04 K. Sin embargo, en el caso heterogéneo, hay una importante variación de la  $\epsilon$  que implica importantes variaciones en temperatura de entre +2,5 K y -1,0 K. Por último, para profundizar en los resultados anteriores, se analiza el efecto del tipo de suelo desprovisto de vegetación, sin la concurrencia del efecto atmosférico, en la determinación de la cobertura vegetal y la emisividad. En este caso, tanto la  $P_v$  como la  $\epsilon$  se muestran muy sensibles al efecto del suelo, con una variación en temperatura de entre +3 K y -0,3 K. De esto se concluye que la emisividad térmica es poco sensible a la atmósfera pero muy sensible a la radiometría del suelo.

### 4.1. Atmósfera e índice *NDVI*

En este apartado se analiza el efecto de la atmósfera en el índice de vegetación *NDVI*. Para ello, se hace uso de la modelización del efecto de la atmósfera para un canal  $i$  descrito en la sección 2.4. Con este método se procesan todas las muestras puras y mixtas de suelo y vegetación permeabilizadas en el apartado 3.1, con las simulaciones atmosféricas reseñadas en el apartado 3.2. Con las reflectividades obtenidas se computa el índice *NDVI* en la parte alta de la atmósfera y se compara por diferencia con el correspondiente índice en la parte baja de la atmósfera, expresándolo como porcentaje de la magnitud en la parte baja de la atmósfera. Después, se comparan los histogramas de los valores del *NDVI* para todas las simulaciones, manteniendo un parámetro de la simulación constante, de manera que se observe la dependencia de los resultados con cada uno de los parámetros. A continuación, se detallan los resultados obtenidos.

La tabla 4.1 muestra la diferencia porcentual en el índice de vegetación *NDVI*, debida al efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de *NDVI* (en la parte alta respecto a la parte baja de la atmósfera) para los tres sensores. Como puede deducirse de la tabla, la atmósfera produce, en promedio, un descenso en el valor del *NDVI* para todos los sensores analizados. Sin embargo, se observan también incrementos y decrementos para algunas condiciones atmosféricas, de ahí los valores máximo y mínimo para cada cobertura vegetal. El máximo decremento se produce para el AVHRR, el sensor de canales más anchos, mientras que el máximo incremento se produce para el MERIS, el sensor con los canales más estrechos de los estudiados. Por su parte, el MODIS tiene un comportamiento intermedio entre el AVHRR y el MERIS. Estos resultados señalan que el índice *NDVI* es dependiente del sensor y, por tanto, de la longitud de onda central e intervalo espectral de los canales.

$\Delta_{NDVI}$ - Efecto de la atmósfera			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	-38 %	-11 %	-13 %
<b>Máximo</b>	95 %	251 %	325 %
<b>Mínimo</b>	-442 %	-128 %	-232 %

Tabla 4.1: Diferencia porcentual en el índice de vegetación, *NDVI*, por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de *NDVI* entre las partes alta y baja de la atmósfera.

Las figuras 4.1 a 4.3 muestran la diferencia porcentual en el índice de

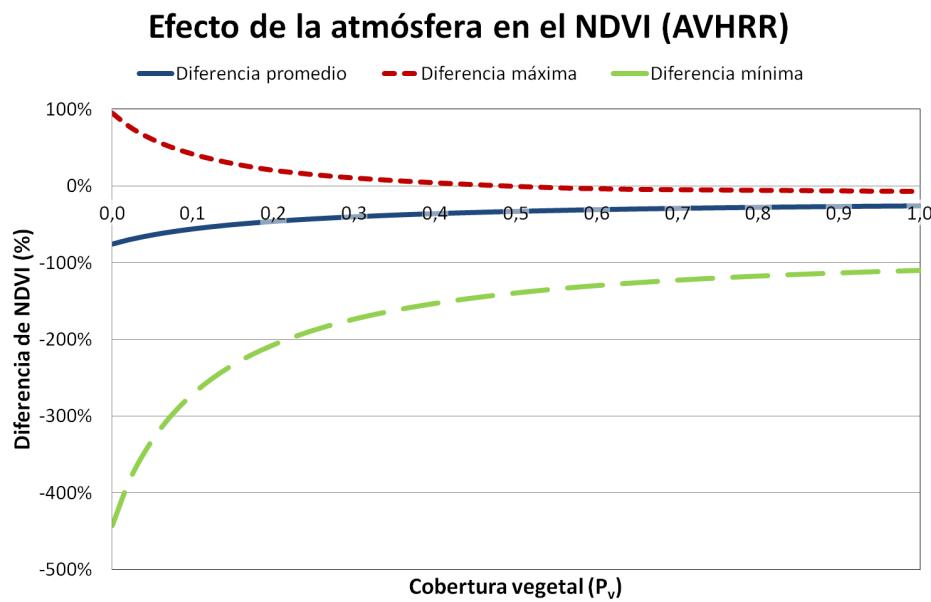


Figura 4.1: Diferencia porcentual en el índice *NDVI*, por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en el AVHRR. Valores promedio, máximo y mínimo de la diferencia en función de la  $P_v$ .

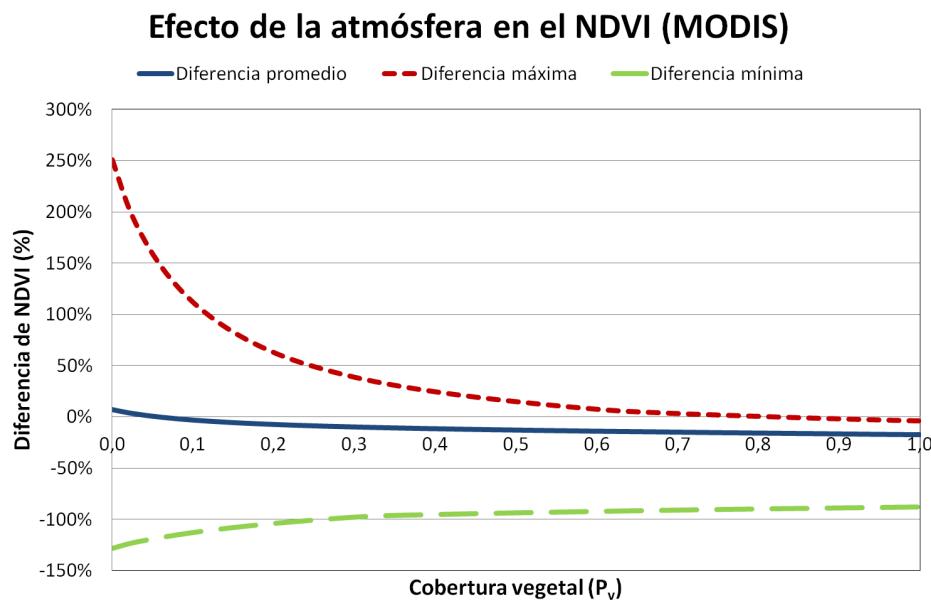


Figura 4.2: Diferencia porcentual en el índice *NDVI*, por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en el MODIS. Valores promedio, máximo y mínimo de la diferencia en función de la  $P_v$ .

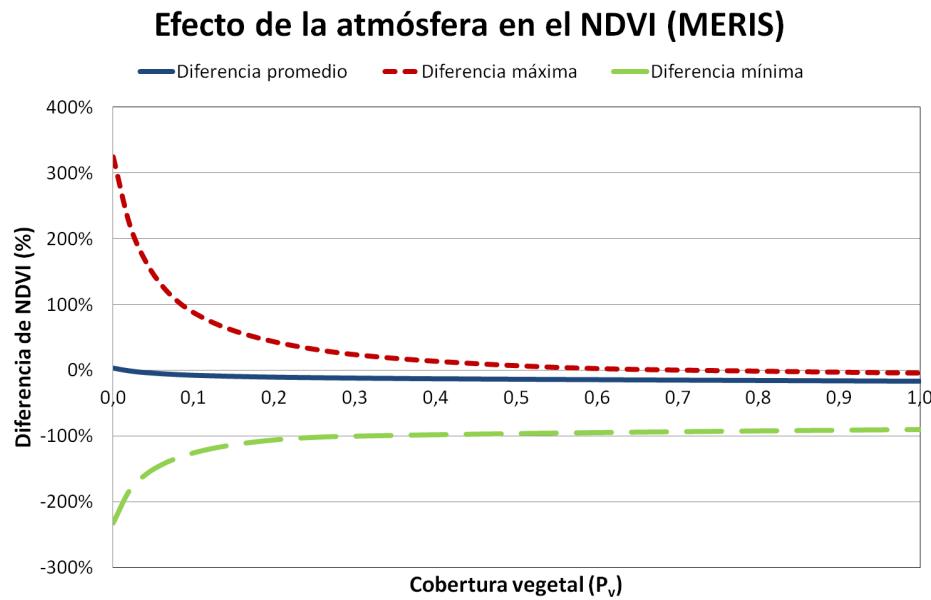


Figura 4.3: Diferencia porcentual en el índice *NDVI*, por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en el MERIS. Valores promedio, máximo y mínimo de la diferencia en función de la  $P_v$ .

vegetación *NDVI*, por el efecto atmosférico como función de la cobertura vegetal para todos los sensores estudiados. Los gráficos presentan un mayor intervalo entre el máximo y el mínimo para valores de cobertura vegetal próximos a cero, lo que apunta a la conocida influencia del suelo en el valor del índice. Por su parte, a partir de coberturas vegetales del 50 %, los valores de diferencia porcentual en el *NDVI* tienden a estabilizarse. Este comportamiento se explica por la uniformidad radiométrica de la vegetación, que ya se comentó en el subapartado 3.1.1. Los tres sensores presentan un patrón común, aunque los valores concretos para cada uno difieren, especialmente a baja cobertura vegetal. Este fenómeno se justifica por la diferente sensibilidad espectral de los canales rojo e infrarrojo próximo en cada uno de ellos, descritos en la sección 3.3.

A continuación, se analizan los resultados para los diversos intervalos de cobertura vegetal descritos en la subsección 3.1.3. La tabla 4.2 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de *NDVI* en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. La tabla indica que la disminución promedio del índice es más importante para AVHRR que para MODIS y MERIS, siendo estos dos últimos comparables. Respecto a la distribución de valores máximos, se sitúan alrededor de cero en el caso de AVHRR, y por encima para MODIS y MERIS. Sin embargo, ahora MODIS presenta un mayor rango que MERIS. En cuanto a la distribución de los

valores mínimos, existe una relación entre sensores equivalente a la de valores máximos. Los mínimos corresponden al sensor AVHRR, mientras que MODIS y MERIS presentan disminuciones más atenuadas y compactas.

$\Delta NDVI$ - Efecto de la atmósfera			
	<b>AVHRR</b>	<b>MODIS</b>	<b>MERIS</b>
<b>Promedio</b>	$Q_1$ -43 %	-15 %	-15 %
	$Q_2$ -33 %	-13 %	-14 %
	$Q_3$ -29 %	-9 %	-11 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ -5 %	1,6 %	-0,5 %
	$Q_2$ -0,3 %	15 %	7 %
	$Q_3$ 15 %	49 %	32 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -188 %	-101 %	-102 %
	$Q_2$ -139 %	-94 %	-96 %
	$Q_3$ -120 %	-91 %	-93 %

Tabla 4.2: Diferencia porcentual en el índice *NDVI*, por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Valor de los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de *NDVI*.

Seguidamente, la tabla 4.3 muestra la diferencia porcentual en el índice de vegetación, *NDVI*, clasificado en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores para los tres sensores, para cada intervalo de la  $P_v$ . Tal como se aprecia en la tabla, la mayor merma en el promedio de índice de vegetación se produce para una baja  $P_v$  en el caso de AVHRR, pero a una alta  $P_v$  en MODIS y MERIS, siendo comparables las magnitudes promedio de estos últimos. En lo referente a los máximos y mínimos para todos los sensores, el primero tiene un comportamiento monótono decreciente con la  $P_v$ , mientras que el segundo lo tiene monótono creciente respecto a la  $P_v$ . De hecho, los tres sensores convergen hacia unos mismos valores de máximo y mínimo a muy alta  $P_v$ . Esto responde a la variabilidad en los espectros de suelo, frente a la semejanza en los espectros de vegetación, mostrada en el capítulo 3.

Para completar el estudio del comportamiento del *NDVI* al ser observado en la parte alta de la atmósfera, a continuación se analiza el histograma de valores del índice para los diferentes valores de las magnitudes que se tienen en cuenta para la configuración del 6S con el sensor MODIS. En primer lugar, como referencia, la figura 4.4 muestra todos los valores del *NDVI* en la parte baja de la atmósfera.

La figura 4.5 muestra el histograma del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las atmósfera consideradas en el modelo de transferencia radiativa, lo que permite analizar el impacto de dicha magni-

$\Delta NDVI$ - Efecto de la atmósfera					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>AVHRR</b>					
<b>Promedio</b>	-59 %	-41 %	-33 %	-29 %	-27 %
<b>Máximo</b>	95 %	20 %	4 %	-4 %	-6 %
<b>Mínimo</b>	-442 %	-205 %	-152 %	-129 %	-117 %
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	-1,4 %	-10 %	-13 %	-15 %	-17 %
<b>Máximo</b>	251 %	61 %	23 %	6 %	-0,2 %
<b>Mínimo</b>	-128 %	-104 %	-95 %	-92 %	-90 %
<b>MERIS</b>					
<b>Promedio</b>	-6 %	-12 %	-14 %	-15 %	-16 %
<b>Máximo</b>	325 %	42 %	13 %	2 %	-1,6 %
<b>Mínimo</b>	-232 %	-105 %	-98 %	-95 %	-92 %

Tabla 4.3: Diferencia porcentual de *NDVI*, por el efecto atmosférico, para las muestras clasificadas por la  $P_v$  y todas las simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias para cada intervalo de la  $P_v$ .

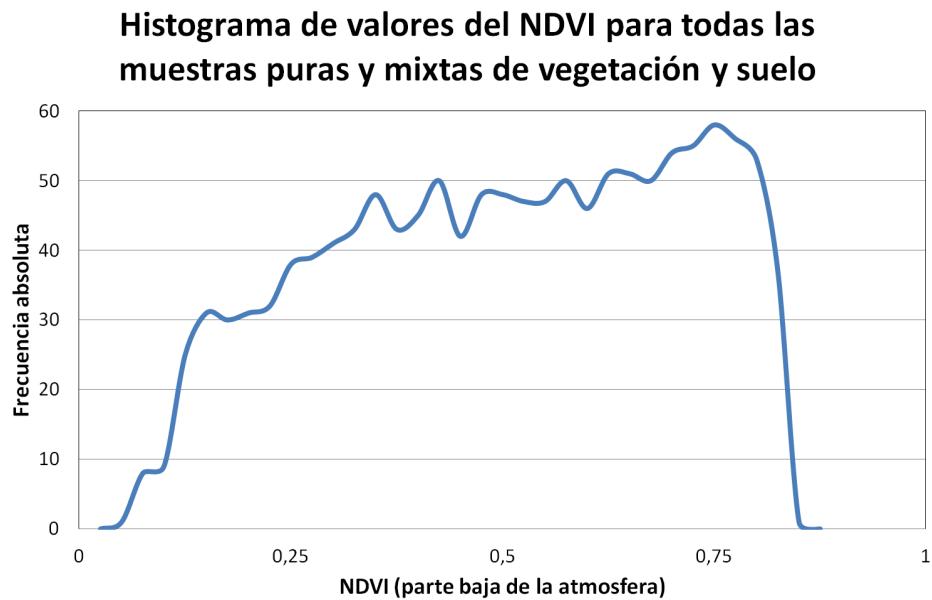


Figura 4.4: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte baja de la atmósfera para las muestras puras y mixtas de suelo y vegetación.

tud en el índice. Como puede observarse en la figura, el modelo de atmósfera apenas impacta en el resultado, ya que los histogramas son muy similares. Esto se explica porque la mayor diferencia entre las atmósferas es las cantidades  $H_2O$  y  $O_3$  gaseosas presentes, cuya variación es poco significativa para los canales rojo e infrarrojo próximo empleados en el índice.

La figura 4.6 muestra el histograma del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada uno de los modelos de aerosol considerados en el modelo de transferencia radiativa, lo que analiza su impacto en el índice de vegetación. La figura muestra que el modelo de aerosol impacta muy levemente en el resultado, como se deduce de la similitud entre los histogramas obtenidos. Aunque el modelo de aerosol es un parámetro importante en la transferencia radiativa en el domino óptico, el resto de parámetros considerados en las simulaciones parecen diluir su impacto global en los resultados, tal y como se deduce de la figura.

La figura 4.7 muestra el histograma del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las concentraciones de aerosoles en las simulaciones de transferencia radiativa, para estudiar su importancia en el índice de vegetación. La figura indica que la cantidad de aerosoles es importante para el efecto de la atmósfera en el índice de vegetación *NDVI*. El índice reduce su valor según crece la concentración de aerosoles, ya que la presencia de aerosoles incrementa la radiación difusa en la parte alta de la atmósfera a costa de la radiación directa, lo que reduce la señal del píxel y la sustituye por radiación retrodispersada que no aporta información de la superficie observada. Este efecto tiende a uniformizar radiométricamente la señal en la parte alta de la atmósfera, lo que provoca el mencionado efecto de reducción en el valor del índice que muestra la figura.

La figura 4.8 muestra el histograma del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las geometrías cenitales de iluminación solar empleadas en el 6S. La figura muestra que el ángulo cenital de iluminación provoca un efecto atmosférico importante en el índice de vegetación *NDVI*. Como en el caso de la cantidad de aerosoles, el índice reduce su valor según crece el ángulo cenital de iluminación. Este fenómeno es coherente con el anterior, puesto que la distancia recorrida en la atmósfera por la radiación solar se incrementa cuando lo hace el ángulo cenital solar, lo que a efectos prácticos es como mantener la distancia recorrida en la atmósfera, pero con una mayor concentración efectiva de aerosoles. Este razonamiento se sostiene en las figuras 4.7 y 4.8, donde tanto el incremento de la concentración de aerosoles como el incremento del ángulo cenital de iluminación provocan el mismo efecto en el histograma de valores del índice.

La figura 4.9 muestra el histograma del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las geometrías cenitales de observación consideradas en las simulaciones con 6S. La figura indica que el ángulo cenital de observación tiene un comportamiento en el índice de vegetación

### Histogramas de valores del NDVI con el sensor MODIS para los modelos de atmósfera

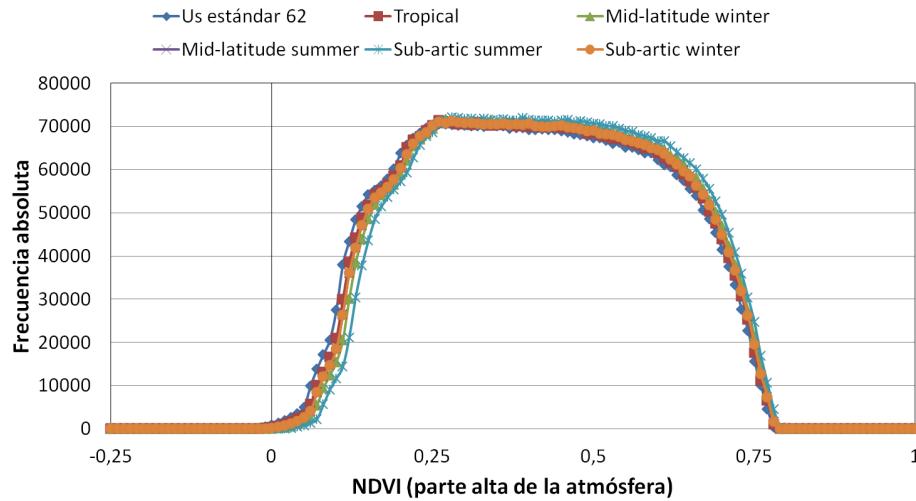


Figura 4.5: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada una de las atmósferas consideradas en el estudio.

### Histogramas de valores del NDVI con el sensor MODIS para los modelos de aerosoles

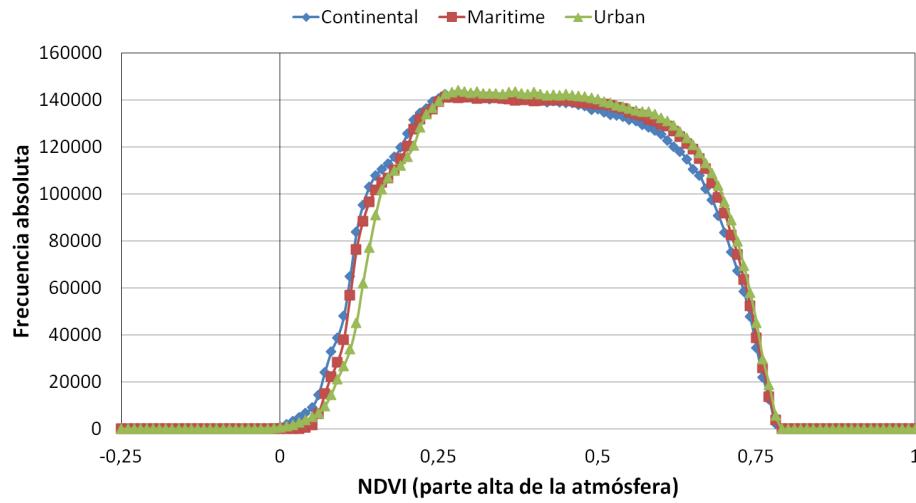


Figura 4.6: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los modelos de aerosoles considerados en el estudio.

**Histogramas de valores del NDVI con el sensor  
MODIS para la concentración de aerosoles  
(visibilidad atmosférica)**

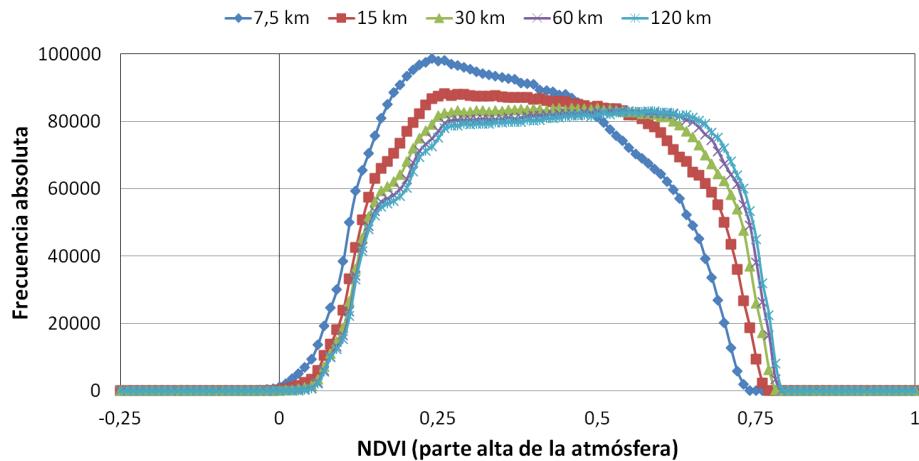


Figura 4.7: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada una de las concentraciones de aerosoles consideradas en el estudio.

**Histogramas de valores del NDVI con el sensor  
MODIS para los ángulos cenitales de iluminación**

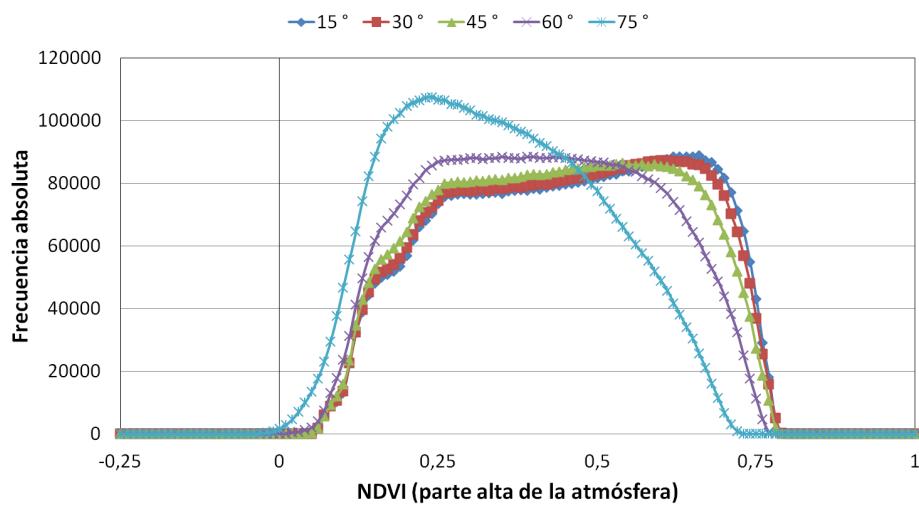


Figura 4.8: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de iluminación considerados en el estudio.

### Histogramas de valores del NDVI con el sensor MODIS para los ángulos cenitales de observación

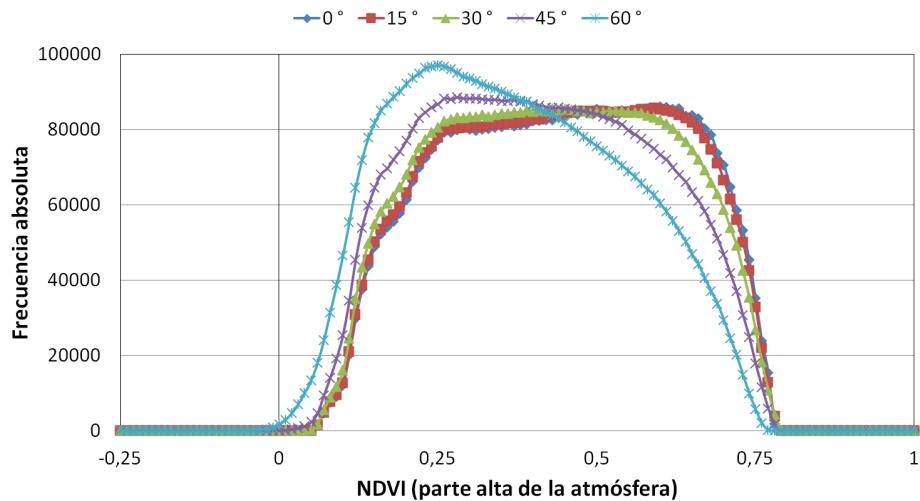


Figura 4.9: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de observación considerados en el estudio.

### Histogramas de valores del NDVI con el sensor MODIS para las diferencias de azimut (observación-iluminación)

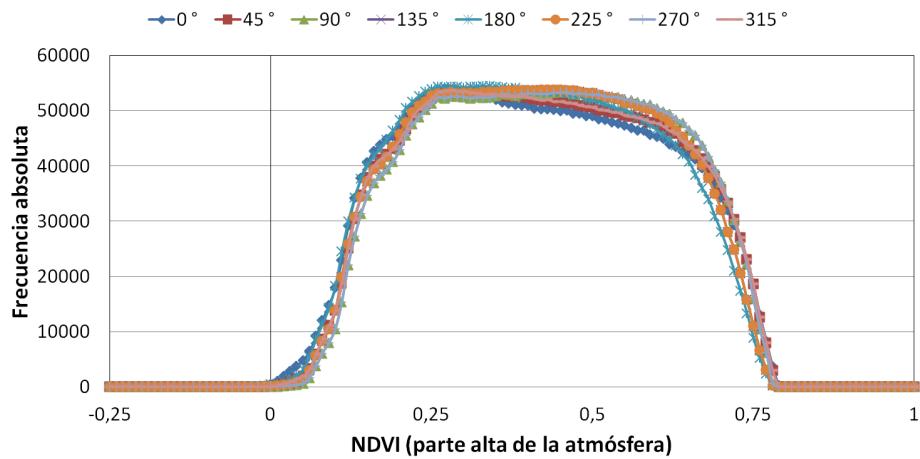


Figura 4.10: Histograma de los valores del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada una de las diferencias de azimut, entre iluminación y observación, consideradas en el estudio.

*NDVI* en el mismo sentido que el observado para la cantidad de aerosoles y el ángulo de iluminación. De nuevo, el índice reduce su valor según crece el ángulo cenital de observación, ya que la distancia recorrida en la atmósfera por la radiación reflejada se incrementa cuando lo hace el ángulo cenital de observación, lo que incrementa el espesor óptico, y por tanto, el efecto de la atmósfera, y en particular de los aerosoles. Como en el caso precedente, el razonamiento se sostiene en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 donde tanto el incremento de la concentración de aerosoles como el incremento de los ángulos cenital de iluminación y observación provocan efectos en el histograma de valores del índice en el mismo sentido.

Para completar el análisis, la figura 4.10 muestra el histograma del *NDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las diferencias de azimut, entre iluminación y observación, considerados en el estudio. La figura señala que la diferencia de azimut impacta muy levemente en el resultado, como se infiere de los histogramas obtenidos. Aunque la geometría azimutal de iluminación-observación es importante en la transferencia radiativa en el domino óptico, el resto de parámetros de las simulaciones lo es en mayor medida, atenuando el efecto del parámetro aquí estudiado.

De todo lo anterior, se concluye que las variaciones del índice de vegetación *NDVI* con la cobertura vegetal, entre las partes alta y baja de la atmósfera, no son en absoluto despreciables. Este comportamiento se relaciona con el efecto aditivo y proporcional de la atmósfera, ya evidenciado en el capítulo 3, la interacción con los espectros de reflectividad de la vegetación y el suelo, así como la longitud de onda central e intervalo espectral de los canales implicados en su cálculo. Como ha quedado patente en este apartado del trabajo, el índice de vegetación *NDVI* es muy inestable frente a todos estos parámetros. Del análisis de los histogramas del *NDVI* se concluye que el principal efecto atmosférico que reduce el valor del *NDVI* es la dispersión atmosférica por aerosoles, que se acrecenta tanto por elevadas concentraciones de aerosoles como por grandes ángulos cenitales de iluminación y observación.

## 4.2. Atmósfera y $P_v$ calculada con el *NDVI*

En este apartado se analiza el efecto de la atmósfera en la cobertura vegetal calculada con el índice *NDVI*. A tal fin, se aplica el método descrito en la sección 2.1 a las ya conocidas muestras del apartado 3.1 y a las simulaciones del apartado 3.2. La  $P_v$  en la parte alta de la atmósfera se compara por diferencia con el correspondiente valor en el suelo, expresándolo como porcentaje de la  $P_v$  en la parte baja de la atmósfera. A continuación, se detallan y comparan los resultados obtenidos, tanto para suelos radiométricamente homogéneos como para los heterogéneos.

#### 4.2.1. Suelo radiométricamente homogéneo

En esta subsección se analiza el efecto de la atmósfera en la  $P_v$  para un suelo radiométricamente homogéneo, es decir, considerando que en cada imagen, desde el punto de vista radiométrico, solo existe un tipo de vegetación y un tipo de suelo desprovisto de vegetación. Como se indica en el apartado 2.7, los resultados se obtienen aplicando el MCV para cada pareja suelo-vegetación. Luego se promedian y se presentan aquí. Cabe recordar que, con esta aproximación, al aplicar el MCV, los diversos suelos y vegetaciones puros no interfieren unos con otros, por lo que los resultados no tienen en cuenta la variabilidad del suelo y la vegetación.

La tabla 4.4 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, como función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico. La tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores, en un suelo radiométricamente homogéneo, para todos los sensores considerados. Por su parte, las figuras 4.11 a 4.13 representan la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , entre las partes alta y baja de la atmósfera.

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	0,4 %	0,4 %	0,5 %
<b>Máximo</b>	7 %	6 %	6 %
<b>Mínimo</b>	-4 %	-4 %	-4 %

Tabla 4.4: Diferencia porcentual en la  $P_v$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

Como la tabla 4.4 y las figuras 4.11 a 4.13 señalan, en el caso de un suelo homogéneo el promedio de diferencia de la  $P_v$  es próximo a cero, mientras que el máximo y mínimo son 7 % y -4 % para el conjunto de sensores. Las diferencias entre sensores son prácticamente indistinguibles tanto en la tabla como en las figuras. Por tanto, en las condiciones reseñadas, no parece darse una dependencia de la diferencia de la  $P_v$  con la sensibilidad espectral de los canales.

A continuación, la tabla 4.5 muestra los cuartiles  $Q1$ ,  $Q2$  y  $Q3$  de la distribución de diferencias de cobertura vegetal en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. De nuevo, se consideran todas las muestras, simulaciones atmosféricas y sensores. La tabla indica que la disminución promedio de la cobertura vegetal es equivalente para todos los sensores estudiados. Por su parte, la distribución de valores promedio se sitúa ligeramente por encima de cero. Las distribuciones de máximos y mínimos

**Efecto de la atmósfera en la  $P_v$  (AVHRR) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente homogéneo**

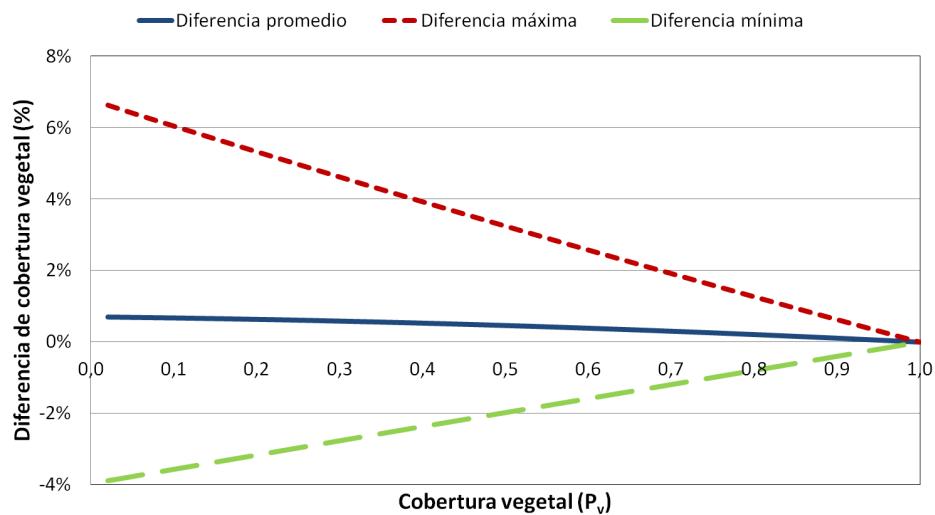


Figura 4.11: Diferencia porcentual en la  $P_v$  por el efecto atmosférico para el sensor *AVHRR* y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

**Efecto de la atmósfera en la  $P_v$  (MODIS) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente homogéneo**

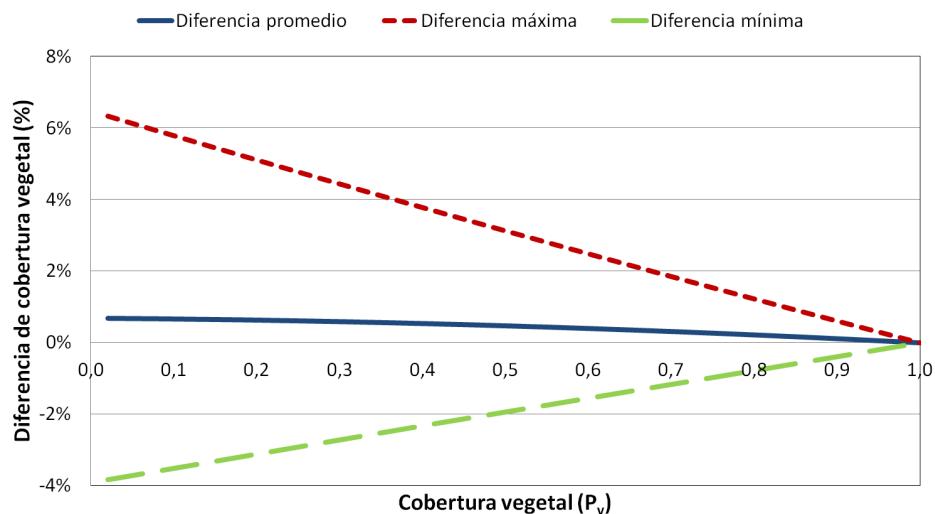


Figura 4.12: Diferencia porcentual en la  $P_v$  por el efecto atmosférico para el sensor *MODIS* y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

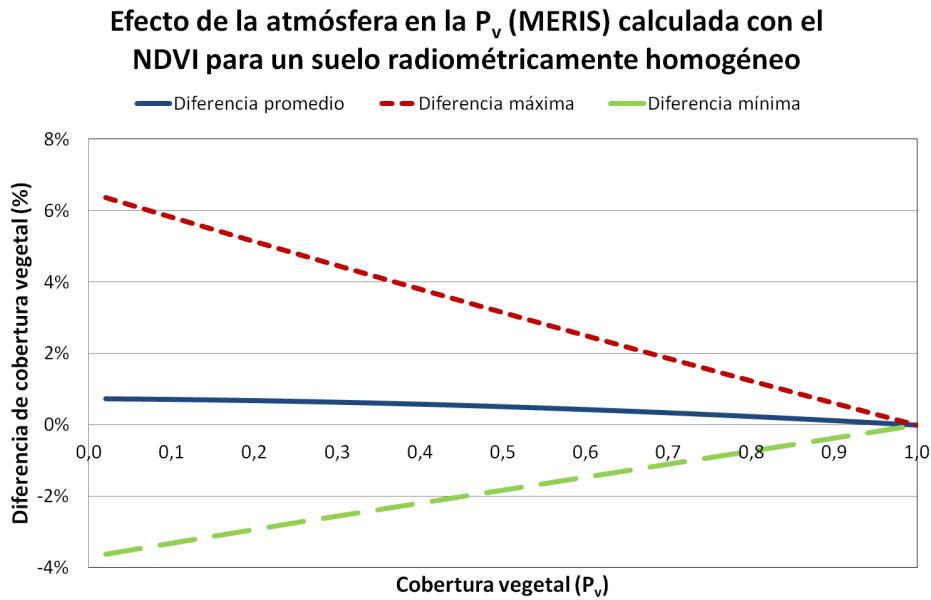


Figura 4.13: Diferencia porcentual en la  $P_v$  por el efecto atmosférico para el sensor *MERIS* y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

son bastante simétricas, como se deduce de la distancia entre los cuartiles  $Q_1$  y  $Q_3$  al cuartil  $Q_2$ , para todos los sensores.

Seguidamente, la tabla 4.6 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, clasificada en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. La tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores, en suelo radiométricamente homogéneo, para cada intervalo de la  $P_v$ . La tabla muestra que los resultados son comparables para los tres sensores. El mayor decremento en el promedio de cobertura vegetal es positivo y se produce para una baja  $P_v$ . Además, esta magnitud presenta un decrecimiento monótono con la  $P_v$  hasta prácticamente anularse. Los valores máximos son todos positivos, mientras que los mínimos son negativos. El rango entre el máximo y el mínimo se reduce según se incrementa la  $P_v$ .

En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, se concluye que las variaciones de la cobertura vegetal por efecto de la atmósfera no son muy importantes en general, pero sí se observa una dependencia con la  $P_v$ . El impacto se reduce según crece la cobertura vegetal. Este comportamiento está relacionado con el efecto aditivo y proporcional de la atmósfera y con la interacción con los espectros de reflectividad de la vegetación y el suelo. En esta subsección, se concluye que la  $P_v$ , para un suelo radiométricamente homogéneo, es bastante estable frente al efecto atmosférico.

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)				
	AVHRR	MODIS	MERIS	
<b>Promedio</b>	$Q_1$ 0,3 %	0,3 %	0,3 %	
	$Q_2$ 0,5 %	0,5 %	0,5 %	
	$Q_3$ 0,6 %	0,6 %	0,7 %	
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 1,6 %	1,6 %	1,5 %	
	$Q_2$ 3 %	3 %	3 %	
	$Q_3$ 5 %	5 %	5 %	
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -3 %	-3 %	-3 %	
	$Q_2$ -1,9 %	-1,9 %	-1,8 %	
	$Q_3$ -1,0 %	-1,0 %	-0,9 %	

Tabla 4.5: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>AVHRR</b>					
<b>Promedio</b>	0,7 %	0,6 %	0,5 %	0,3 %	0,10 %
<b>Máximo</b>	7 %	5 %	4 %	2 %	1,2 %
<b>Mínimo</b>	-4 %	-3 %	-2 %	-1,5 %	-0,7 %
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	0,7 %	0,6 %	0,5 %	0,3 %	0,10 %
<b>Máximo</b>	6 %	5 %	4 %	2 %	1,1 %
<b>Mínimo</b>	-4 %	-3 %	-2 %	-1,5 %	-0,7 %
<b>MERIS</b>					
<b>Promedio</b>	0,7 %	0,6 %	0,5 %	0,3 %	0,11 %
<b>Máximo</b>	6 %	5 %	4 %	2 %	1,1 %
<b>Mínimo</b>	-4 %	-3 %	-2 %	-1,4 %	-0,7 %

Tabla 4.6: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $P_v$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

#### 4.2.2. Suelo radiométricamente heterogéneo

Para completar el análisis previo, en esta subsección se detalla el efecto de la atmósfera en la  $P_v$  para un suelo radiométricamente heterogéneo y, por tanto, considerando que las imágenes, desde el punto de vista radiométrico, contienen todas las vegetaciones y suelos desprovistos de vegetación considerados en esta Tesis. Atendiendo a la metodología del MCV, solo un suelo y una vegetación puros son elegidos como tales en la imagen. Por tanto, en este caso los resultados darán cuenta tanto del efecto de la variabilidad en suelo y vegetación como del efecto de la atmósfera.

La tabla 4.7 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. Las figuras y la tabla comparan, en un suelo radiométricamente heterogéneo, los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores. Por otro lado, las figuras 4.14 a 4.16 representan la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , entre las partes alta y baja de la atmósfera para todas las muestras y simulaciones.

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	68 %	67 %	66 %
<b>Máximo</b>	1982 %	1975 %	1912 %
<b>Mínimo</b>	-58 %	-57 %	-49 %

Tabla 4.7: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

Como puede observarse en la tabla 4.7 y en las figuras 4.14 a 4.16, en el caso de un suelo heterogéneo y para todos los sensores, el promedio de la diferencia de la  $P_v$  es superior al 65 %, el máximo es próximo al 2000 % y el mínimo es del orden del -50 %. Estas diferencias, en particular el máximo, son muy grandes. Esto es debido a que la referencia, el valor en la parte baja de la atmósfera, incluye la  $P_v$  en el intervalo [0,1], y pequeñas diferencias de la  $P_v$  se transforman en grandes porcentajes cuando la  $P_v$  es proxima a cero. Estos valores son mucho mayores que en el caso de un suelo homogéneo, en el subapartado 4.2.1. Los resultados para los tres sensores se pueden considerar equivalentes, pero se observa una tenue tendencia a la reducción de la distancia entre el máximo y el mínimo, según se reduce el intervalo espectral del canal, siendo mínima por tanto para el MERIS.

A continuación, la tabla 4.8 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , para las

**Efecto de la atmósfera en la  $P_v$  (AVHRR) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente heterogéneo**

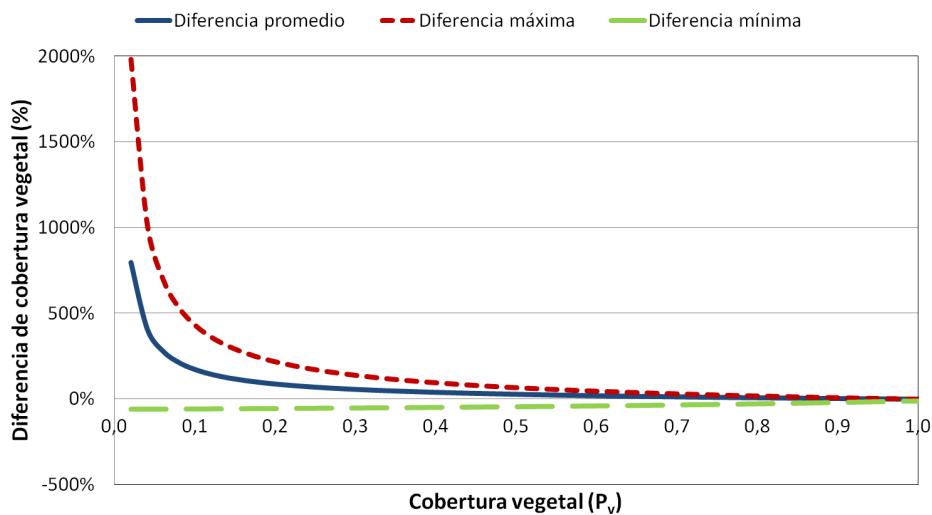


Figura 4.14: Diferencia porcentual en la  $P_v$  por el efecto atmosférico para el sensor *AVHRR* y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

**Efecto de la atmósfera en la  $P_v$  (MODIS) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente heterogéneo**

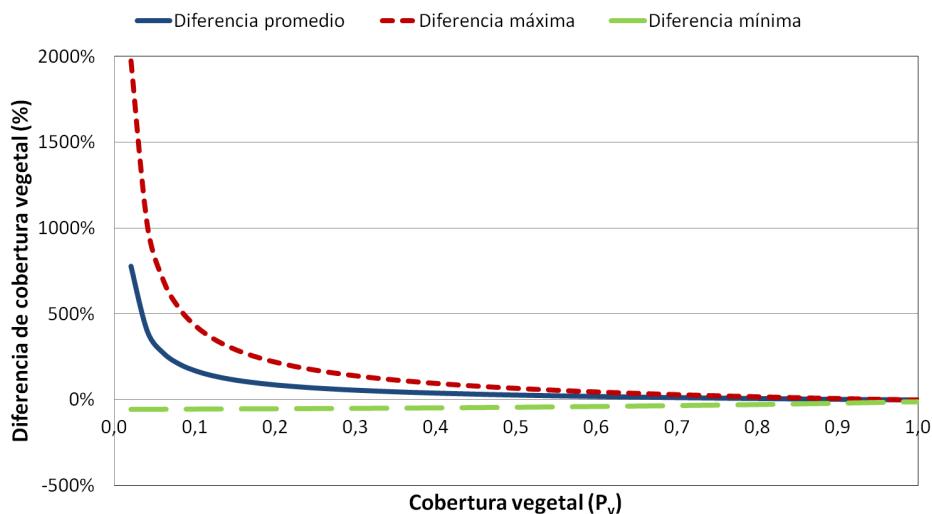


Figura 4.15: Diferencia porcentual en la  $P_v$  por el efecto atmosférico para el sensor *MODIS* y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

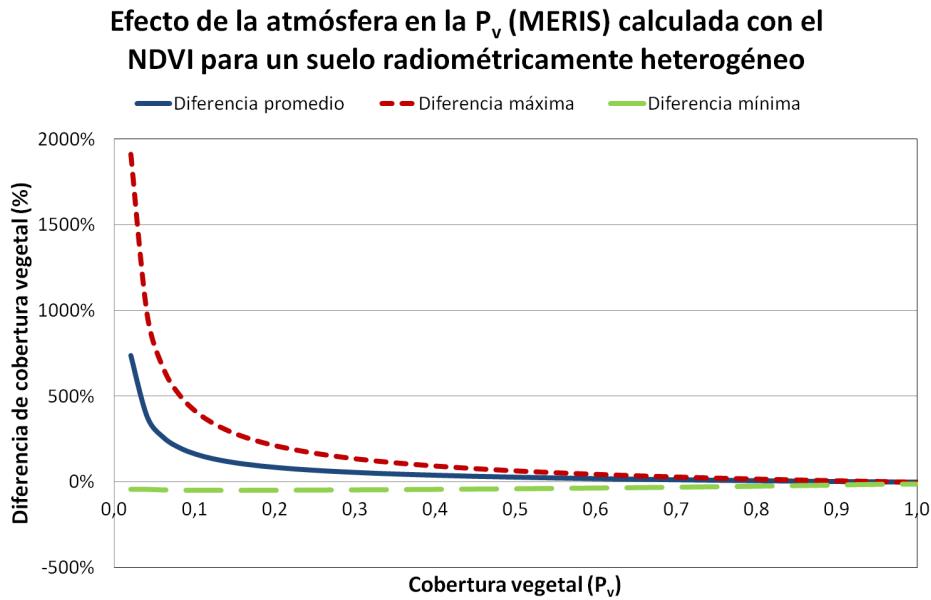


Figura 4.16: Diferencia porcentual en la  $P_v$  por el efecto atmosférico para el sensor *MERIS* y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

magnitudes promedio, máximo y mínimo. Se considera el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores en el caso de un suelo radiométricamente heterogéneo. La tabla recoge unas variaciones de la  $P_v$  mucho mayores que en el subapartado 4.2.1. La disminución de la cobertura vegetal es equivalente para los tres sensores, especialmente para la distribución de valores promedio. Respecto a la distribución de máximos y mínimos, se aprecia una suave reducción del intervalo de las distribuciones según se reduce el intervalo espectral del canal. La tabla muestra que se sitúan centrados ligeramente por encima de cero respecto a la distribución de valores promedio. Las distribuciones de máximos y mínimos son bastante simétricas, dada la distancia entre los cuartiles  $Q_1$  y  $Q_3$ , al cuartil central  $Q_2$ , para todos los sensores.

Seguidamente, la tabla 4.9 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, clasificada en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores, en un suelo radiométricamente heterogéneo, para cada intervalo de la  $P_v$ . La tabla ofrece resultados comparables para los tres sensores. El mayor decremento en el promedio de cobertura vegetal es positivo, del orden del 250 %, y se produce para una baja  $P_v$ . Esta magnitud decrece monótonamente con la  $P_v$  hasta prácticamente anularse a máxima cobertura vegetal. Los valores máximos

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	$Q_1$ 9 %	9 %	10 %
	$Q_2$ 26 %	26 %	27 %
	$Q_3$ 64 %	64 %	64 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 24 %	24 %	23 %
	$Q_2$ 65 %	65 %	64 %
	$Q_3$ 161 %	162 %	158 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -53 %	-52 %	-46 %
	$Q_2$ -44 %	-44 %	-39 %
	$Q_3$ -32 %	-32 %	-27 %

Tabla 4.8: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

$\Delta NDVI$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>AVHRR</b>					
<b>Promedio</b>	257 %	59 %	27 %	12 %	1,8 %
<b>Máximo</b>	1982 %	214 %	93 %	44 %	17 %
<b>Mínimo</b>	-58 %	-55 %	-48 %	-40 %	-28 %
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	252 %	59 %	28 %	12 %	2 %
<b>Máximo</b>	1975 %	216 %	94 %	45 %	17 %
<b>Mínimo</b>	-57 %	-54 %	-48 %	-40 %	-28 %
<b>MERIS</b>					
<b>Promedio</b>	243 %	59 %	29 %	13 %	3 %
<b>Máximo</b>	1912 %	209 %	91 %	44 %	16 %
<b>Mínimo</b>	-49 %	-48 %	-43 %	-35 %	-23 %

Tabla 4.9: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $P_v$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

son todos positivos, mientras que los mínimos son negativos. El rango entre máximo y mínimo se acorta según se incrementa la cobertura vegetal, especialmente por la gran reducción de los máximos con la  $P_v$ .

Contrariamente a la subsección anterior, ahora se concluye que las variaciones de la cobertura vegetal son muy importantes. Se observa también una dependencia con la cobertura vegetal, reduciéndose las diferencias según crece la  $P_v$ . De nuevo, este comportamiento está relacionado con el efecto aditivo y proporcional de la atmósfera, y la interacción con los espectros de reflectividad de la vegetación y el suelo. Como se ha visto en esta subsección, se concluye que la  $P_v$ , para un suelo radiométricamente heterogéneo, es bastante inestable frente a la atmósfera y la cobertura vegetal.

### 4.3. Atmósfera y $\epsilon$ calculada con el *NDVI*

En este apartado se analiza, análogamente al anterior, el efecto de la atmósfera en la emisividad térmica calculada con la  $P_v$  obtenida a partir del índice *NDVI*. Con este propósito, se aplica de nuevo el método de la sección 2.1 a las muestras y simulaciones ya descritas previamente. La  $\epsilon$  en la parte alta de la atmósfera se compara por diferencia con el correspondiente valor en el suelo, expresándolo como porcentaje de la  $\epsilon$  en la parte baja de la atmósfera. Siguiendo el esquema del apartado anterior, se detallan y comparan los resultados obtenidos tanto para suelos radiométricamente homogéneos como para los heterogéneos.

#### 4.3.1. Suelo radiométricamente homogéneo

En esta subsección, se analiza el efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  para un suelo radiométricamente homogéneo. La tabla 4.10 y las figuras 4.17 a 4.19 muestran la diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , en función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores para todos los sensores y un suelo radiométricamente homogéneo.

Como puede deducirse de la tabla 4.10 y de las figuras 4.17 a 4.19, en el caso de un suelo homogéneo, el promedio de diferencia de la  $\epsilon$  es próximo a cero, mientras que el máximo y mínimo es 0,15 % y -0,09 % para el conjunto de sensores. Esta variación en la emisividad implica, según Becker (1987), una variación en la temperatura de entre +0,07 K y -0,04 K. Las diferencias de  $\epsilon$  entre los tres sensores son prácticamente indistinguibles en la tabla, donde los resultados están en cifras significativas. Por tanto, de las gráficas no se deduce una dependencia de la  $\epsilon$  con la sensibilidad espectral.

A continuación, la tabla 4.11 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$  en función de la  $P_v$  para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. Se considera el efecto atmosférico para todas

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	0,008 %	0,008 %	0,008 %
<b>Máximo</b>	0,15 %	0,14 %	0,14 %
<b>Mínimo</b>	-0,09 %	-0,09 %	-0,08 %

Tabla 4.10: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

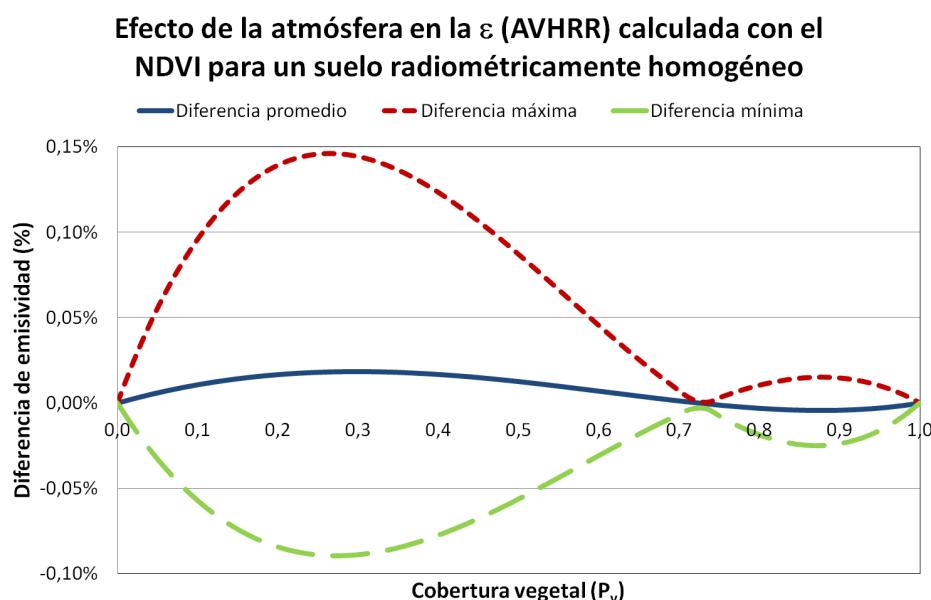


Figura 4.17: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  por el efecto atmosférico para el sensor  $AVHRR$  y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

**Efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  (MODIS) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente homogéneo**

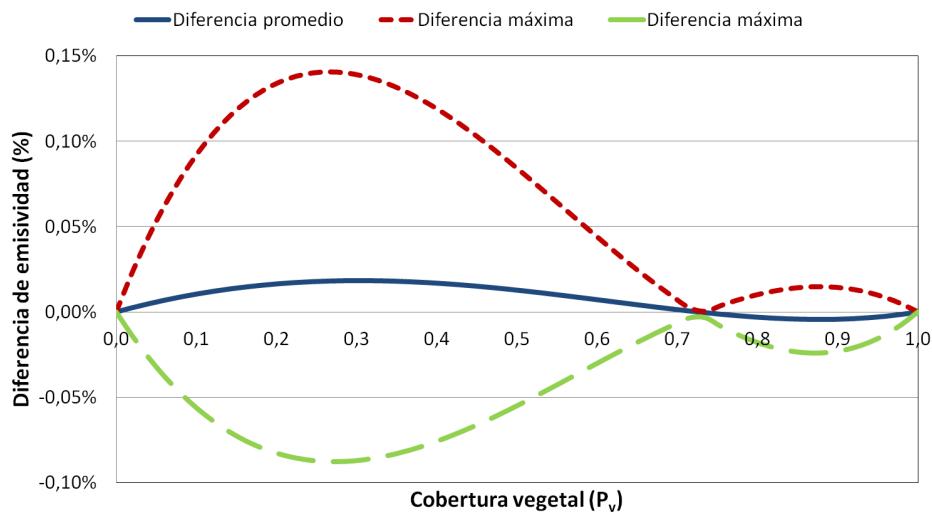


Figura 4.18: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  por el efecto atmosférico para el sensor *MODIS* y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

**Efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  (MERIS) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente homogéneo**

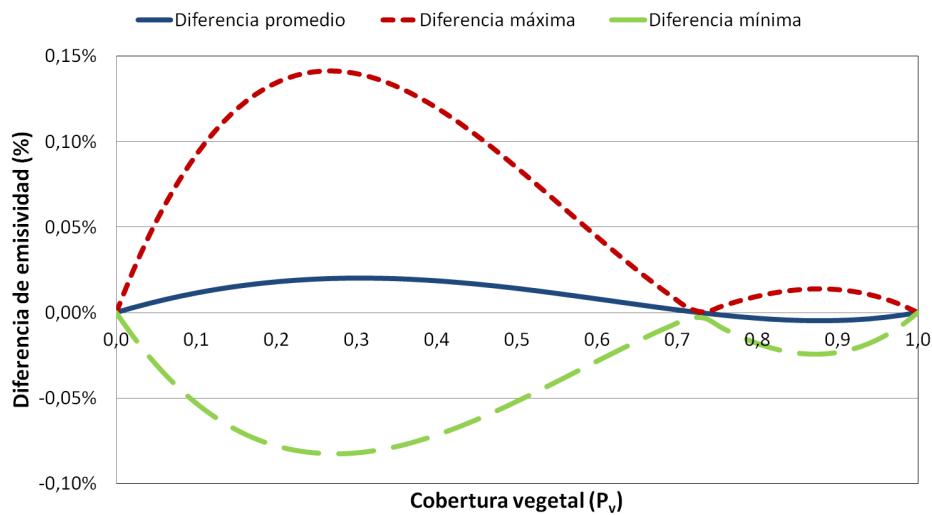


Figura 4.19: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  por el efecto atmosférico para el sensor *MERIS* y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

las muestras, simulaciones y sensores para un suelo radiométricamente homogéneo. La tabla indica que la disminución promedio de la emisividad térmica es equivalente para todos los sensores. La distribución de valores promedio se centra ligeramente por encima de cero. Las distribuciones de máximos y mínimos son bastante simétricas, por la distancia entre los cuartiles  $Q_1$  y  $Q_3$  al valor del cuartil  $Q_2$ , para los tres sensores. La distribución de valores máximos se centra por encima de cero, mientras que la de mínimos lo hace por debajo de cero.

<b><math>\Delta\epsilon</math> - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)</b>			
	<b>AVHRR</b>	<b>MODIS</b>	<b>MERIS</b>
<b>Promedio</b>	$Q_1$ −0,0004 %	−0,0004 %	−0,0005 %
	$Q_2$ 0,009 %	0,009 %	0,010 %
	$Q_3$ 0,016 %	0,016 %	0,017 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 0,014 %	0,014 %	0,0131 %
	$Q_2$ 0,07 %	0,06 %	0,06 %
	$Q_3$ 0,12 %	0,12 %	0,12 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ −0,08 %	−0,07 %	−0,07 %
	$Q_2$ −0,04 %	−0,04 %	−0,04 %
	$Q_3$ −0,019 %	−0,018 %	−0,018 %

Tabla 4.11: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

Seguidamente, la tabla 4.12 indica la diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , clasificado en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. La tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores para cada intervalo de la  $P_v$  en un suelo radiométricamente homogéneo. De la tabla se deduce que los resultados son comparables para los tres sensores. Las variaciones de la  $\epsilon$  promedio son positivas, excepto a alta cobertura vegetal, donde se convierte en negativa. Por su parte, los máximos son todos positivos, mientras que los mínimos son todos negativos. La diferencia entre máximos y mínimos es aproximadamente constante con la  $P_v$  hasta coberturas medias, y se reduce considerablemente para las  $P_v$  elevadas. Este comportamiento ya se evidencia en las figuras 4.17 a 4.19. Su forma es resultado del modelo que relaciona emisividad con cobertura vegetal, representado en la figura 2.1. Así, el máximo de la figura 2.1, ubicado aproximadamente en el 70 %, comporta un punto de inflexión y paso por el origen de las figuras.

En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, se concluye que las variaciones de la emisividad térmica son poco importantes en general, puesto

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>AVHRR</b>					
<b>Promedio</b>	0,010 %	0,018 %	0,012 %	0,0013 %	-0,003 %
<b>Máximo</b>	0,14 %	0,15 %	0,12 %	0,04 %	0,02 %
<b>Mínimo</b>	-0,08 %	-0,09 %	-0,08 %	-0,03 %	-0,02 %
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	0,010 %	0,018 %	0,012 %	0,0014 %	-0,003 %
<b>Máximo</b>	0,13 %	0,14 %	0,12 %	0,04 %	0,015 %
<b>Mínimo</b>	-0,08 %	-0,09 %	-0,07 %	-0,03 %	-0,02 %
<b>MERIS</b>					
<b>Promedio</b>	0,011 %	0,019 %	0,014 %	0,0015 %	-0,004 %
<b>Máximo</b>	0,13 %	0,14 %	0,12 %	0,04 %	0,014 %
<b>Mínimo</b>	-0,08 %	-0,08 %	-0,07 %	-0,03 %	-0,02 %

Tabla 4.12: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal,  $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $\epsilon$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

que generan variaciones en temperatura inferiores a la décima de kelvin. Adicionalmente, existe una dependencia con la cobertura vegetal, reduciéndose para valores de la  $P_v$  de la categoría alta y muy alta. Este comportamiento está relacionado con el de la  $P_v$  descrito en el subapartado 4.2.1 y la dependencia entre la  $\epsilon$  y la  $P_v$  descrita en el apartado 2.1. En esta subsección se concluye que la emisividad térmica, para un suelo radiométricamente homogéneo, es bastante estable frente a la atmósfera, como también lo era la cobertura vegetal.

### 4.3.2. Suelo radiométricamente heterogéneo

En esta subsección se analiza el efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  para un suelo radiométricamente heterogéneo. Este cálculo se realiza según se describe en la sección 2.1 atendiendo a lo descrito en la sección 2.7.

La tabla 4.13 y las figuras 4.20 a 4.22 muestran la diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , en función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. La tabla compara, para un suelo radiométricamente heterogéneo, los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores.

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	0,7 %	0,7 %	0,7 %
<b>Máximo</b>	5 %	5 %	5 %
<b>Mínimo</b>	-2 %	-2 %	-1,7 %

Tabla 4.13: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

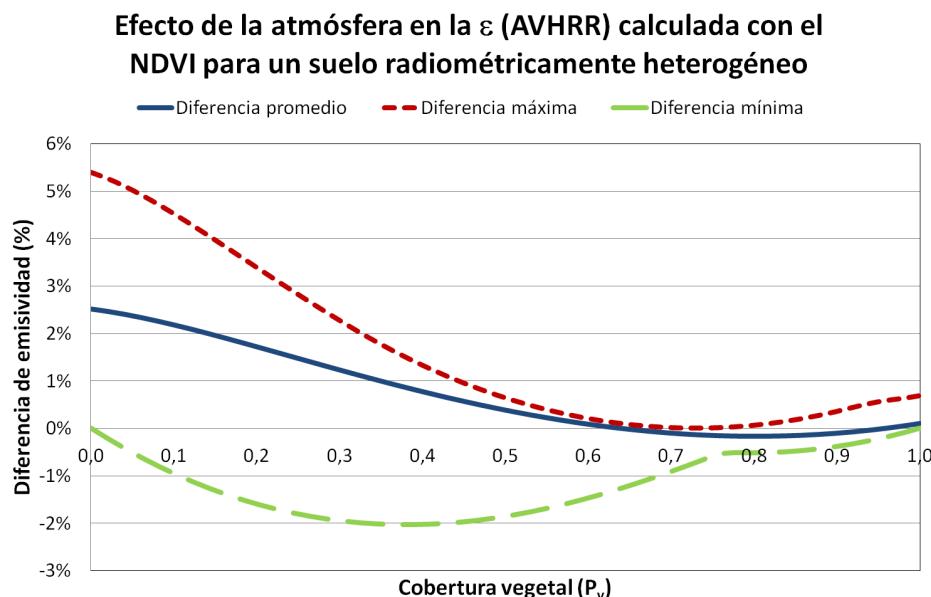


Figura 4.20: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  por el efecto atmosférico para el sensor *AVHRR* y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

**Efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  (MODIS) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente heterogéneo**

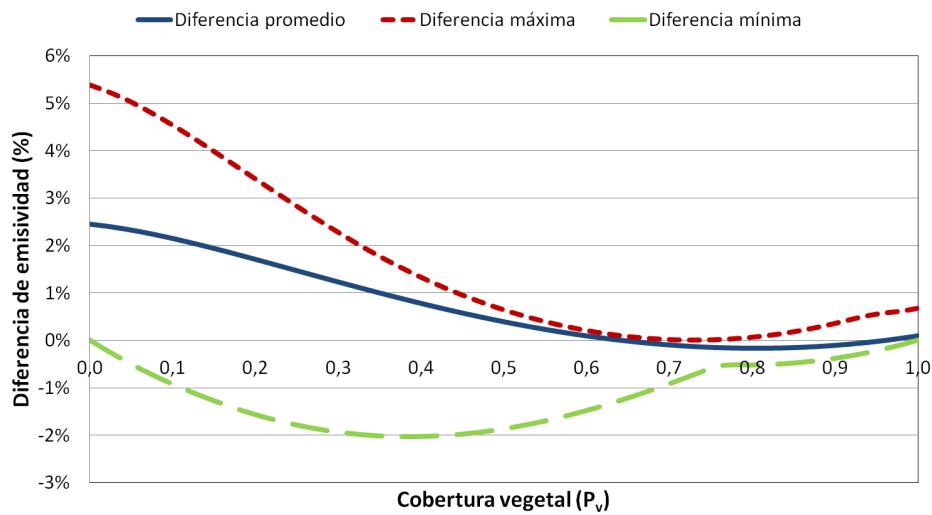


Figura 4.21: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  por el efecto atmosférico para el sensor *MODIS* y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

**Efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  (MERIS) calculada con el NDVI para un suelo radiométricamente heterogéneo**

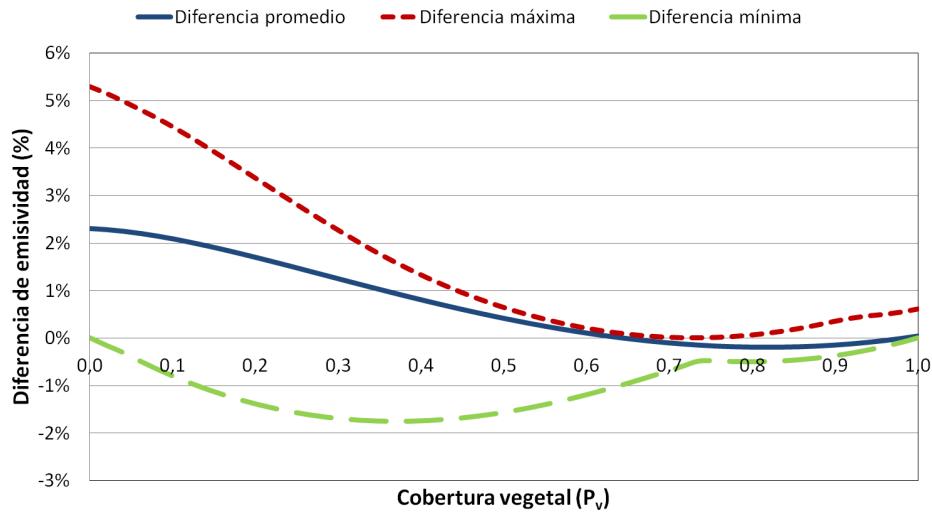


Figura 4.22: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  por el efecto atmosférico para el sensor *MERIS* y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

Como muestran la tabla 4.13 y las figuras 4.20 a 4.22, en el caso de un suelo heterogéneo y para todos los sensores, el promedio de diferencia de la  $\epsilon$  es del orden del 0,7 %, el máximo del 5 % y el mínimo es del orden del -2 %. Estos valores son mucho mayores que en el caso de un suelo homogéneo del subapartado 4.3.1. Esta variación en la emisividad implica, según Becker (1987), una variación en la temperatura entre +2,5 K y -1,0 K. Como en el caso del análisis de la  $P_v$ , los resultados para los tres sensores se pueden tomar como equivalentes, pero se observa una mínima tendencia a la reducción de la distancia entre máximo y mínimo según se reduce el intervalo espectral del canal. En este caso, las figuras 4.20 a 4.22 difieren de las de la subsección anterior debido a que ahora se considera una sola muestra de suelo como suelo desprovisto de vegetación. Así, el resto de muestras con escasa cobertura vegetal altera sustancialmente el resultado. Debido a este efecto, ya se intuye que, en este caso, los resultados estarán muy condicionados por la variabilidad radiométrica del suelo.

A continuación, la tabla 4.14 muestra los cuartiles  $Q1$ ,  $Q2$  y  $Q3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$  en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. Se considera el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones, así como los tres sensores, para un suelo radiométricamente heterogéneo. La tabla apunta unos valores de variación de la emisividad térmica  $\epsilon$  mucho mayores que en el subapartado 4.3.1. La variación de la emisividad es equivalente para los tres sensores, especialmente para la distribución de valores  $P_v$  promedio. Respecto a la distribución de máximos y mínimos, se aprecia una tenue compactación de las distribuciones según se reduce el intervalo espectral del canal, lo mismo que sucedía con la  $P_v$ .

Seguidamente, la tabla 4.15 muestra la diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , clasificada en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores para los tres sensores, para cada intervalo de la  $P_v$  en un suelo radiométricamente heterogéneo. Tal como muestra la tabla, los resultados son comparables para los tres sensores. El mayor incremento en el promedio de emisividad es positivo, del orden del 2 %, y se produce para una baja  $P_v$ . Esta magnitud decrece monótonamente con la  $P_v$  hasta prácticamente anularse a máxima cobertura vegetal, como hacía también la  $P_v$ . Los valores máximos son todos positivos y decrecen monótonamente con la  $P_v$  como los valores promedio. Mientras que los mínimos son negativos y de valor aproximadamente constante entre muy poca  $P_v$  y valores medios de cobertura vegetal, a partir de una alta  $P_v$  el valor de la emisividad se aproxima hacia cero. Por tanto, el intervalo entre máximo y mínimo de la  $\epsilon$  se acorta según se incrementa la cobertura vegetal, especialmente por la gran reducción de los mínimos con la  $P_v$ .

En este subapartado se concluye que las variaciones de la emisividad

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	$Q_1$ 0,4 %	-0,06 %	-0,09 %
	$Q_2$ 1,4 %	0,4 %	0,4 %
	$Q_3$ 1,4 %	1,4 %	1,4 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 0,7 %	0,19 %	0,19 %
	$Q_2$ 3 %	0,7 %	0,6 %
	$Q_3$ 3 %	3 %	3 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -1,2 %	-1,8 %	-1,6 %
	$Q_2$ -0,5 %	-1,2 %	-1,0 %
	$Q_3$ -0,5 %	-0,5 %	-0,5 %

Tabla 4.14: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

térmica son importantes en general, ya que producen variaciones en la temperatura del orden de varios kelvin. Además, existe una dependencia con la cobertura vegetal, reduciéndose las diferencias de la emisividad para valores de la  $P_v$  altos y muy altos. Este comportamiento está relacionado con el comportamiento de la  $P_v$  descrito en el apartado 4.2.2 y con la dependencia entre la  $\epsilon$  y la  $P_v$  descrita en el apartado 2.1. En esta subsección se concluye que la emisividad térmica para un suelo radiométricamente heterogéneo presenta importantes variaciones al considerar el efecto atmosférico.

#### 4.4. Efecto del suelo en la $P_v$ y la $\epsilon$ calculadas con *NDVI*

En los apartados precedentes, se concluye que las variaciones de cobertura vegetal y emisividad son poco importantes para el caso de un suelo radiométricamente homogéneo. Sin embargo, se concluye que las variaciones de la  $P_v$  y la  $\epsilon$  son muy importantes para el caso de un suelo radiométricamente heterogéneo. En este apartado se profundiza en el caso de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera, para estudiar qué parte de las discrepancias previamente obtenidas en el caso heterogéneo puede atribuirse a la variabilidad del suelo. Para esto se aplica el método de la sección 2.1, pero solo a las muestras y sin considerar la atmósfera.

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>AVHRR</b>					
<b>Promedio</b>	2 %	1,3 %	0,4 %	-0,08 %	-0,06 %
<b>Máximo</b>	5 %	3 %	1,3 %	0,17 %	0,7 %
<b>Mínimo</b>	-1,5 %	-2 %	-2 %	-1,4 %	-0,5 %
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	2 %	1,3 %	0,4 %	-0,08 %	-0,07 %
<b>Máximo</b>	5 %	3 %	1,3 %	0,17 %	0,7 %
<b>Mínimo</b>	-1,5 %	-2 %	-2 %	-1,4 %	-0,5 %
<b>MERIS</b>					
<b>Promedio</b>	2 %	1,3 %	0,4 %	-0,08 %	-0,11 %
<b>Máximo</b>	5 %	3 %	1,3 %	0,17 %	0,06 %
<b>Mínimo</b>	-1,3 %	-1,7 %	-1,7 %	-1,1 %	-0,5 %

Tabla 4.15: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal,  $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $\epsilon$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

#### 4.4.1. Suelo y $P_v$ calculada con el $NDVI$

Para empezar, en este subapartado se analiza el efecto en la determinación de la cobertura vegetal a partir del índice  $NDVI$ . Para ello se estudia el efecto de un suelo heterogéneo, sin considerar la atmósfera, en la variación de la cobertura vegetal, para los tres sensores. La tabla presenta los valores promedio, máximo, mínimo y los tres cuartiles Q1, Q2 y Q3, para cada sensor y magnitud.

Como se observa en la tabla 4.16 y en la figura 4.23, para los tres sensores, las diferencias promedio de cobertura vegetal son positivas y próximas al 100 %, mientras que los máximos son del orden del 2200 % y los mínimos son del orden del -5 %. Como sucedía en el subapartado 4.2.2, estas diferencias, en particular el máximo, son muy grandes porcentualmente. Esto sucede porque la referencia, el valor en la parte baja de la atmósfera, incluye  $P_v$  próximas a cero, y pequeñas diferencias de  $P_v$  se transforman en grandes cuando la  $P_v$  es muy pequeña.

Como en apartados anteriores, se aprecia una ligera dependencia que tiende a reducir las diferencias en valor absoluto y reducir la anchura de la distribución de diferencias según se reduce el intervalopectral del canal.

$\Delta P_v$ - Efecto del suelo heterogéneo			
	AVHRR	MODIS	MERIS
<b>Promedio</b>	104 %	97 %	87 %
<b>Máximo</b>	2423 %	2266 %	2080 %
<b>Mínimo</b>	-5 %	-5 %	-4 %
$Q_1$	7 %	6 %	6 %
$Q_2$	29 %	28 %	26 %
$Q_3$	89 %	84 %	76 %

Tabla 4.16: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

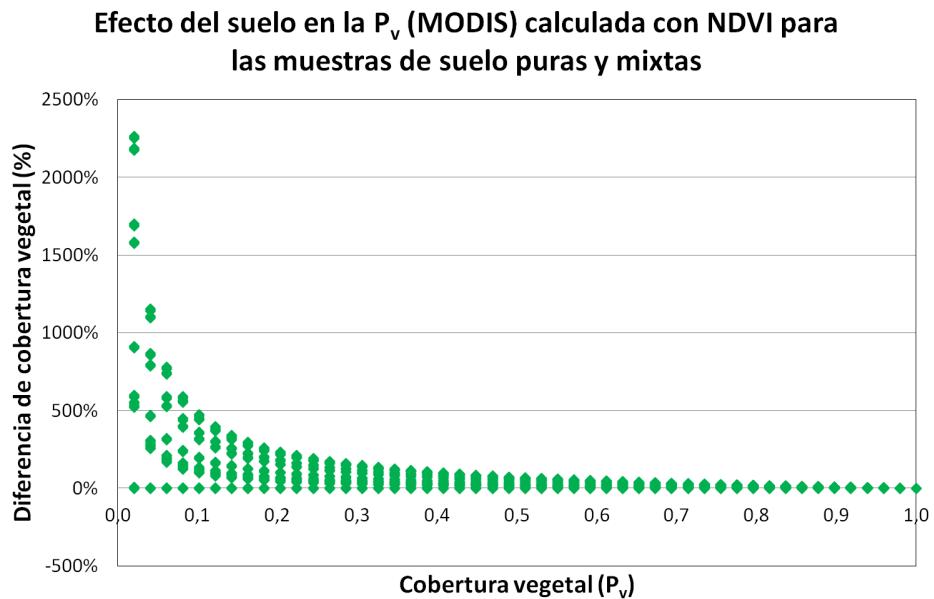


Figura 4.23: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , calculada con el *NDVI* por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal.

Los valores de los cuartiles muestran la misma dependencia con el intervalo espectral del canal y el sentido general del promedio, máximo y mínimo. Sin embargo, los valores absolutos de las diferencias son en este caso más moderados, lo que indica la presencia de muchos más valores extremos en los cálculos de este subapartado que en los de los anteriores. Este fenómeno se justifica por la diferencia de la muestra analizada, que ahora se reduce considerablemente.

Los resultados de los apartados 4.2.1, 4.2.2 y éste mismo, 4.4.1, permiten concluir que la cobertura vegetal es poco sensible a la atmósfera, pero muy sensible a la radiometría del suelo. Este fenómeno se aprecia tanto por el valor de las diferencias de la  $P_v$  en los tres apartados como por la dependencia con la  $P_v$  de los resultados por categorías de los apartados 4.2.1 y 4.2.2.

#### 4.4.2. Suelo y $\epsilon$ calculada con el $NDVI$

Para completar los cálculos del subapartado anterior, y análogamente al apartado precedente, en éste se analiza el resultado de procesar las muestras mixtas de suelo, sin aplicar el efecto de la atmósfera, para calcular las variaciones de la  $\epsilon$ , a partir de la  $P_v$  calculada con el  $NDVI$  en las condiciones especificadas en el subapartado anterior.

<b><math>\Delta\epsilon</math> - Efecto del suelo heterogéneo</b>			
	<b>AVHRR</b>	<b>MODIS</b>	<b>MERIS</b>
<b>Promedio</b>	0,9 %	0,9 %	0,8 %
<b>Máximo</b>	6 %	6 %	6 %
<b>Mínimo</b>	-0,6 %	-0,6 %	-0,5 %
$Q_1$	-0,08 %	-0,07 %	-0,06 %
$Q_2$	0,3 %	0,3 %	0,2 %
$Q_3$	1,7 %	1,6 %	1,4 %

Tabla 4.17: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

Como se deduce de la tabla 4.17 y de la figura 4.24, para los tres sensores, las diferencias promedio de la emisividad térmica  $\epsilon$  son positivas y próximas al 0,9 %, mientras que los máximos son del 6 % y los mínimos son del orden del -0,6 %. Esta variación en la emisividad implica, según Becker (1987), una variación en la temperatura de entre +3 K y -0,3 K. Como en apartados anteriores, se aprecia una ligera dependencia que tiende a reducir las diferencias en valor absoluto y a reducir la anchura de la distribución de las diferencias según se reduce el intervalo espectral del canal. Los valores de

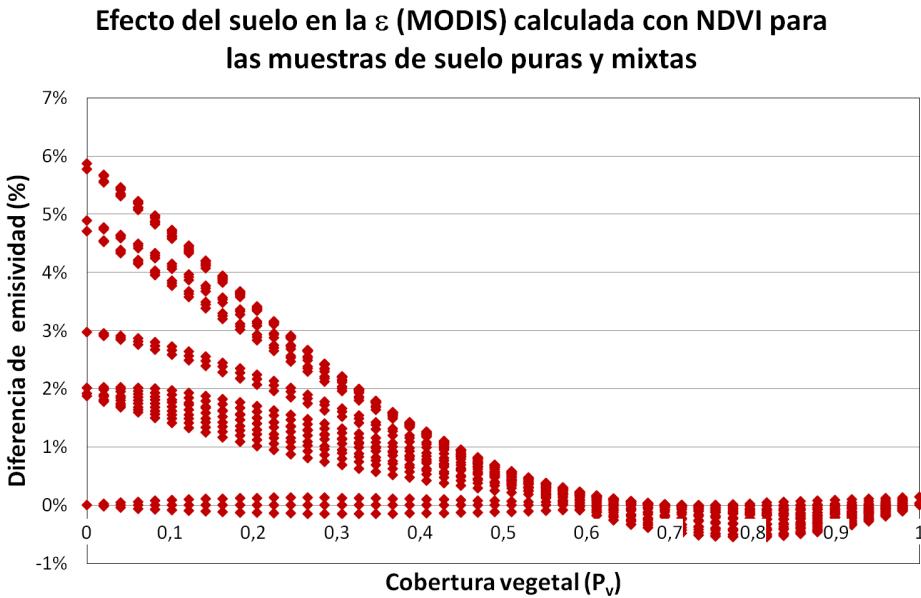


Figura 4.24: Diferencia porcentual en la emisividad,  $\epsilon$ , calculada con el *NDVI* por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal.

los cuartiles muestran la misma dependencia con el intervalo espectral del canal y el sentido general del promedio, máximo y mínimo. Sin embargo, los valores absolutos de las diferencias son en este caso más moderados, lo que indica la presencia de muchos más valores extremos en este apartado que en los anteriores. Este fenómeno se justifica, como en la subsección anterior, por la diferencia de muestra analizada. Todos estos comportamientos de la  $\epsilon$  son equivalentes a los que se observan en el subapartado 4.4.1 para la cobertura vegetal.

Análogamente a los resultados del subapartado 4.4.1, el análisis de los resultados de los subapartados 4.3.1, 4.3.2 y este mismo señala que la emisividad térmica es poco sensible a la atmósfera, pero muy sensible al suelo. Este fenómeno se aprecia tanto por el valor de las diferencias de emisividad en los tres apartados como en la dependencia con la  $P_v$  de los resultados por categorías de la  $P_v$  en los apartados 4.3.1 y 4.3.2.

## Capítulo 5

# Resultados con IV alternativo

**RESUMEN:** En este capítulo finaliza el análisis de los resultados de la Tesis. Los resultados del apartado anterior evidencian una dependencia de la emisividad, calculada con el MCV, con la radiometría del suelo. Así, y para cumplir con el objetivo del trabajo, se plantean alternativas al índice *NDVI* que permitan reducir la sensibilidad del suelo y de la atmósfera. El estudio del apartado anterior, que analizaba el efecto del tipo de suelo desprovisto de vegetación, sin el efecto atmosférico, en la determinación de la cobertura vegetal, se aplica en este capítulo a un gran número de índices de vegetación para el sensor MODIS. El índice que mejor comportamiento presenta es el *WDVI*. En este caso, tanto la  $P_v$  como la  $\epsilon$  se muestran menos sensibles que al calcularlas con el *NDVI*, con una variación en la temperatura de entre +0,9 K y -0,2 K. Para completar los resultados, se replantea el estudio del capítulo anterior, del efecto de la atmósfera en la  $P_v$  y la  $\epsilon$ , con todas las simulaciones atmosféricas y en los casos de un suelo radiométricamente homogéneo y heterogéneo. El impacto de la atmósfera en la  $P_v$  y la  $\epsilon$  calculadas a partir del *WDVI* es inferior al del *NDVI*. En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, implica leves variaciones en temperatura comprendidas entre 0,14 K y -0,09 K. En el caso heterogéneo, implica variaciones en temperatura de entre +0,9 K y -0,2 K. Estos resultados con *WDVI* son mejores que los que usan *NDVI*. Por lo tanto, puede reducirse la sensibilidad de la emisividad térmica a la atmósfera y a la radiometría del suelo utilizando en el MCV un índice como el *WDVI*.

## 5.1. Alternativas al uso del índice de vegetación *NDVI*

En esta sección se buscan alternativas al uso del índice de vegetación *NDVI* en el MCV. Para ello, se analiza el efecto de la heterogeneidad radiométrica del suelo en la determinación de la cobertura vegetal y la emisividad. Esto se realiza aplicando el método de la sección 2.2, con las muestras puras y mixtas, sin considerar simulaciones atmosféricas. Vale la pena recordar que la  $P_v$  se obtiene por el procedimiento numérico descrito en la sección 2.2, ya que no es posible obtener una expresión analítica de la  $P_v$  para todos los índices de vegetación, mientras que sí que es posible con el *NDVI*.

La tabla 5.1 muestra el resultado del efecto de un suelo heterogéneo en la variación de la  $P_v$  para el sensor MODIS, puesto que es el único que permite calcular todos los índices descritos en la sección 2.2. Se muestran los valores promedio, máximo, mínimo y los tres cuartiles de la variación de la  $P_v$ , para cada índice de vegetación. La tabla muestra cinco índices que presentan sus cuartiles de variación de cobertura vegetal, centrados alrededor de cero: el *PVI*, el *NDII*, el *WDVI*, el *AFRI1,6* y el *AFRI2,1*. Estos cinco índices presentan mejor comportamiento que el del *NDVI* (consultar en la sección 4.4.1 en la tabla 4.16) ya que el *NDVI* presenta una sobreestimación de la cobertura vegetal en presencia de un suelo radiométricamente heterogéneo. De los cinco índices, hay dos que presentan valores promedio de variación de la  $P_v$  próximos a cero: el *PVI* y el *WDVI*. Ambos son índices que hacen uso de la línea de suelo, siendo sus resultados prácticamente similares, con un leve mejor comportamiento del *WDVI*.

A continuación, la tabla 5.2 muestra el efecto de un suelo heterogéneo, sin atmósfera, en la variación de la emisividad térmica para el sensor MODIS. La tabla presenta los valores promedio, máximo, mínimo y los tres cuartiles para cada índice de vegetación. Así mismo, muestra varios índices que presentan sus cuartiles de variación de la  $\epsilon$  centrados alrededor de cero. De entre ellos, los que menor diferencia promedio tienen y menor diferencia entre máximo y mínimo ofrecen son el *PVI* y el *WDVI*. Su diferencia promedio en la emisividad es de 0,10 %, el máximo de 1,7 % y el mínimo de -0,5 %. Esta variación en la emisividad implica, según Becker (1987), una variación en la temperatura entre +0,9 K y -0,2 K. Estos índices presentan una mayor precisión que el *NDVI* (consultar en la sección 4.4.2 en la tabla 4.17) y reducen el intervalo de error en la temperatura a un tercio del obtenido con *NDVI*.

Dado que tanto *PVI* como *WDVI* tienen resultados similares en emisividad, y apenas existe una ligera diferencia a favor del *WDVI* en cobertura vegetal, parece conveniente buscar algún argumento para decantarse por uno de ellos. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran los valores de *PVI* y *WDVI*, así como el índice resultado del MCV, donde se toma una muestra como suelo

$\Delta P_v$ Índice de vegetación alternativo a <i>NDVI</i>						
Índice	Promedio	Máximo	Mínimo	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
RVI	97 %	2266 %	-5 %	6 %	28 %	84 %
PVI	7 %	468 %	-13 %	-7 %	0,6 %	4 %
NDII	47 %	1368 %	-24 %	-12 %	0 %	27 %
WDVI	6 %	468 %	-13 %	-7 %	-0,6 %	4 %
SAVI	60 %	1284 %	-11 %	3 %	17 %	54 %
IPVI	97 %	2266 %	-5 %	6 %	28 %	84 %
TSAVI	209 %	5634 %	-16 %	1,0 %	35 %	150 %
GEMI	83 %	1716 %	-8 %	1,2 %	16 %	63 %
ARVI	48 %	1335 %	-12 %	-0,6 %	7 %	36 %
MSAVI	36 %	845 %	-12 %	0 %	9 %	31 %
MSAVI2	54 %	1095 %	-11 %	3 %	16 %	49 %
EVI	35 %	1027 %	-19 %	-5 %	3 %	29 %
NDWI	90 %	2401 %	-31 %	-9 %	8 %	62 %
OSAVI	77 %	1697 %	-11 %	4 %	22 %	68 %
AFRI1,6	47 %	1368 %	-24 %	-12 %	0 %	27 %
AFRI2,1	46 %	1412 %	-15 %	-6 %	0,7 %	26 %
TDVI	97 %	2266 %	-5 %	6 %	28 %	84 %
VARI	97 %	2507 %	-5 %	3 %	24 %	84 %
WDRVI	97 %	2266 %	-5 %	6 %	28 %	84 %
NMDI	-1,5 %	1559 %	-56 %	-36 %	-22 %	0 %

Tabla 5.1: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin efecto de la atmósfera, para el sensor MODIS. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

$\Delta\epsilon$ Índice de vegetación alternativo a <i>NDVI</i>						
Índice	Promedio	Máximo	Mínimo	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
RVI	0,9 %	6 %	-0,6 %	-0,07 %	0,3 %	1,6 %
PVI	0,10 %	1,7 %	-0,5 %	-0,09 %	0,014 %	0,2 %
NDII	0,5 %	4 %	-0,7 %	-0,05 %	0,10 %	0,8 %
WDVI	0,10 %	1,7 %	-0,5 %	-0,09 %	0,014 %	0,2 %
SAVI	0,7 %	4 %	-0,3 %	-0,007 %	0,2 %	1,2 %
IPVI	0,9 %	6 %	-0,6 %	-0,07 %	0,3 %	1,6 %
TSAVI	0,9 %	7 %	-1,4 %	-0,12 %	0,2 %	1,5 %
GEMI	0,9 %	5 %	-0,2 %	0 %	0,3 %	1,5 %
ARVI	0,6 %	4 %	-0,4 %	-0,02 %	0,11 %	0,8 %
MSAVI	0,5 %	3 %	-0,4 %	0 %	0,18 %	0,8 %
MSAVI2	0,6 %	4 %	-0,4 %	0,013 %	0,2 %	1,1 %
EVI	0,4 %	3 %	-0,7 %	-0,05 %	0,09 %	0,6 %
NDWI	0,9 %	6 %	-0,9 %	-0,03 %	0,3 %	1,4 %
OSAVI	0,8 %	5 %	-0,4 %	-0,05 %	0,2 %	1,4 %
AFRI1,6	0,5 %	4 %	-0,7 %	-0,05 %	0,10 %	0,8 %
AFRI2,1	0,5 %	4 %	-0,4 %	0 %	0,14 %	0,7 %
TDVI	0,9 %	6 %	-0,6 %	-0,07 %	0,3 %	1,6 %
VARI	1,0 %	6 %	-0,4 %	-0,03 %	0,2 %	1,8 %
WDRVI	0,9 %	6 %	-0,6 %	-0,07 %	0,3 %	1,6 %
NMDI	-0,3 %	5 %	-2 %	-0,9 %	-0,3 %	0,13 %

Tabla 5.2: Diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , por el efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo, sin considerar el efecto de la atmósfera, para el sensor MODIS. Valores promedio, máximo, mínimo y cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

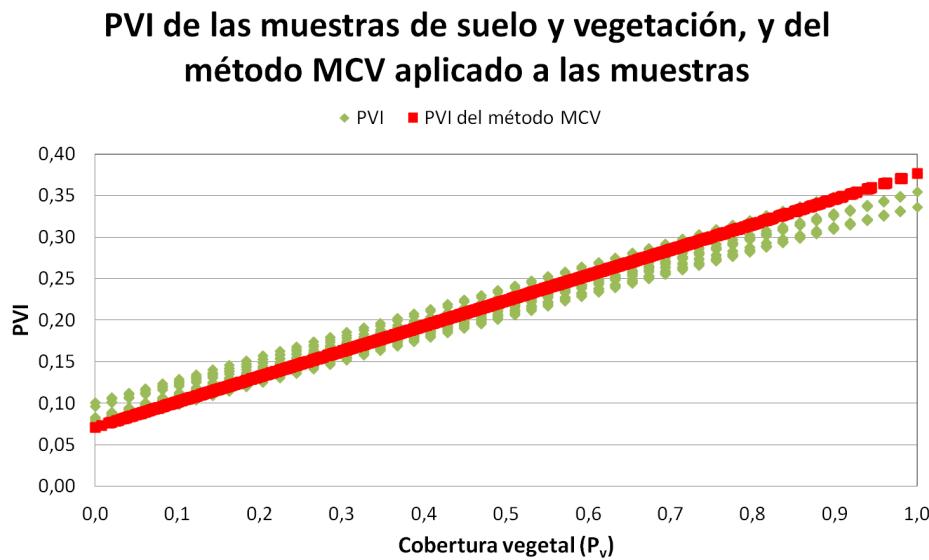


Figura 5.1: PVI para todas las muestras mixtas y puras en la parte baja de la atmósfera y PVI obtenido con el MCV

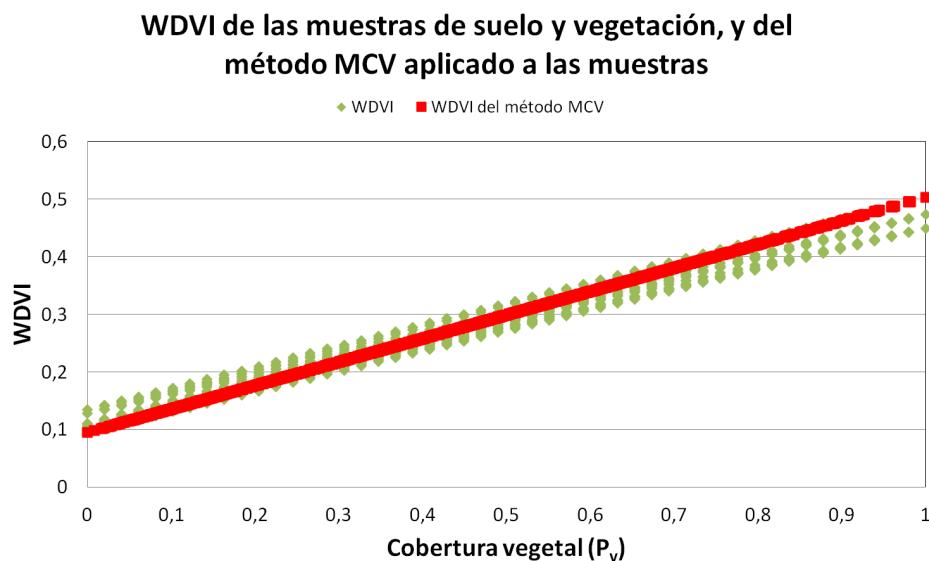


Figura 5.2: WDV para todas las muestras mixtas y puras en la parte baja de la atmósfera y WDV obtenido con el MCV

desprovisto de vegetación y otra como vegetación pura y, por tanto, al calcular la  $P_v$ , todos los valores se ubican sobre la misma línea. Ambos gráficos son muy similares, pero el intervalo de valores del  $WDVI$  es mayor que el del  $PVI$ . Aunque desde un punto de vista teórico esto es irrelevante para calcular la  $P_v$ , puede ser una ventaja, ya que la variación del índice con la  $P_v$  será mayor y, por tanto, la determinación de la  $P_v$  más precisa. En todo caso, las diferencias entre  $PVI$  y  $WDVI$  siguen siendo muy pequeñas, ya que ambos deben su comportamiento a la información que les aporta la línea de tierra.

La figura 5.3 es ahora un gráfico similar a los anteriores, pero calculado a partir del  $NDVI$ . La comparación con la figura 5.2 muestra el origen de la mejora de los resultados en el MCV al emplear el  $WDVI$  en sustitución del  $NDVI$ . Los valores de  $NDVI$  de las muestras están mucho más dispersos que los valores de  $WDVI$ , lo que se hace crítico al aplicar el MCV que toma la línea destacada en el gráfico como la genuina relación entre la  $P_v$  y la vegetación, de manera que el resto de muestras introduce gran cantidad de desviaciones en el valor calculado de la  $P_v$ .

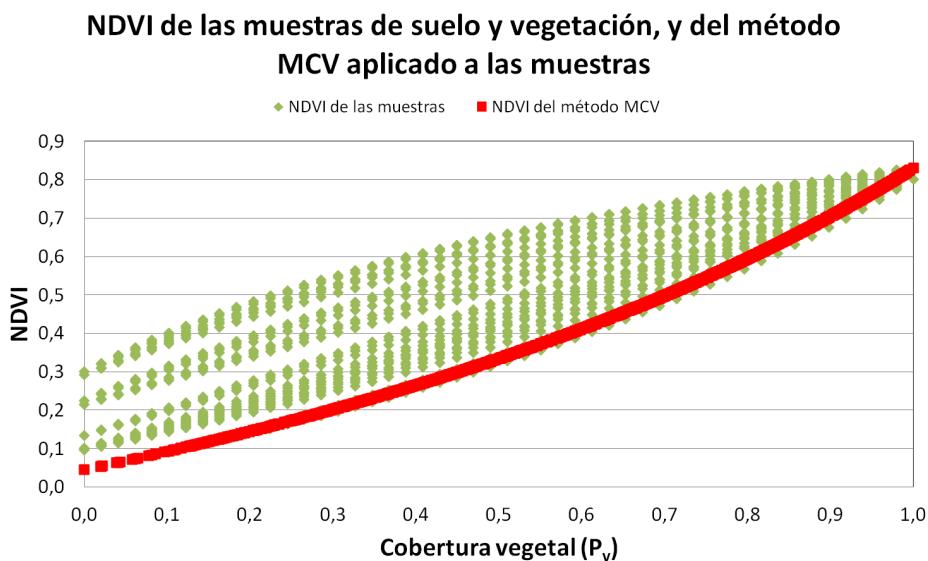


Figura 5.3:  $NDVI$  para todas las muestras mixtas y puras en la parte baja de la atmósfera y  $NDVI$  obtenido con el MCV

Esta mejora en la determinación de la  $P_v$  al emplear el  $WDVI$  se ratifica en las figuras 5.4 y 5.5, que muestran las diferencias en la  $P_v$  y la  $\epsilon$  calculadas con  $WDVI$ . Su comparación con las figuras 4.23 y 4.24 de la sección 4.4, hace evidente que las diferencias calculadas con  $WDVI$  son menores, dada la escala del eje vertical de las gráficas de  $NDVI$  respecto a la escala de las de  $WDVI$ .

**Efecto del suelo en la  $P_v$  (MODIS) calculada con el WDVI para las muestras de suelo puras y mixtas**

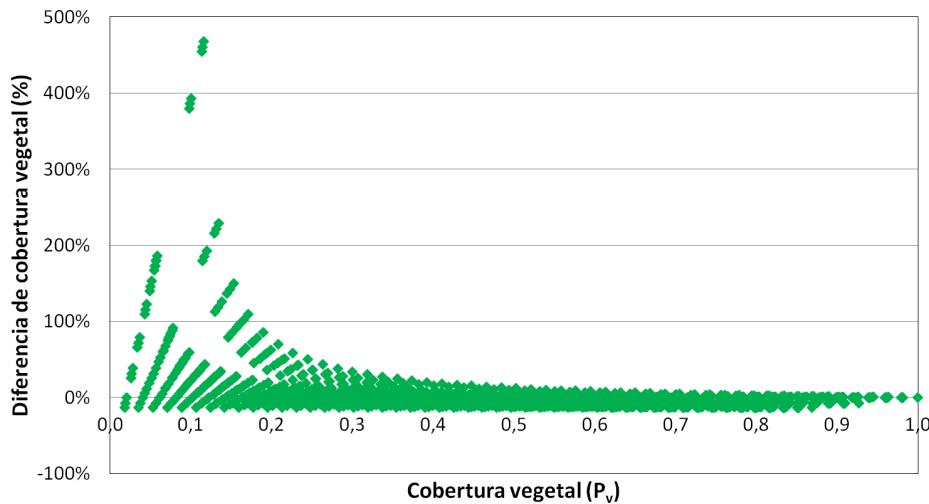


Figura 5.4: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $P_v$ , calculada con el *WDVI* por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal.

**Efecto del suelo en la  $\epsilon$  (MODIS) calculada con el WDVI para las muestras de suelo puras y mixtas**

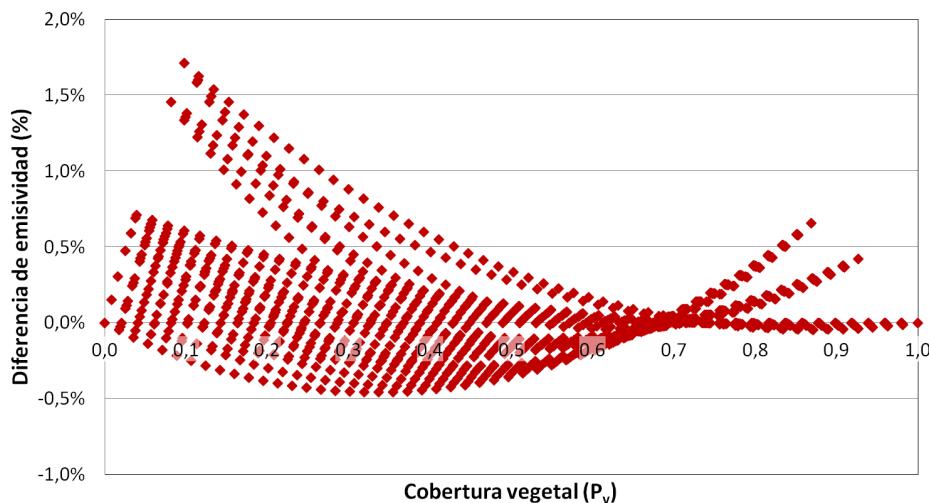


Figura 5.5: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal,  $\epsilon$ , calculada con el *WDVI* por efecto de un suelo radiométricamente heterogéneo en la parte baja de la atmósfera en función de la cobertura vegetal.

De todos los resultados analizados en esta sección, se concluye que el uso del índice de vegetación  $WDVI$  en el MCV mejora los resultados en la  $Pv$ , de manera que la determinación de la emisividad es más exacta y, por tanto, también lo será la temperatura obtenida a partir de dicha  $\epsilon$ . Esta mejora es debida a la menor sensibilidad del  $WDVI$  a la radiometría de un suelo desprovisto de vegetación, gracias a que incorpora en su cálculo información de la línea de suelo.

## 5.2. Atmósfera e índice $WDVI$

En este apartado se analiza el efecto de la atmósfera en el índice de vegetación  $WDVI$ , como ya se hizo para el  $NDVI$  en la sección 4.1. Para ello, se hace uso de la modelización del efecto de la atmósfera para un canal  $i$ , descrito en la sección 2.4. Con este método se procesan ahora todas las muestras puras y mixtas de suelo y vegetación pormenorizadas en el apartado 3.1, con todas las simulaciones atmosféricas reseñadas en el apartado 3.2. Con las reflectividades obtenidas, se computa el índice  $WDVI$  en la parte alta de la atmósfera para el sensor MODIS y se compara por diferencia, con el correspondiente en la parte baja de la atmósfera, expresándolo como porcentaje de la magnitud en la parte baja de la atmósfera. Posteriormente, se comparan los histogramas de los valores del  $WDVI$  para todas las simulaciones, manteniendo un parámetro de la simulación constante, de manera que se observe la dependencia de los resultados con cada uno de los parámetros. A continuación, se detallan los resultados obtenidos.

La tabla 5.3 compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de  $WDVI$  (en la parte alta respecto a la parte baja de la atmósfera) para el sensor MODIS. Como puede observarse, la atmósfera produce siempre un descenso en el valor del  $WDVI$ , mientras que para el  $NDVI$  obtenemos incrementos y descensos, aunque en promedio se observa un descenso del índice.

$\Delta_{WDVI}$ - Efecto de la atmósfera	
	MODIS
<b>Promedio</b>	-27 %
<b>Máximo</b>	-3 %
<b>Mínimo</b>	-344 %

Tabla 5.3: Diferencia porcentual en el índice de vegetación,  $WDVI$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de  $WDVI$  entre las partes alta y baja de la atmósfera.

La figura 5.6 muestra la diferencia porcentual en el  $WDVI$  por el efecto

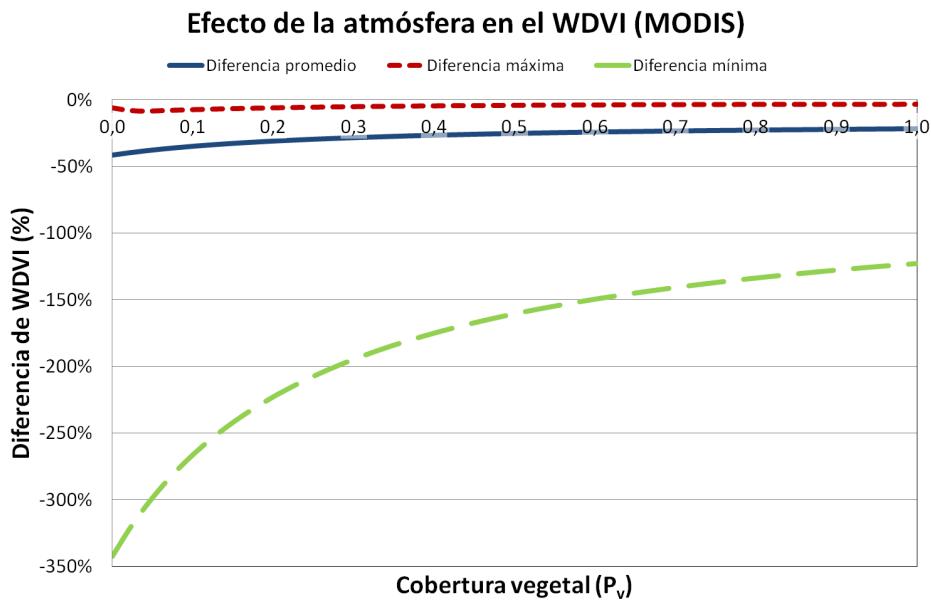


Figura 5.6: Diferencia porcentual en el índice de vegetación, *WDVI*, por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de la diferencia de *WDVI* en función de la cobertura vegetal.

atmosférico como función de la  $P_v$ . El gráfico presenta un mayor intervalo entre el máximo y el mínimo para valores de cobertura vegetal próximos a cero, lo que señala que el *WDVI* no es absolutamente independiente del suelo, aunque sí tiene un mejor comportamiento que el *NDVI*. De nuevo, como en el caso del *NDVI*, a partir de coberturas vegetales del 50 %, los valores de diferencia porcentual tienden a estabilizarse. Este comportamiento ya se justificó para el *NDVI* por la uniformidad radiométrica de la vegetación, comentada en el subapartado 3.1.1.

A continuación, se analizan los resultados para los diversos intervalos de cobertura vegetal descritos en la subsección 3.1.3. La tabla 5.4 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de *WDVI* en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. Los valores máximos se encuentran muy agrupados, como indica la poca diferencia entre  $Q_1$  y  $Q_3$ , mientras que los promedio lo están algo menos. En los mínimos se observa bastante dispersión, lo que entraña con lo observado en la figura 5.6 respecto al comportamiento de *WDVI*.

Seguidamente, la tabla 5.5 muestra la diferencia porcentual en el índice de vegetación, *NDVI*, clasificado en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Tal como se aprecia, la merma en el promedio de índice de vegetación se produce para una baja  $P_v$ , aunque

$\Delta WDVI$ - Efecto de la atmósfera	
	MODIS
<b>Promedio</b>	$Q_1$ -30 %
	$Q_2$ -25 %
	$Q_3$ -23 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ -6 %
	$Q_2$ -4 %
	$Q_3$ -4 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -207 %
	$Q_2$ -160 %
	$Q_3$ -137 %

Tabla 5.4: Diferencia porcentual en el índice de vegetación,  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de  $WDVI$ .

$\Delta WDVI$ - Efecto de la atmósfera					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
MODIS					
<b>Promedio</b>	-36 %	-29 %	-25 %	-23 %	-22 %
<b>Máximo</b>	-6 %	-5 %	-4 %	-4 %	-4 %
<b>Mínimo</b>	-342 %	-221 %	-174 %	-148 %	-133 %

Tabla 5.5: Diferencia porcentual en el índice de vegetación,  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal, y todas las simulaciones. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de  $WDVI$  para cada intervalo de la  $P_v$ .

se mantiene una reducción sistemática para intervalos mayores de  $P_v$ , lo que implica un error sistemático. Respecto a los máximos y mínimos, el primero tiene un comportamiento monótono creciente con la  $P_v$ , mientras que el segundo lo tiene monótono decreciente respecto a la  $P_v$ . Como en el caso del *NDVI*, las tres magnitudes se encuentran más próximas cuanto mayor es la  $P_v$ , por la mencionada variabilidad en los espectros de suelo respecto a la semejanza en los espectros de vegetación.

Para completar el análisis del índice *WDVI* en la parte alta de la atmósfera, se estudia a continuación el histograma de valores del índice para los valores de las magnitudes que participan en las configuraciones del 6S con MODIS. Como referencia, la figura 5.7 muestra todos los valores del *WDVI* en la parte baja de la atmósfera. Su comparación con la figura 4.4 indica que el *WDVI* tiene un intervalo de valores inferior al del *NDVI*.

### Histograma de valores del *WDVI* para todas las muestras puras y mixtas de vegetación y suelo

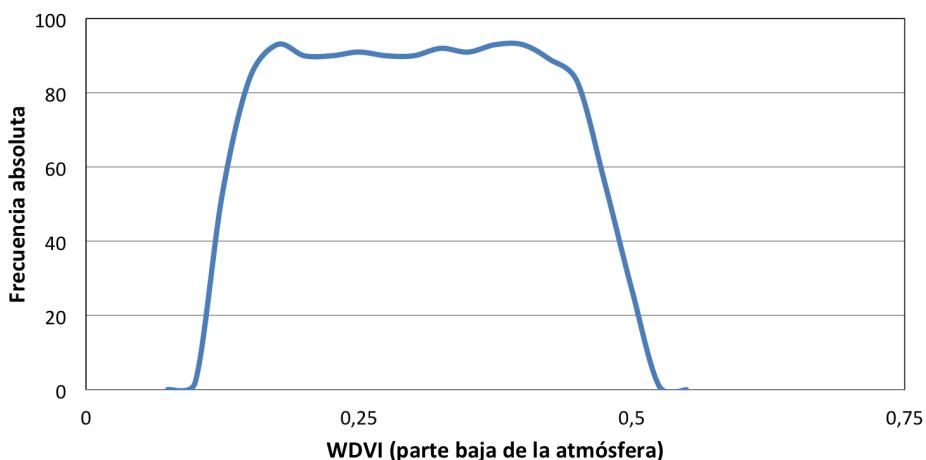


Figura 5.7: Histograma de los valores del *WDVI* en la parte baja de la atmósfera para las muestras puras y mixtas de suelo y vegetación.

A continuación, la figura 5.8 muestra el histograma del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las atmósferas consideradas en el modelo de transferencia radiativa, para analizar el impacto de dicha magnitud en el índice. Como en la sección 4.1, el modelo de atmósfera apenas impacta en el resultado porque todos los histogramas son muy similares.

La figura 5.9 muestra el histograma del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada uno de los modelos de aerosol considerados en el modelo de transferencia radiativa, lo que analiza su impacto en el índice de vegetación. La figura muestra que el modelo de aerosol tiene un impacto mayor en el *WDVI* que en el *NDVI*, analizado en la sección 4.1.

### Histogramas de valores del WDV<sub>I</sub> con el sensor MODIS para los modelos de atmósfera

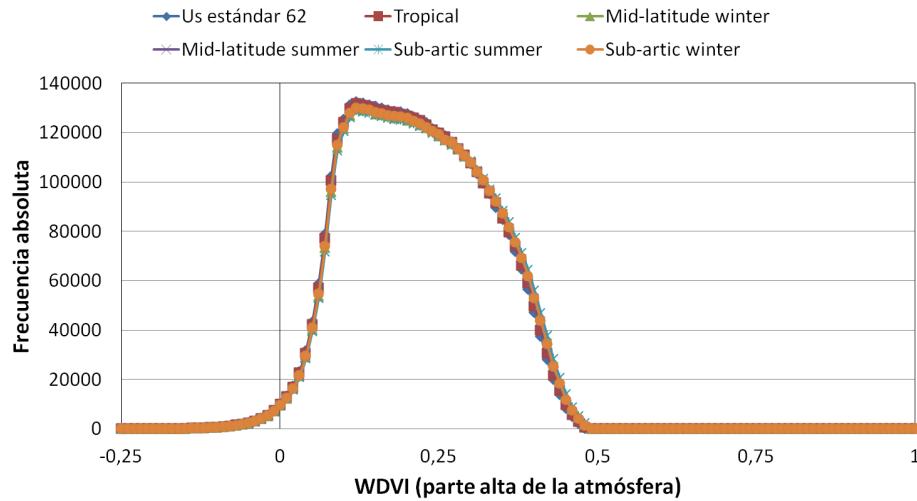


Figura 5.8: Histograma de los valores del  $WDVI_I$  en la parte alta de la atmósfera para cada una de las atmósferas consideradas en el estudio.

### Histogramas de valores del WDV<sub>I</sub> con el sensor MODIS para los modelos de aerosoles

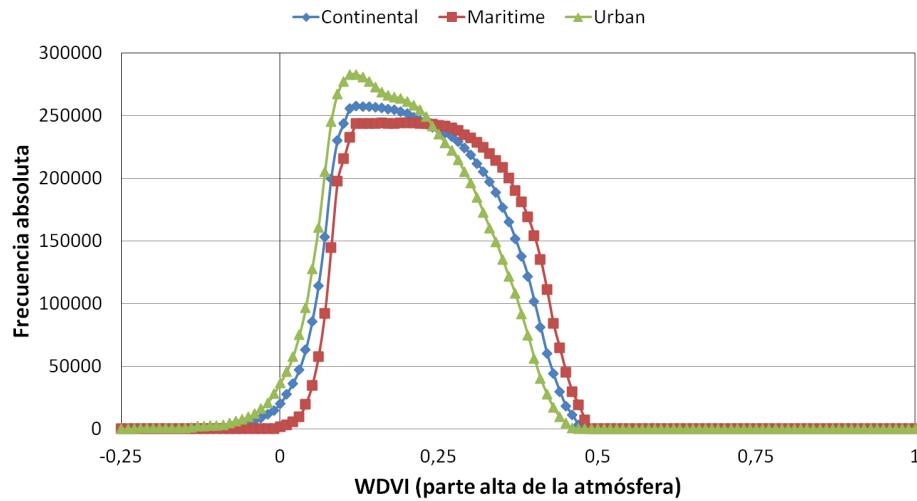


Figura 5.9: Histograma de los valores del  $WDVI_I$  en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los modelos de aerosoles considerados en el estudio.

**Histogramas de valores del WDV<sub>I</sub> con el sensor  
MODIS para la concentración de aerosoles  
(visibilidad atmosférica)**

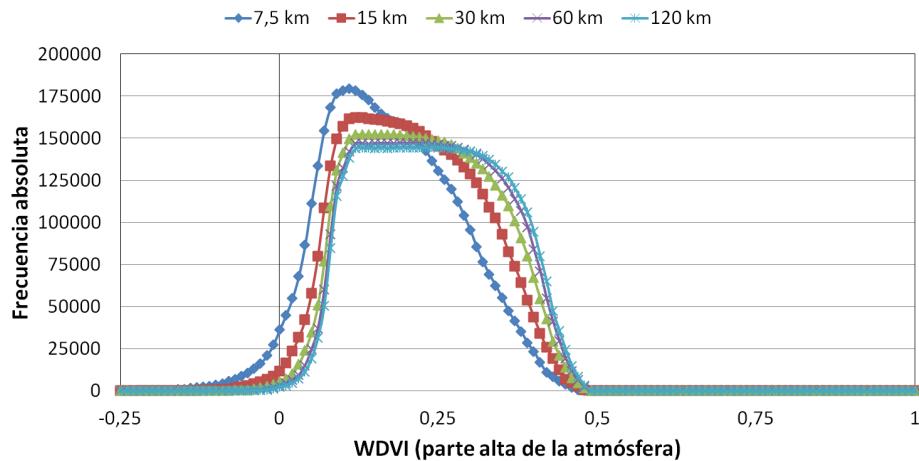


Figura 5.10: Histograma de los valores del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada una de las concentraciones de aerosoles consideradas en el estudio.

**Histogramas de valores del WDV<sub>I</sub> con el sensor  
MODIS para los ángulos cenitales de iluminación**

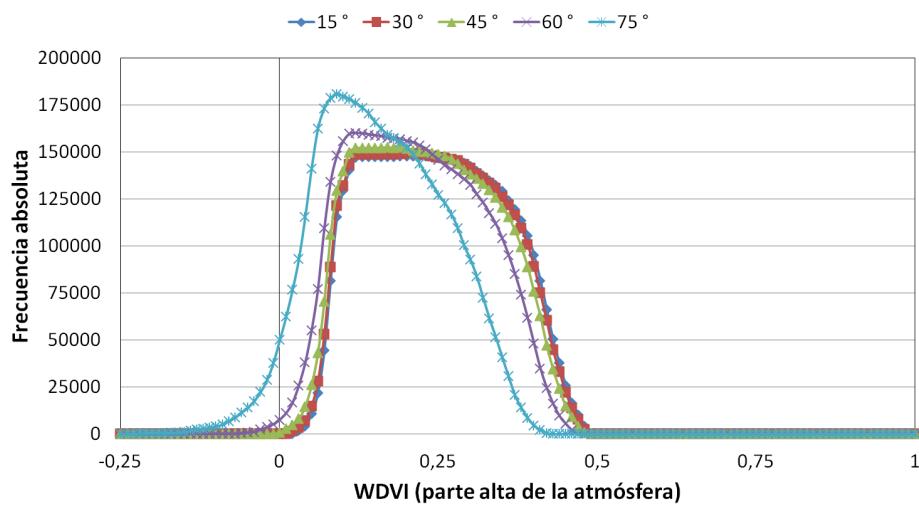


Figura 5.11: Histograma de los valores del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de iluminación considerados en el estudio.

### Histogramas de valores del WDV<sub>I</sub> con MODIS para los ángulos cenitales de observación

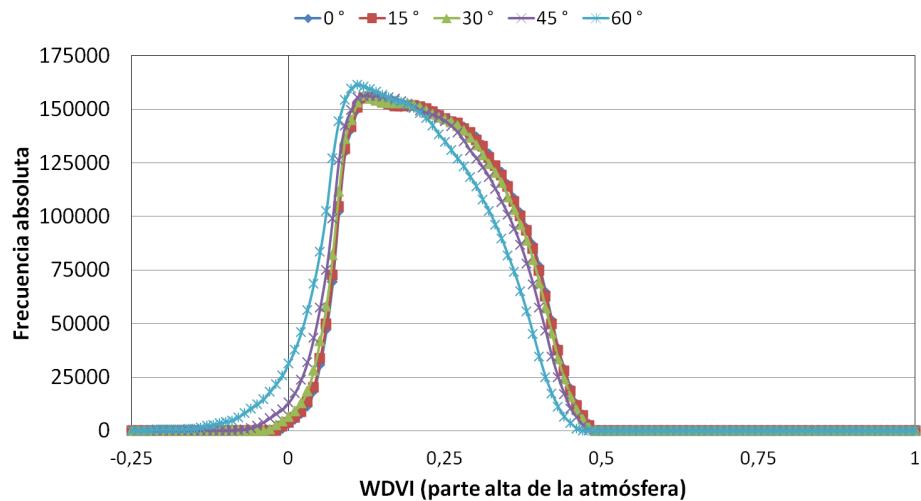


Figura 5.12: Histograma de los valores del  $WDVI_I$  en la parte alta de la atmósfera para cada uno de los ángulos cenitales de observación considerados en el estudio.

### Histogramas de valores del WDV<sub>I</sub> con el sensor MODIS para las diferencias de azimut (observación-iluminación)

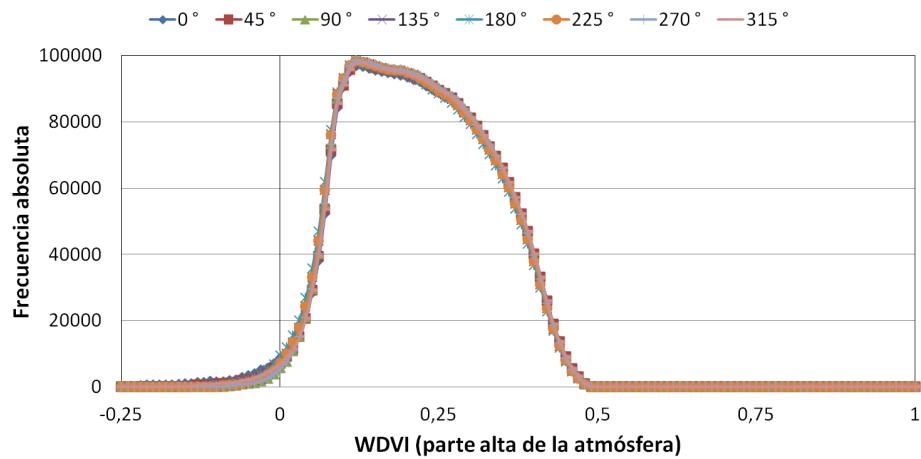


Figura 5.13: Histograma de los valores del  $WDVI_I$  en la parte alta de la atmósfera para cada una de las diferencias de azimut, entre iluminación y observación, consideradas en el estudio.

Seguidamente, la figura 5.10 muestra el histograma del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las concentraciones de aerosoles en las simulaciones de transferencia radiativa, para estudiar su importancia en el índice de vegetación. Como en la sección 4.1, la figura indica que la cantidad de aerosoles es importante para el efecto de la atmósfera en el índice de vegetación *WDVI*, como lo era para el *NDVI* y en el mismo sentido.

La figura 5.11 muestra el histograma del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las geometrías cenitales de iluminación solar empleadas. La figura muestra que el ángulo cenital de iluminación provoca un efecto atmosférico importante en el índice de vegetación *WDVI*, en el mismo sentido que en el *NDVI* en la sección 4.1.

La figura 5.12 muestra el histograma del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las geometrías cenitales de observación consideradas en las simulaciones. La figura señala que el ángulo cenital de observación tiene un comportamiento en el índice de vegetación *WDVI* en el mismo sentido que el observado para la cantidad de aerosoles y el ángulo de iluminación. El resultado es coherente con el de la sección 4.1 del *NDVI*.

Para completar el análisis, la figura 5.13 muestra el histograma del *WDVI* en la parte alta de la atmósfera obtenido con cada una de las diferencias de azimut, entre iluminación y observación, considerados en el estudio. La figura, como en la sección 4.1, señala que la diferencia de azimut impacta muy levemente en el resultado.

De todo lo anterior se concluye que las variaciones del índice de vegetación *WDVI* con la cobertura vegetal, entre la parte baja y alta de la atmósfera, son menores que las del *NDVI*, aunque no despreciables. Este comportamiento se justifica, como en el caso del *NDVI*, por el efecto aditivo y proporcional de la atmósfera y la interacción con los espectros de reflectividad de la vegetación y el suelo. Como ha quedado evidenciado, el índice de vegetación *WDVI* es inestable frente a todos estos factores. Del análisis de los histogramas del *NDVI* se concluye que el principal efecto atmosférico que reduce el valor del *WDVI* es la dispersión atmosférica por aerosoles, especialmente para elevadas concentraciones de aerosoles y grandes ángulos cenitales de iluminación y observación.

### 5.3. Atmósfera y $P_v$ calculada con el *WDVI*

En este apartado se analiza el efecto de la atmósfera en la cobertura vegetal calculada con el índice *WDVI*, como se hizo con el *NDVI* en el apartado 4.2. Para ello, se aplica el mismo método, con las mismas muestras y simulaciones que en dicha sección, excepto en lo relativo a la  $P_v$ , que se realiza aplicando el método numérico de la sección 2.2, puesto que, como se indicó previamente, no es posible obtener una relación analítica para la  $P_v$ .

con cada índice de vegetación. De igual manera, la  $P_v$  en la parte alta de la atmósfera se compara por diferencia con el correspondiente valor en la parte baja, expresándolo como porcentaje de  $P_v$  en la parte baja de la atmósfera. Como en el mencionado análisis con  $NDVI$ , se detallan y comparan los resultados obtenidos, tanto para suelos radiométricamente homogéneos como para los heterogéneos.

### 5.3.1. Suelo radiométricamente homogéneo

En esta subsección se analiza el efecto de la atmósfera en la  $P_v$  para un suelo radiométricamente homogéneo, es decir, considerando que en cada imagen, desde el punto de vista radiométrico, solo existe un tipo de vegetación y un tipo de suelo desprovisto de vegetación. En este caso, el cálculo se realiza a partir del índice  $WDVI$ . Como se indica en el apartado 2.7, los resultados para cada pareja suelo-vegetación se promedian para presentarse aquí. Como sucedía en la subsección 4.2.1, en el caso de suelo homogéneo, la aplicación del MCV no se ve afectada por la presencia de diversos suelos o vegetaciones puras.

La tabla 5.6 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, como función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico. La tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores, en un suelo radiométricamente homogéneo, para el sensor MODIS. Por su parte, la figura 5.14 representa la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , entre las partes alta y la baja de la atmósfera.

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)	
	MODIS
Promedio	0,3 %
Máximo	6 %
Mínimo	-4 %

Tabla 5.6: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el  $WDVI$ , por el efecto atmosférico, para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

Como señalan la tabla 5.6 y la figura 5.14, en el caso de un suelo homogéneo, el promedio de diferencia de la  $P_v$  es 0,3 % y, por tanto, próximo a cero. Por su parte, el máximo y mínimo son 6 % y -4 % para el MODIS. Los valores obtenidos son semejantes a los obtenidos para  $NDVI$ , con una ligera mejora en el caso de  $WDVI$  en el valor promedio, que resulta ser un 0,1 % mejor ahora.

A continuación, la tabla 5.7 muestra los cuartiles  $Q1$ ,  $Q2$  y  $Q3$  de la

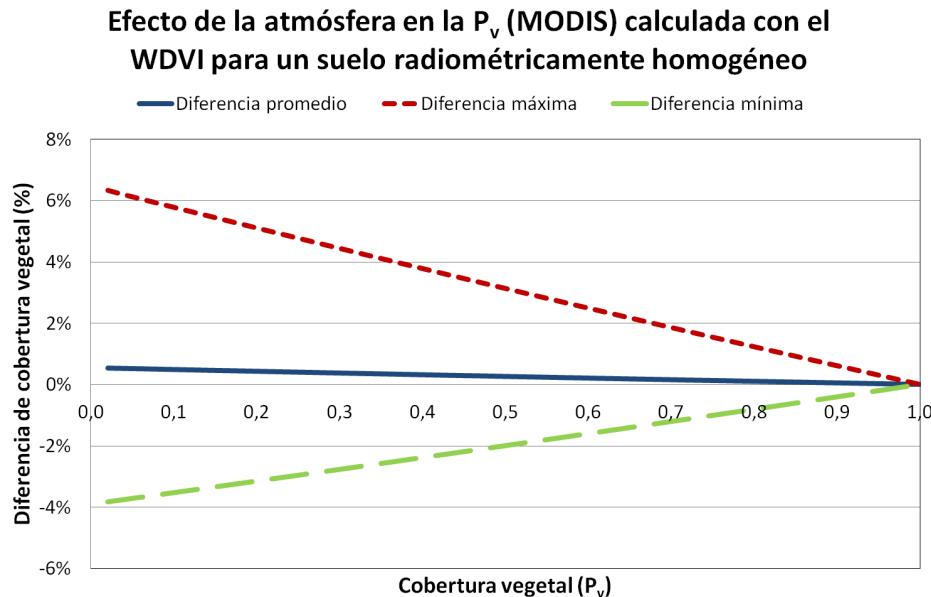


Figura 5.14: Diferencia porcentual en la  $P_v$  calculada con el  $WDVI$  por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)	
	MODIS
<b>Promedio</b>	$Q_1$ 0,13 %
	$Q_2$ 0,3 %
	$Q_3$ 0,4 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 1,5 %
	$Q_2$ 3 %
	$Q_3$ 5 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -3 %
	$Q_2$ -2 %
	$Q_3$ -1,0 %

Tabla 5.7: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Cuartiles  $Q1$ ,  $Q2$  y  $Q3$  de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

distribución de diferencias de cobertura vegetal en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. La tabla señala que la distribución de valores promedio se sitúa ligeramente por encima de cero, mientras que los máximos y mínimos lo hacen alrededor de cero y, por tanto, es posible tanto la ganancia como la pérdida de la  $P_v$  por efecto de la atmósfera. Este resultado es análogo al obtenido para  $NDVI$ , pero con valores ligeramente mejores ahora con  $WDVI$ .

Seguidamente, la tabla 5.8 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, clasificado en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico. Se compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores, en un suelo radiométricamente homogéneo, para cada intervalo de la  $P_v$ . La mayor diferencia en el promedio de cobertura vegetal es positiva y se produce para una baja  $P_v$ . Igual que en el caso del  $NDVI$ , esta magnitud presenta un decrecimiento monótono con la  $P_v$  hasta prácticamente anularse. Los valores máximos son todos positivos, mientras que los mínimos son negativos, y el rango entre máximo y mínimo se reduce según se incrementa la  $P_v$ . Por contra, los valores numéricos con  $WDVI$  son mejores que con  $NDVI$ , aunque su diferencia es pequeña.

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
MODIS					
<b>Promedio</b>	0,5 %	0,4 %	0,3 %	0,15 %	0,05 %
<b>Máximo</b>	6 %	5 %	4 %	2 %	1,1 %
<b>Mínimo</b>	-4 %	-3 %	-2 %	-1,6 %	-0,7 %

Tabla 5.8: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $P_v$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, se concluye que las variaciones de la cobertura vegetal con el  $WDVI$ , por efecto de la atmósfera, no son muy importantes en general, aunque menores que para el  $NDVI$ , pero sigue observándose una dependencia con la  $P_v$ . El comportamiento y dependencias son iguales que con  $NDVI$ . Por tanto, la  $P_v$ , calculada con el  $WDVI$  para un suelo radiométricamente homogéneo, es más estable frente al efecto atmosférico que su homóloga calculada con el  $NDVI$ .

### 5.3.2. Suelo radiométricamente heterogéneo

Para completar el análisis previo, en esta subsección se detalla el efecto de la atmósfera en la  $P_v$ , calculado a partir del índice *WDVI*, para un suelo de radiometría heterogénea, considerando que las imágenes contienen todas las vegetaciones y suelos desprovistos de vegetación. Con la metodología del MCV, un suelo y una vegetación puros son elegidos como tales en la imagen, pese a que todos los suelos y vegetaciones puros están presentes. Así, los resultados dan cuenta tanto del efecto de la variabilidad en suelo y vegetación como del efecto de la atmósfera, como también era el caso de la subsección 4.2.2.

La tabla 5.9 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. Las figuras y la tabla comparan, en un suelo radiométricamente heterogéneo, los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores. Por otro lado, la figura 5.15 representa la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , entre las partes alta y la baja de la atmósfera para todas las muestras y simulaciones.

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)	
	MODIS
Promedio	7 %
Máximo	486 %
Mínimo	-14 %

Tabla 5.9: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

Como indican la tabla 5.9 y la figura 5.15, en el caso de un suelo heterogéneo, el promedio de la diferencia de la  $P_v$  es de solo el 7 %, el máximo es 486 % y el mínimo es -14 %. Estos valores son mayores que en el caso de un suelo homogéneo del subapartado 5.3.1, pero muy inferiores a los obtenidos con *NDVI* en el subapartado 4.2.2. Por tanto, el uso del *WDVI* se plantea como ventajoso frente al del *NDVI*.

A continuación, la tabla 5.10 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de cobertura vegetal, en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. La tabla recoge una variación de la  $P_v$  mayor que en el subapartado 5.3.1, pero menor que utilizando el *NDVI*. Además, con *WDVI* la distribución de diferencias está más centrada en cero que con *NDVI*. Y, a diferencia de antes, ahora hay una ligera subestimación promedio de la  $P_v$ .

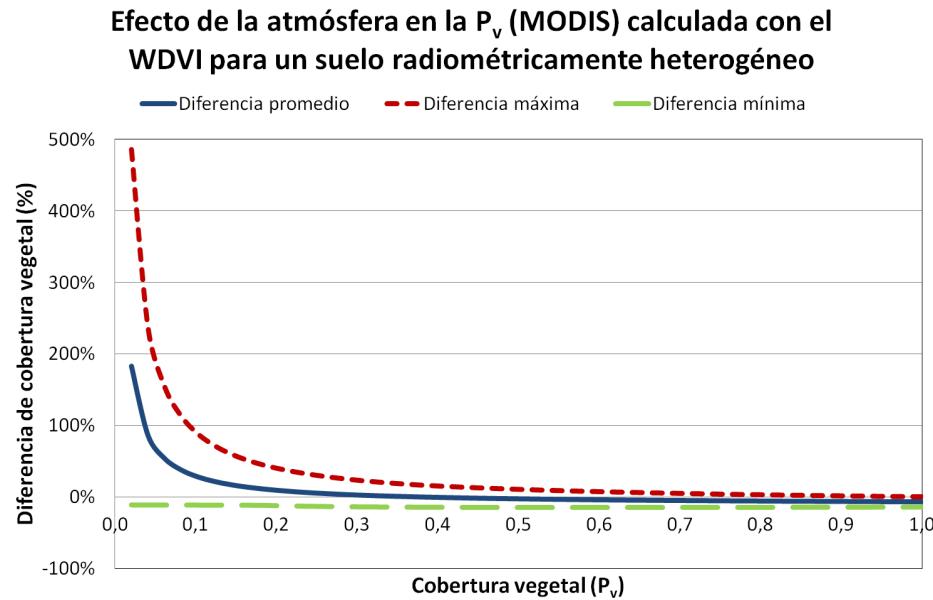


Figura 5.15: Diferencia porcentual en la  $P_v$  calculada con el  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

$\Delta P_v$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)	
	MODIS
<b>Promedio</b>	$Q_1$ -6 %
	$Q_2$ -3 %
	$Q_3$ 4 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 4 %
	$Q_2$ 10 %
	$Q_3$ 28 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -14 %
	$Q_2$ -14 %
	$Q_3$ -13 %

Tabla 5.10: Diferencia porcentual en la cobertura vegetal, calculada con el  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $P_v$ .

Seguidamente, la tabla 5.11 muestra la diferencia porcentual en la cobertura vegetal, clasificada en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores, en un suelo radiométricamente heterogéneo, para cada intervalo de la  $P_v$ . Los resultados son comparables a los de *NDVI*, pero los valores son menores en el caso del *WDVI*, lo que indica un mejor comportamiento de este último frente al efecto conjunto de suelo y atmósfera.

$\Delta WDVI$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	50 %	3 %	-3 %	-5 %	-7 %
<b>Máximo</b>	486 %	39 %	15 %	7 %	3 %
<b>Mínimo</b>	-12 %	-14 %	-14 %	-14 %	-14 %

Tabla 5.11: Diferencia porcentual en la  $P_v$  calculada con el *WDVI* por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

Contrariamente a la subsección anterior, ahora se concluye que las variaciones de la cobertura vegetal son importantes. Sin embargo, cuando se comparan los resultados con los obtenidos para *NDVI*, se observa una mejora importante al emplear *WDVI*. Como se ha visto en esta subsección, se concluye que la  $P_v$ , para un suelo radiométricamente heterogéneo, es inestable frente a la atmósfera y la cobertura vegetal, pero lo es menos al emplear *WDVI* en vez de *NDVI*. Esta conclusión se debería ratificar con los resultados de la próxima sección.

## 5.4. Atmósfera y $\epsilon$ calculada con el *WDVI*

En este apartado, se analiza el efecto de la atmósfera en la cobertura vegetal calculada con el índice *WDVI*, como se hizo con el *NDVI* en el apartado 4.3. Para ello, se aplica el mismo método, con las mismas muestras y simulaciones que en dicha sección. De igual manera, la  $\epsilon$  en la parte alta de la atmósfera se compara por diferencia con el correspondiente valor en el suelo, expresándolo como porcentaje de la  $\epsilon$  en la parte baja de la atmósfera. Como en dicho análisis con *NDVI*, se detallan y comparan los resultados obtenidos, tanto para los suelos radiométricamente homogéneos como para los heterogéneos.

### 5.4.1. Suelo radiométricamente homogéneo

En esta subsección se analiza el efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  para un suelo radiométricamente homogéneo. La tabla 5.12 y la figura 5.16 muestran la diferencia porcentual en la emisividad térmica, en función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de valores para todos los sensores y en un suelo radiométricamente homogéneo.

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)	
	MODIS
<b>Promedio</b>	0,005 %
<b>Máximo</b>	0,14 %
<b>Mínimo</b>	-0,09 %

Tabla 5.12: Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

### Efecto de la atmósfera en la $\epsilon$ (MODIS) calculada con el WDV para un suelo radiométricamente homogéneo

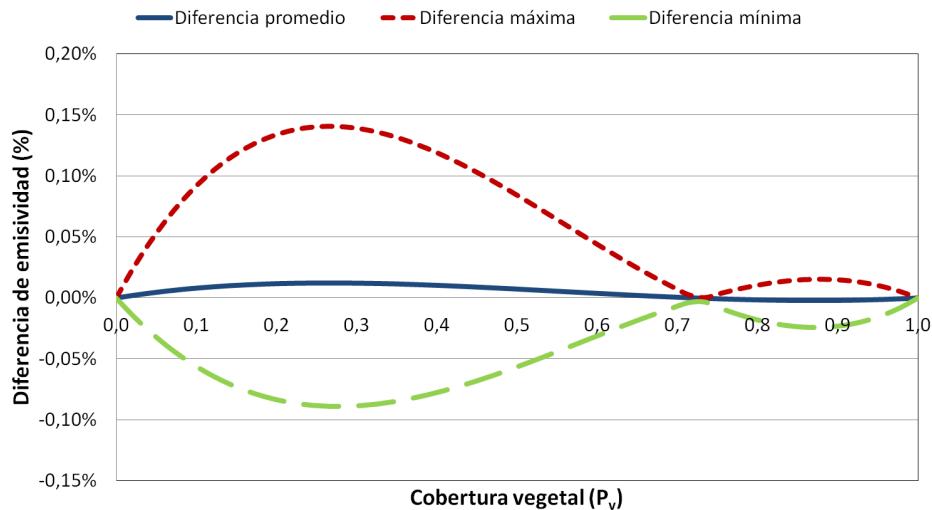


Figura 5.16: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente homogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

Como puede deducirse de la tabla 5.12 y figura 5.16, en el caso de un suelo

homogéneo, el promedio de diferencia de la  $\epsilon$  es próximo a cero, mientras que el máximo y mínimo es 0,14 % y -0,09 % para MODIS. Esta variación en la emisividad implica, según Becker (1987), una variación en la temperatura entre +0,07 K y -0,04 K. Los resultados son del mismo orden que en la subsección 4.3.1, pero algo mejores al realizar el cálculo con *WDVI*, frente a los obtenidos con *NDVI*.

A continuación, la tabla 5.13 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$  en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. El comportamiento de las distribuciones es similar a la obtenida con *NDVI*, pero con pequeñas variaciones numéricas.

<b><math>\Delta\epsilon</math> - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)</b>	
	<b>MODIS</b>
<b>Promedio</b>	$Q_1$ 0,0003 %
	$Q_2$ 0,005 %
	$Q_3$ 0,010 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 0,014 %
	$Q_2$ 0,06 %
	$Q_3$ 0,12 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -0,08 %
	$Q_2$ -0,04 %
	$Q_3$ -0,018 %

Tabla 5.13: Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

Seguidamente, la tabla 5.14 indica la diferencia porcentual en la  $\epsilon$ , clasificada en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras, simulaciones y sensores en un suelo radiométricamente homogéneo. De la tabla se deduce que la variación de la  $\epsilon$  promedio es positiva, salvo a alta cobertura vegetal, donde se vuelve negativa. Por otro lado, los máximos son todos positivos, mientras que los mínimos son todos negativos. La diferencia entre máximos y mínimos es aproximadamente constante con la  $P_v$  hasta coberturas medias, y se reduce considerablemente para las  $P_v$  elevadas. Este comportamiento ya se evidencia en la figura 5.16. De nuevo, estos resultados tienen un comportamiento equivalente a los obtenidos al utilizar *NDVI*.

En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, se concluye que las variaciones de la emisividad térmica, obtenida con *WDVI*, son poco importantes, puesto que generan variaciones en temperatura inferiores a la décima de kelvin. De hecho, las conclusiones son las mismas que en el correspondiente subapartado con *NDVI*. Por tanto, se concluye que la emisividad

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo homogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
<b>MODIS</b>					
<b>Promedio</b>	0,010 %	0,018 %	0,012 %	0,0014 %	-0,003 %
<b>Máximo</b>	0,13 %	0,14 %	0,12 %	0,04 %	0,015 %
<b>Mínimo</b>	-0,08 %	-0,09 %	-0,07 %	-0,03 %	-0,02 %

Tabla 5.14: Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal,  $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente homogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $\epsilon$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

térmica, calculada con el *WDVI* para un suelo radiométricamente homogéneo, es bastante estable frente a la atmósfera, como también lo era la cobertura vegetal.

#### 5.4.2. Suelo radiométricamente heterogéneo

En esta subsección se analiza el efecto de la atmósfera en la  $\epsilon$  para un suelo radiométricamente heterogéneo. Este cálculo se realiza según se describe en la sección 2.1 atendiendo a lo descrito en la sección 2.7.

La tabla 5.15 y la figura 5.17 muestran la diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , en función de la  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. La tabla compara, para un suelo radiométricamente heterogéneo, los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias. En el caso de un suelo heterogéneo, el promedio de diferencia de la  $\epsilon$  es del orden del 0,11 %, el máximo del 1,7 % y el mínimo es del orden del -0,5 %. Estos valores son mayores que en el caso de un suelo homogéneo del subapartado 5.4.1, pero mucho menores que en el correspondiente cálculo con *NDVI* de la subsección 4.3.2. Esta variación en la emisividad implica, según Becker (1987), una variación en la temperatura de entre +0,9 K y -0,3 K. Este resultado confirma que el uso de un índice como el *WDVI* mejora la obtención de la emisividad y, por tanto, la de la temperatura, respecto al uso del *NDVI* para tal fin.

A continuación, la tabla 5.16 muestra los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$  en función de la  $P_v$ , para las magnitudes promedio, máximo y mínimo. Se considera el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones para un suelo radiométricamente heterogéneo. La tabla apunta unos valores de variación de la emisividad térmica mucho

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)	
	MODIS
<b>Promedio</b>	0,11 %
<b>Máximo</b>	1,7 %
<b>Mínimo</b>	-0,5 %

Tabla 5.15: Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el  $WDVI$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

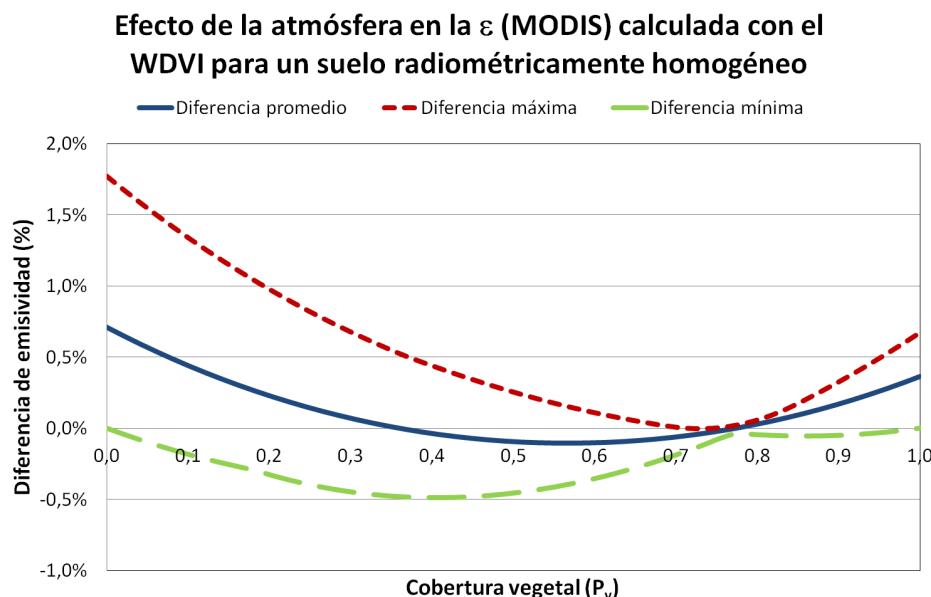


Figura 5.17: Diferencia porcentual en la  $\epsilon$  calculada con el  $WDVI$  por el efecto atmosférico para el sensor MODIS y un suelo radiométricamente heterogéneo. Promedio, máximo y mínimo en función de la  $P_v$ .

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)	
	MODIS
<b>Promedio</b>	$Q_1$ -0,09 %
	$Q_2$ 0,4 %
	$Q_3$ 1,4 %
<b>Máximo</b>	$Q_1$ 0,19 %
	$Q_2$ 0,6 %
	$Q_3$ 3 %
<b>Mínimo</b>	$Q_1$ -1,6 %
	$Q_2$ -1,0 %
	$Q_3$ -0,5 %

Tabla 5.16: Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de la distribución de diferencias de la  $\epsilon$ .

mayores que en el subapartado 5.4.1 y comparables al cálculo con *NDVI*.

Seguidamente, la tabla 5.17 muestra la diferencia porcentual en la emisividad térmica,  $\epsilon$ , clasificada en intervalos de  $P_v$ , por el efecto atmosférico para todas las muestras y simulaciones. Esta tabla compara los valores promedio, máximo y mínimo de la distribución, para cada intervalo de la  $P_v$  en un suelo radiométricamente heterogéneo. Los resultados tienen el mismo comportamiento que en el caso del *NDVI*, pero los valores son mejores que en aquel caso, lo que indica una menor dependencia con la atmósfera y el suelo del *NDVI* en el cálculo de la emisividad térmica.

$\Delta\epsilon$ - Efecto de la atmósfera (suelo heterogéneo)					
	$P_v$ muy baja	$P_v$ baja	$P_v$ media	$P_v$ alta	$P_v$ muy alta
MODIS					
<b>Promedio</b>	0,4 %	0,09 %	-0,08 %	-0,05 %	-0,19 %
<b>Máximo</b>	1,7 %	1,0 %	0,4 %	0,10 %	0,7 %
<b>Mínimo</b>	-0,3 %	-0,5 %	-0,5 %	-0,3 %	-0,05 %

Tabla 5.17: Diferencia porcentual en la emisividad térmica, calculada con el *WDVI*, por el efecto atmosférico para las muestras clasificadas por la cobertura vegetal,  $P_v$ , y todas las simulaciones en un suelo radiométricamente heterogéneo. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de la  $\epsilon$  para cada intervalo de cobertura vegetal.

En este subapartado se concluye que las variaciones de la emisividad térmica son importantes en general, ya que generan variaciones en la temperatura del orden del kelvin, aunque mejores al emplear el *WDVI* en sustitución del *NDVI*. Se concluye que la emisividad térmica para un suelo radiométricamente heterogéneo presenta importantes variaciones, al considerar el efecto atmosférico, que puede reducirse al emplear un índice de vegetación como el *WDVI*, que aporta información de la línea de suelo. Hay que señalar que la línea de suelo no siempre está disponible para aplicar el MCV, por lo que la operatividad de esta alternativa puede ser limitada si no es posible identificar suficientes muestras de un suelo desprovisto de vegetación como para calcular la línea de suelo.



# Capítulo 6

## Conclusiones

**RESUMEN:** En este último capítulo se presentan las conclusiones más relevantes del trabajo expuesto en la presente Memoria. Su finalidad es hacer balance de los objetivos marcados al principio, así como enfatizar las conclusiones fundamentales de la Tesis.

A modo de síntesis, exponemos a continuación las principales conclusiones de este Trabajo:

1. En esta Tesis se analiza cómo la corrección atmosférica en el dominio óptico puede ayudar en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico con el MCV y, por consiguiente, en la determinación de la temperatura. Se han revisado las hipótesis relacionadas con el uso de información del espectro óptico del MCV. Posteriormente, se ha propuesto una metodología para analizar el impacto de la atmósfera y el suelo en MCV, mediante simulaciones de transferencia radiativa y espectros de la bibliotecapectral para los sensores AVHRR, MODIS y MERIS, y se ha buscado una alternativa al *NDVI*. El análisis del efecto de la atmósfera se realiza para dos entornos de suelo y vegetación, entorno homogéneo y entorno heterogéneo, empleando como referencia los valores sin efecto atmosférico. Para el mejor índice alternativo se calcula también el efecto de la atmósfera para dos entornos de suelo y vegetación.
2. Las variaciones del índice de vegetación *NDVI* con la cobertura vegetal, entre las partes baja y alta de la atmósfera, no son en absoluto despreciables. Este comportamiento está ligado al efecto aditivo y proporcional de la atmósfera, a la interacción con los espectros de reflectividad de la vegetación y el suelo, y a la longitud de onda central e intervalo spectral de los canales implicados en su cálculo. El principal efecto atmosférico que reduce el valor del *NDVI* es la dispersión

por aerosoles, cuyo efecto es significativo a elevadas concentraciones de aerosoles y grandes ángulos cenitales de iluminación y observación. El índice de vegetación *NDVI* es muy inestable frente a todas estas variables.

3. Sin embargo, al emplear el *NDVI*, la sensibilidad espectral de los canales es poco importante a efectos de la  $P_v$  y la  $\epsilon$ . En este caso, la  $P_v$  presenta una variación apreciable en el caso de un suelo radiométricamente heterogéneo, mientras que es poco apreciable en el caso de un suelo radiométricamente homogéneo. Así, el comportamiento de la  $\epsilon$  es semejante al de la  $P_v$ , con una variación apreciable en el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, lo que implica leves variaciones en temperatura comprendidas entre +0,07 K y -0,04 K. Por su parte, en el caso heterogéneo, hay una importante variación de la  $\epsilon$  que implica importantes variaciones en temperatura de entre +2,5 K y -1,0 K. La radiometría de un suelo desprovisto de vegetación, sin la concurrencia del efecto atmosférico, afecta tanto a la  $P_v$  como a la  $\epsilon$ , con una variación en temperatura de entre +3 K y -0,3 K. De esto se concluye que la emisividad térmica es poco sensible a la atmósfera pero muy sensible a la radiometría del suelo.
4. El índice que muestra un mejor comportamiento frente al suelo, en esta Tesis, es el *WDVI*, ya que presenta las menores diferencias centradas en cero, junto al *PVI*. En el caso de emplear *WDVI*, tanto la  $P_v$  como la  $\epsilon$  se muestran menos sensibles que al emplear el *NDVI*, con una variación en la temperatura de entre +0,9 K y -0,2 K.
5. Las variaciones del índice de vegetación *WDVI* con la cobertura vegetal, entre la parte baja y alta de la atmósfera, son menores que las del *NDVI*, aunque no despreciables. Este comportamiento se justifica, como en el caso del *NDVI*, por el efecto aditivo y proporcional de la atmósfera y la interacción con los espectros de reflectividad de la vegetación y el suelo. Como en el caso del *NDVI*, el índice de vegetación *WDVI* es inestable frente a todos estos factores.
6. El efecto de la atmósfera en la  $P_v$  y la  $\epsilon$ , con las simulaciones atmosféricas y en los casos de un suelo radiométricamente homogéneo y heterogéneo, es inferior al correspondiente del *NDVI*. En el caso de un suelo radiométricamente homogéneo, implica leves variaciones en temperatura comprendidas entre 0,14 K y -0,09 K, mientras que en el caso heterogéneo implica variaciones en temperatura de entre +0,9 K y -0,2 K. Estos resultados con *WDVI* son mejores que los correspondientes con *NDVI*. En conclusión, se puede reducir la sensibilidad de la emisividad térmica a la atmósfera y a la radiometría del suelo

utilizando en el MCV un índice como el *WDVI*, principalmente por su menor sensibilidad al efecto del suelo.

7. Como conclusión final de la Tesis, cabe afirmar que la corrección atmosférica en el dominio óptico ayuda en la determinación exacta de la emisividad en el infrarrojo térmico con el MCV y, por tanto, en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre. La magnitud de esta mejora es función del sensor, de las condiciones atmosféricas y, especialmente, de la radiometría de los suelos presentes en la escena o imagen de estudio. La alternativa propuesta de emplear el índice *WDVI* en sustitución del *NDVI* en el MCV es especialmente útil para salir al paso de la variabilidad radiométrica del suelo. El *WDVI* también presenta una mejor capacidad de salvar el efecto de la atmósfera que el *NDVI*. Sin embargo, su uso operativo puede ser limitado en el caso de no disponer de la información necesaria para el cálculo de la línea de suelo. Por tanto, la elección del *NDVI* o de otro índice, como el *WDVI* aquí propuesto, dependerá de la información radiométrica disponible en la imagen. Por su parte, la necesidad de aplicar la corrección atmosférica dependerá de la complejidad que suponga la misma, tanto por la información disponible como por el coste computacional, puesto que su efecto es de orden inferior al de la variabilidad radiométrica del suelo desprovisto de vegetación en la imagen de teledetección.



# Bibliografía

- ARTIGAO, M. M. *Desarrollo de un modelo para la estimación de la evapotranspiración en cultivos de cobertura incompleta: aplicación al viñedo.* Tesis Doctoral, Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València, 2001.
- BALDRIDGE, A., HOOK, S., GROVE, C. y RIVERA, G. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113(4), páginas 711 – 715, 2009.
- BANNARI, A., ASALHI, H. y TEILLET, P. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, vol. 5, páginas 3053–3055. 2002.
- BARDUCCI, A. y PIPPI, I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the ldquo;grey body emissivity rdquo; method. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 34(3), páginas 681–695, 1996. ISSN 0196-2892.
- BARET, F., GUYOT, G. y MAJOR, D. J. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989. IGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1989 International*, vol. 3, páginas 1355–1358. 1989.
- BECKER, F. *Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology.* Balkema, 1980.
- BECKER, F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8(10), páginas 1509–1522, 1987.
- BECKER, F. y LI, Z.-L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, vol. 32(1), páginas 17 – 33, 1990. ISSN 0034-4257.

- BOLLE, H. y LANGER, I. Echival field experiment in a desertification-threatened area (EFEDA). Field experiment plan. Informe técnico, Meteorological Institute, Free University of Berlin, Germany, 1991.
- BOREL, C. C. Iterative retrieval of surface emissivity and temperature for a hyperspectral sensor. En *First JPL Workshop on Remote Sensing of Land Surface Emissivity*, páginas 1–5. 1997.
- CASELLES, V. y LÓPEZ-GARCÍA, M. J. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10(6), páginas 1127–1134, 1989.
- CASELLES, V. y SOBRINO, J. Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 29(2), páginas 135 – 146, 1989.
- CLEVERS, J. G. P. W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 25(1), páginas 53 – 69, 1988.
- COLL, C. *Un modelo operativo para la determinación de la temperatura de la superficie terrestre desde satélites*. Tesis Doctoral, Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València, 1994.
- COLL, C. y CASELLES, V. A split-window algorithm for land surface temperature from Advanced Very High Resolution Radiometer data: Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 102(D14), páginas 16697–16713, 1997.
- COLL, C., CASELLES, V., GALVE, J., VALOR, E., NICLÒS, R. y SÁNCHEZ, J. Evaluation of split-window and dual-angle correction methods for land surface temperature retrieval from ENVISAT/Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 111(D12), 2006.
- COLL, C., CASELLES, V. y SOBRINO, J. Desarrollo de un modelo de corrección atmosférica en el térmico I. Aplicación al canal 6 de Landsat. *Anales de Física*, vol. 88, páginas 1417–1434, 1992.
- COLL, C., CASELLES, V., VALOR, E., NICLÒS, R., SÁNCHEZ, J., GALVE, J. y MIRA, M. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces. *Remote Sensing of Environment*, vol. 110(2), páginas 162 – 175, 2007.
- COLL, C., VALOR, E., CASELLES, V. y NICLÒS, R. Adjusted normalized emissivity method for surface temperature and emissivity retrieval from optical and thermal infrared remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108 D23, páginas 2156–2202, 2003.

- COLL, C., VALOR, E., GALVE, J., MIRA, M., BISQUERT, M., GARCÍA-SANTOS, V., CASELLES, E. y CASELLES, V. Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, vol. 116(0), páginas 211 – 225, 2012. Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) Special Issue.
- CRIPPEN, R. E. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, vol. 34(1), páginas 71 – 73, 1990.
- ESA-EARTH-ONLINE. Envisat MERIS design web page. 2000.  
<http://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/meris/design>.
- GAO, B. C. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58(3), páginas 257 – 266, 1996.
- GILLESPIE, A., ROKUGAWA, S., MATSUNAGA, T., COHERN, J., HOOK, S. y KAHLE, A. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36(4), páginas 1113–1126, 1998.
- GILLESPIE, A. R. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS. En *Thermal Infrared Multispectral Scanner data user's workshop*, vol. 86-38, páginas 29–44. 1985.
- GITELSON, A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, vol. 161(2), páginas 165–173, 2004.
- GITELSON, A., KAUFMAN, Y., STARK, R. y RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, vol. 80(1), páginas 76–87, 2002.
- GOODY, R. M. *Atmospheric radiation 1, Theoretical basis*. Oxford University Press, Oxford, U.K., 1964.
- VAN DE GRIEND, A. A. y OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14(6), páginas 1119–1131, 1993.
- GUANTER, L. *New Algorithms for Atmospheric Correction and Retrieval of Biophysical Parameters in Earth Observation. Application to ENVISAT-MERIS data*. Tesis Doctoral, Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València, 2007.

- HARDISKY, M. A., KLEMAS, V. y SMART, R. M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of spartina alterniflora canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, páginas 77–83, 1983.
- HOLBEN, B. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, páginas 1417–1434, 1986.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25(3), páginas 295 – 309, 1988.
- IQBAL, M. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, 1983.
- JAGGI, S., QUATTROCHI, D. y BASKIN, R. An algorithm for the estimation of bounds on the emissivity and temperatures from thermal multispectral airborne remotely sensed data. En *Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, vol. 2, páginas 22–24. 1992.
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, vol. 50(4), páginas 663–666, 1969.
- KAHLE, A. B., MADURA, D. P. y SOHA, J. M. Middle infrared multispectral aircraft scanner data: analysis for geological applications. *Appl. Opt.*, vol. 19(14), páginas 2279–2290, 1980.
- KARNIELI, A., KAUFMAN, Y. J., REMER, L. y WALD, A. AFRI aerosol free vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 77(1), páginas 10 – 21, 2001.
- KAUFMAN, Y. y TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30(2), páginas 261–270, 1992.
- KAUTH, R. J. y THOMAS, G. S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. En *Laboratory for Applications of Remote Sensing Symposia 1976*, vol. 4B, páginas 41–51. 1976.
- LENOBLE, J. *Atmospheric radiative transfer*. Studies in geophysical optics and remote sensing. A. Deepak Pub., 1993. ISBN 9780937194218.
- LI, J., LI, J., WEISZ, E. y ZHOU, D. K. Physical retrieval of surface emissivity spectrum from hyperspectral infrared radiances. *Geophysical Research Letters*, vol. 34(16), 2007. ISSN 1944-8007.
- LI, Z., PETITCOLIN, F. y ZHANG, R. A physically based algorithm for land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal

- infrared data. *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 43(1), páginas 23–33, 2000. ISSN 1006-9321.
- LI, Z.-L. y BECKER, F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 43(1), páginas 67 – 85, 1993.
- LI, Z.-L., WU, H., WANG, N., QIU, S., SOBRINO, J. A., WAN, Z., TANG, B.-H. y YAN, G. Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34(9-10), páginas 3084–3127, 2013.
- LIANG, S., FALLAH-ADL, H., KALLURI, S., JÁJÁ, J., KAUFMAN, Y. J. y TOWNSHEND, J. R. G. An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 102(D14), páginas 17173–17186, 1997.
- LIU, H. Q. y HUETE, A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33(2), páginas 457–465, 1995.
- MA, X. L., WAN, Z., MOELLER, C. C., MENZEL, W. P. y GUMLEY, L. E. Simultaneous retrieval of atmospheric profiles, land-surface temperature, and surface emissivity from moderate-resolution Imaging Spectroradiometer Thermal Infrared data: extension of a two-step physical algorithm. *Applied Optics*, vol. 41(5), páginas 909–924, 2002.
- MA, X. L., WAN, Z., MOELLER, C. C., MENZEL, W. P., GUMLEY, L. E. y ZHANG, Y. Retrieval of geophysical parameters from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer thermal infrared data: evaluation of a two-step physical algorithm. *Applied Optics*, vol. 39(20), páginas 3537–3550, 2000.
- MALKMUS, W. Random lorentz band model with exponential-tailed s-1 line-intensity distribution function. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57(3), páginas 323–329, 1967.
- MARTINEZ, L., CASELLS, V., PALÀ, V. y VALOR, E. Emissivity errors in the vegetation cover method caused by the lack of atmospheric correction. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29(6), páginas 1825–1832, 2008.
- MELIÀ, J. *La teledeteció en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura*. Publicacions de la Universitat de València, 1991. ISBN 9788437008356.
- NASA. MODIS specification web page. 1999.  
<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.

- PERES, L. y DACAMARA, C. Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43(8), páginas 1834–1844, 2005. ISSN 0196-2892.
- PINTY, B. y VERSTRAETE, M. M. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, vol. 101, páginas 15 – 20, 1991.
- PONS, X. y SOLE-SUGRANES, L. A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 48(2), páginas 191 – 204, 1994.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R. y KERR, Y. H. Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, páginas 119–126, 1994.
- RICHARDSON, A. J. y WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, páginas 1541 – 1552, 1977.
- ROBEL, J. NOAA KLM user's guide web page. 2009.  
<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/index.htm>.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M. y BARET, F. Optimization of soil adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, vol. 55(2), páginas 95 – 107, 1996.
- ROUSE, J., HAAS, R., SCHELL, J., DEERING, D. y HARLAN, J. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Type III Final Report, NASA/GSFC, Grenbelt, MD, 1974. 371 pp.
- RUBIO, E., CASELLES, V. y BÁDENAS, C. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14  $\mu\text{m}$  wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59(3), páginas 490–521, 1997.
- RUBIO, E., CASELLES, V., COLL, C., VALOUR, E. y SOSPEDRA, F. Thermal?infrared emissivities of natural surfaces: improvements on the experimental set-up and new measurements. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24(24), páginas 5379–5390, 2003.
- RUNNING, S., JUSTICE, C. y SALOMONSON, V. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, páginas 2620 – 3587, 1994.
- SALISBURY, J. W. y D'ARIA, D. M. Emissivity of terrestrial materials in the 8 - 14  $\mu\text{m}$  atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, vol. 42(2), páginas 83 – 106, 1992.

- SÁNCHEZ, J. M. *Estimación mediante teledetección de la evapotranspiración real a partir de un modelo desacoplado de dos fuentes*. Tesis Doctoral, Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València, 2008.
- SNYDER, W. C., WAN, Z., ZHANG, Y. y FENG, Y.-Z. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19(14), páginas 2753–2774, 1998.
- SOBRINO, J. A. y RAISOUNI, N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21(2), páginas 353–366, 2000.
- SONG, C., WOODCOCK, C. E., SETO, K. C., LENNEY, M. P. y MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, vol. 75(2), páginas 230 – 244, 2001.
- STAENZ, K. y WILLIAMS, D. Retrieval of surface reflectance from hyperspectral data using a look-up table approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23(4), páginas 354–368, 1997.
- SUN, D. y PINKER, R. T. Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108(D11), páginas n/a–n/a, 2003. ISSN 2156-2202.
- TANRÉ, D., DESCHAMPS, P. Y., DEVAUX, C. y HERMAN, M. Estimation of saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 93(D12), páginas 15955–15964, 1988.
- VALOR, E. y CASELLES, V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, vol. 57(3), páginas 167 – 184, 1996.
- VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZE, J.-L., HERMAN, M. y MORCETTE, J.-J. *6S User Guide Version 2, July 1997*. University of Maryland and Laboratoire d'Optique Atmosphérique, 1997a.
- VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZE, J.-L., HERMAN, M. y MORCETTE, J.-J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35(3), páginas 675–686, 1997b.
- WAN, Z. y LI, Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35(4), páginas 980–996, 1997.

- WAN, Z. y SNYDER, W. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document, LST ATBD, version 3.2. Informe técnico, Meteorological Institute, Free University of Berlin, Germany, 1999.
- WANG, L. y QU, J. J. NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, vol. 34, página 20405, 2007.
- WATSON, K. Two-temperature method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment*, vol. 42(2), páginas 117 – 121, 1992. ISSN 0034-4257.

## Apéndice A

### Artículo publicado

#### Emissivity errors in the vegetation cover method caused by the lack of atmospheric correction

**RESUMEN:** El presente estudio fue publicado en el International Journal of Remote Sensing el mes de marzo de 2008. Esta revista tiene un factor de impacto para 2008 de 1,0 y era la 4<sup>a</sup> de las revistas de Tele-detección.



## Letter

### Emissivity errors in the vegetation cover method caused by the lack of atmospheric correction

L. MARTINEZ<sup>\*</sup>†, V. CASELLES‡, V. PALA† and E. VALOR‡

†Institut Cartogràfic de Catalunya, Parc de Montjuïc s/n, E-08038 Barcelona, Spain

‡Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, Dr. Moliner 50, E-46100 Burjassot, Spain

(Received 14 February 2007; in final form 24 November 2007)

The influence of the lack of atmospheric correction of the optical images used to calculate land surface emissivity (LSE) was assessed. When thermal emissivity is determined by the vegetation cover method (VCM), information from the solar spectrum is required to calculate the vegetation cover fraction. The atmospheric correction was obtained in this study by using a combination of the dark dense vegetation (DDV) method and the Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) code. The methodology was applied to a Landsat Thematic Mapper (TM) image of Tomelloso, Spain. We determined that the emissivity between 10 and 12 µm only increases by 0.4% (which represents a systematic error of approximately +0.2 K) when atmospherically corrected reflectances are used in relation to non-corrected Tomelloso scenes. Nevertheless, other test areas could yield larger differences.

#### 1. Introduction

Land surface temperature (LST) estimation by means of passive thermal remote sensing depends on accurate emissivity specification (Becker 1987). Land surface emissivity (LSE) measurement by remote sensing has the disadvantage that the temperature and emissivity cannot be calculated simultaneously because the number of unknown variables is always higher than the number of measurements. To overcome this, qualitative approximations are used, for example assuming a constant value of the emissivity for all bands or introducing a hypothesis such as relating emissivity to some of the vegetation variables. The vegetation cover method (VCM) developed by Valor and Caselles (1996) is based on the relationship between emissivity in the thermal infrared and the normalized difference vegetation index (NDVI) suggested by Van de Griend and Owe (1993). As a consequence, it is expected that the determination of thermal emissivity is affected to a certain extent by the interaction of the atmosphere with the solar radiation, which is the subject of this letter.

The atmospheric effect is sometimes not significant (Song *et al.* 2001), but this is not the general case. There are many procedures described in the literature for obtaining a reflectance free of atmospheric effects on multispectral satellite sensors. The most accurate are those based on both simultaneous in-field measurements of the atmospheric variables, such as aerosol optical thickness (AOT) in the study area,

---

\*Corresponding author. Email: lucas.martinez@icc.cat

and the use of a radiative transfer code (Bolle and Langer 1991). To do that, one of the most popular codes is the Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), described by Vermote *et al.* (1997). Nevertheless, intermediate and more operational solutions may also be adopted, such as the use of an atmospheric normalization method (Holben 1986, Caselles and López 1989) or the use of standard values for the atmospheric variables (Pons and Solé-Sugrañes 1994).

As mentioned, there are several atmospheric variables (such as the AOT) to be calculated or measured to apply a radiation transfer code. As a simultaneous AOT measurement is not usually available, there are several methods to determine it by means of remote sensing imagery. Many works reference the dark dense vegetation (DDV) approximation of Liang *et al.* (1997) and the contrast reduction (CD) of Tanré *et al.* (1998). The former is easy to apply, whereas the later was designed for a multitemporal case and therefore requires several images.

The aim of this study was to measure the influence of the atmospheric correction on the estimate of thermal emissivity with the VCM. A combination of the 6S and DDV methods was used, which proved to be operational and accurate, with no need to use data collected in field campaigns or multitemporal series.

## 2. Methodology

### 2.1 The VCM

The VCM is a model for the LSE of a pixel that provides the effective emissivity of a heterogeneous and rough surface,  $\varepsilon$ , as:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_V + \varepsilon_g (1 - P_V) + 4 \langle d\varepsilon \rangle P_V (1 - P_V) \quad (1)$$

where  $\varepsilon_v$  represents vegetation emissivity,  $P_V$  is the fractional vegetation cover,  $\varepsilon_g$  is bare soil emissivity and  $\langle d\varepsilon \rangle$  is the cavity term that is related to the radiance emitted indirectly through internal reflections occurring between crop walls and the ground (Valor and Caselles 1996). Emissivity values for vegetation and bare soil can be measured in the field (Rubio *et al.* 1996) or obtained from a database (Salisbury and D'Aria 1992).

Determination of the fractional vegetation cover is calculated using the NDVI, with the following expression (Valor and Caselles 1996):

$$P_V = \frac{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_G}\right)}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_G}\right) - K\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_V}\right)} \quad (2)$$

where  $NDVI_G$  and  $NDVI_V$  represent the minimal and maximum values of the NDVI image, respectively, which, provided that the area is large enough, will correspond with areas with no vegetation (bare soil) and with full vegetation coverage.

The  $K$  parameter for a Landsat TM set of bands is calculated as (Valor and Caselles 1996):

$$K = \frac{\rho_{4V} - \rho_{3V}}{\rho_{4G} - \rho_{3G}} \quad (3)$$

where  $\rho_{4V}$  and  $\rho_{3V}$  are the reflectances in the near-infrared (TM band 4) and in the red (TM band 3) for the area with full vegetation cover, and  $\rho_{4G}$  and  $\rho_{3G}$  the reflectances in the near-infrared and in the red for the area without vegetation (bare

soil). Valor and Caselles (1996) reported that the VCM error varies between 0.5% and 2.0%, depending on whether the values used for  $\varepsilon_g$  and  $\varepsilon_v$  are measured as field or global standard estimates.

## 2.2 The DDV and 6S methods

The absorption effect of the atmospheric gases and the dispersion effect of gases and aerosols are simulated by means of the 6S code. The system needs several input variables to characterize the atmosphere. The accuracy of the simulations of 6S depends on the quality of the atmospheric variables (Vermote *et al.* 1997).

The DDV method is based on the use of dark areas with dense vegetation, and the signal received by the sensor comes to a great extent from the atmosphere (Kaufman and Sende 1988). According to Ouaidrari and Vermote (1999), at the bottom of the atmosphere (BOA) for the DDV areas and using Landsat TM images, the reflectance in the blue ( $\rho^1_b$ ) can be calculated from the middle infrared reflectance ( $\rho^7_b$ ) using the following equation:

$$\rho^1_b = \frac{\rho^7_b}{4.3} \quad (4)$$

In the same way, the reflectance in the red ( $\rho^3_b$ ) can be calculated using the following expression:

$$\rho^3_b = \frac{\rho^7_b}{2.0} \quad (5)$$

The DDV method for the measurement of the AOT is shown graphically in figure 1. The following paragraphs describe the relationships between top of the atmosphere (TOA) and BOA reflectances with the aim of determining the AOT.

First, the DDV areas are selected, at the TOA image, using a simple reflectance threshold in the middle infrared (TM band 7). Then, a mean value of the reflectance in the middle infrared ( $\rho^7_t$ ) is calculated. The TOA reflectance value ( $\rho^7_t$ ) is corrected atmospherically with the 6S method using the clean atmosphere hypothesis (with no aerosol) to obtain an estimate of the DDV reflectance at the BOA for the middle infrared ( $\rho^7_{b'}$ ). With the reflectance at the BOA for the middle infrared ( $\rho^7_{b'}$ ) it becomes possible to estimate the DDV reflectance at the BOA for the blue and red channels, ( $\rho^1_{b'}$ ) and ( $\rho^3_{b'}$ ), using equations (4) and (5).

Then, using the estimate of reflectance at the BOA for the blue and red channels, ( $\rho^1_{b'}$ ) and ( $\rho^3_{b'}$ ), it is possible to simulate blue and red TOA reflectances ( $\rho^1_t$  and  $\rho^3_t$ ) for a series of aerosol AOT values at  $\lambda=550$  nm by means of the 6S code. Next, the reflectances at the TOA for the DDV areas and the corresponding AOTs at  $\lambda=550$  nm are tabulated for each channel (blue and red). In the tables calculated previously, the reflectances of the DDV in the blue ( $\rho^1_t$ ) and red ( $\rho^3_t$ ) at the TOA and other AOT values are interpolated.  $\tau_1$  represents the AOT at  $\lambda=550$  nm obtained with the blue channel, and  $\tau_3$  that of the red one. Finally, as  $\tau_1$  and  $\tau_3$  are two estimates of the same parameter (AOT at  $\lambda=550$  nm), they are expected to be identical.

Once the AOT at  $\lambda=550$  nm is calculated by means of the DDV method, the next step is to perform the atmospheric correction of the imagery. This is done with the 6S method, using the AOT value obtained before.

Kaufman *et al.* (1997) reported that the accuracy of the DDV method for the measurement of the AOT was estimated as  $\pm 0.06 \text{ m}^{-1}$ . The absolute error of the

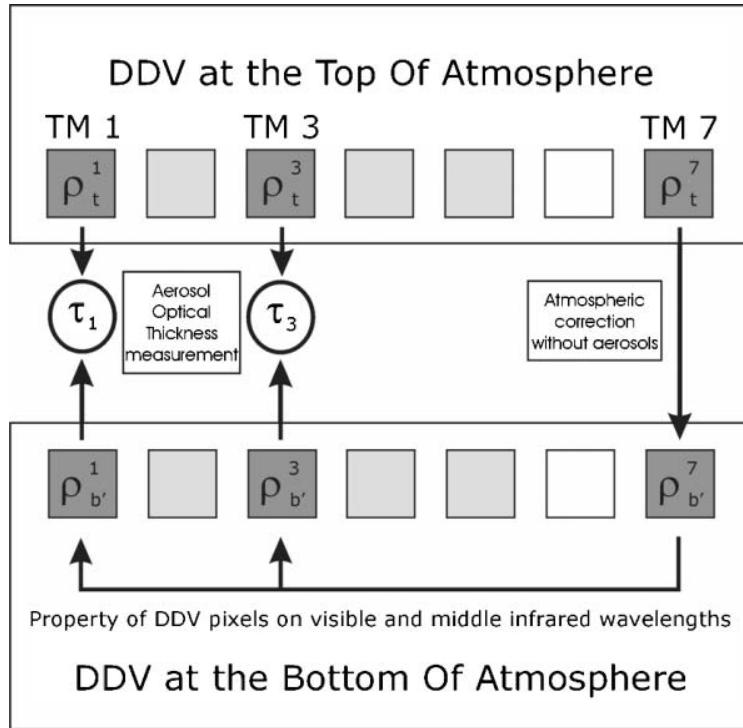


Figure 1. Procedure for the measurement of aerosol optical thickness (AOT) using the 6S and DDV methods. DDVs TOA middle infrared reflectance is atmospherically corrected without aerosols and provides an estimation of the BOA blue and red reflectances. These BOA reflectances are compared with the actual TOA blue and red reflectances by using a radiative transfer code to yield an estimation of the AOT at 550 nm.

reflectance calculated using the aforementioned combination of 6S and DDV was estimated as  $\pm 0.015$  for the visible channels and  $\pm 0.08$  in the near infrared, according to Ouaidrari and Vermote (1999).

### 3. Results

The methodology described was applied to a scene in the Tomelloso area, which is located in the northeastern end of the province of Ciudad Real (Spain), in what can be considered the centre of the natural region of La Mancha. It is a fairly uniform area, at approximately 670 m above sea level, without significant differences in height. The landscape is arid, with little woodland and vineyard plantations. The climate is Mediterranean with continental features; the middle temperature ranges from 5°C in the coldest month to 26°C in the warmest, with a mean annual precipitation of 350 mm (Artigao *et al.* 2005). In the Tomelloso area in Ciudad Real,

for the interval 10–12  $\mu\text{m}$ , field measurements by Artigao *et al.* (2005) yielded  $\varepsilon_g=0.975$  and  $\varepsilon_v=0.987$ , and the cavity term was estimated as  $\langle d\varepsilon \rangle=0.011$  from field measurements of the vegetation geometry.

The atmospheric correction method proposed was applied to a Landsat 5 TM image subscene ( $1124 \times 1124$  pixels) taken on 23 August 1994 at 10:05 GMT and centred at geographical coordinates 2.9195 W and 39.1256 N (WGS84 geodetic data), as shown in figure 2. This image is simultaneous to the field data acquisition of Artigao *et al.* (2005). First, the DDV areas in the image were selected using an adequate reflectance threshold for DDVs of 0.1 in the middle infrared TOA reflectance. The mean reflectances and the standard deviations for the whole set of selected DDV areas at the TOA were  $\rho^7_t=0.088 \pm 0.006$  (TM 7, middle infrared),  $\rho^1_t=0.122 \pm 0.004$  (TM 1, blue) and  $\rho^3_t=0.082 \pm 0.005$  (TM 3, red).

The reflectance for the middle infrared was corrected atmospherically using the 6S code considering an atmosphere with no aerosol, and it was found that at the BOA,  $\rho^7_{b'}=0.100 \pm 0.006$  (TM 7, middle infrared). Next, by means of equations (4) and (5) we determined that at the BOA,  $\rho^1_{b'}=0.0233 \pm 0.0014$  (TM 1, blue) and  $\rho^3_{b'}=0.050 \pm 0.003$  (TM 3, red).

Then the AOT was obtained. For this purpose, table 1 was elaborated by using the 6S code. By linear interpolation of the table the result was  $\tau_1=0.369 \pm 0.011$  and  $\tau_3=0.37 \pm 0.02$ . The small difference between both values shows that the aerosol and atmosphere models selected were suitable.

Afterwards, the red and near-infrared channels were atmospherically corrected with the 6S code. For this purpose, a table search procedure and subsequent linear interpolation for each image pixel was implemented.

To analyse the effect of the atmospheric correction on the thermal emissivity values, the subscenes A and B of figure 2 were used. They do not include urbanized areas or road links, and the existing water has been blacked out for convenience. Based on the NDVI histogram, first a pixel was identified as pure soil and another

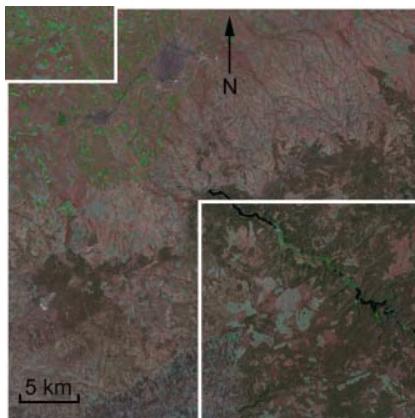


Figure 2. Tomelloso test area in Ciudad Real (Spain). Image centre coordinates 39.1256 N and 2.9195 W (WGS84 geodetic data). Landsat TM RGB image of the area on 23 August 1994 at 10:05 GMT (subscene A: upper left corner; subscene B: lower right corner).

Table 1. Estimate of the aerosol optical thickness (AOT) at 550 nm by DDV methodology.

AOT at 550 nm ( $\text{m}^{-1}$ )	TOA blue reflectance $\rho_t^1$	TOA red reflectance $\rho_t^3$
0.4389	0.1276	0.0854
0.4067	0.1248	0.0838
0.3794	0.1225	0.0826
0.3559	0.1206	0.0815
0.3354	0.1189	0.0806
0.3174	0.1175	0.0798

one as pure vegetation; this was done for the subscenes of the reflectance images at the TOA and at the BOA. With these bare land and vegetation pixels, the reflectance in the red and near-infrared was measured, as well as the corresponding NDVIs. Then the proportion of vegetation and thermal emissivity was calculated using equations (2) and (1), respectively. Table 2 shows the results obtained.

Table 3 shows the variation of several quantities with and without the atmospheric correction of the VCM method: although the reflectances in the red and near-infrared, the vegetation index and fractional vegetation cover vary substantially, the thermal emissivity only increases by 0.4%. Nevertheless, according to Becker (1987), this increase causes a systematic error of approximately +0.2 K in the temperature value.

The uncertainty of the vegetation cover does not cause a large systematic error in the emissivity and the corresponding temperature value. This is because the vegetation and ground emissivities for the area studied are close. A doubling of the increase obtained would result in 0.8% in terms of emissivity and a systematic error of approximately +0.4 K in the temperature value (Becker 1987). Those differences could be generated by using the same uncertainty of the vegetation cover and vegetation emissivity but with a smaller value for the ground emissivity. On this hypothesis the required ground emissivity value would be  $\varepsilon'_g = 0.935 \pm 0.005$ . This emissivity value is realistic for these grounds and illustrates that other test areas could generate larger differences.

#### 4. Conclusions

In this letter the 6S and DDV methods are combined to implement an operational atmospheric correction procedure for the effects of the emissivity calculations. The method has been applied to a Landsat TM subscene in the Tomelloso area (Ciudad

Table 2. Mean values for the subscenes A and B of the red and near-infrared reflectance, NDVI, fractional vegetation cover and thermal emissivity at the top (TOA) and bottom of the atmosphere (BOA). Despite the large variability in fractional vegetation cover, it has a minimum impact on 10–12  $\mu\text{m}$  emissivity for the test area.

	Red reflectance (TM 3)	Near-infrared reflectance (TM 4)	NDVI	Fractional vegetation cover ( $P_v$ )	Thermal emissivity
Subscene A					
TOA	$0.21 \pm 0.05$	$0.44 \pm 0.07$	$0.35 \pm 0.11$	$0.15 \pm 0.16$	$0.978 \pm 0.006$
BOA	$0.23 \pm 0.06$	$0.52 \pm 0.08$	$0.39 \pm 0.12$	$0.24 \pm 0.19$	$0.981 \pm 0.005$
Subscene B					
TOA	$0.17 \pm 0.05$	$0.33 \pm 0.08$	$0.33 \pm 0.05$	$0.20 \pm 0.07$	$0.981 \pm 0.003$
BOA	$0.18 \pm 0.07$	$0.39 \pm 0.09$	$0.39 \pm 0.08$	$0.31 \pm 0.11$	$0.985 \pm 0.004$

Table 3. Variation in reflectance, NDVI,  $P_v$ , emissivity and temperature when using atmospherically corrected reflectances in the emissivity estimate with the VCM.

	Increase
Red reflectance (TM 3) (%)	8
Near-infrared reflectance (TM 4) (%)	18
NDVI (%)	15
$P_v$ (%)	58
Emissivity (%)	0.4
Temperature (K)	0.2

Real, Spain). The vegetation index and proportion showed a substantial increase when using atmospherically corrected reflectances but only a 0.4% increase was detected in the emissivity. Nonetheless, this increase causes a systematic error in the temperature measurement of approximately +0.2 K. Finally, it is concluded that other test areas could yield larger differences in the emissivity when using atmospherically corrected reflectances.

#### Acknowledgements

We thank Drs Eva María Rubio and María del Mar Artiago of Castilla La Mancha University for the information provided on the Tomelloso image, and Dr Eric F. Vermote of Maryland University for his explanations concerning the atmospheric correction.

#### References

- ARTIGAO, M.M., RUBIO, E.M. and CASELLES, V., 2005, Actual evapotranspiration in a vineyard of Spain. In *Recent Research Developments in Thermal Remote Sensing*, V. Caselles, E. Valor and C. Coll (Eds), pp. 135–155 (Kerala: Research Signpost).
- BECKER, F., 1987, The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperatures from a satellite. *International Journal of Remote Sensing*, **8**, pp. 1509–1522.
- BOLLE, H.J. and LANGER, I., 1991, *Echival Field Experiment in a Desertification-threatened Area (EFEDA)* (Germany: Meteorological Institute, Free University of Berlin).
- CASELLES, V. and LÓPEZ, M.J., 1989, An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, pp. 1127–1134.
- HOLBEN, B.N., 1986, Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, pp. 1417–1434.
- KAUFMAN, Y.J. and SENDRA, C., 1988, Algorithm for automatic corrections to visible and near-infrared satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **9**, pp. 1357–1381.
- KAUFMAN, Y.J., WALD, A.E., REMER, L.A., GAO, B.C., LI, R.R. and FLYNN, L., 1997, The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  channel – correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35**, pp. 675–686.
- LIANG, S., FALLAH-ADL, H., KALLURI, S., JAJA, J., KAUFMAN, Y. and TOWNSHEND, J., 1997, An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over land. *Journal of Geophysical Research*, **102**, pp. 173–186.
- OUAIDRARI, H. and VERMOTE, E., 1999, Operational atmospheric correction of Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, **70**, pp. 4–15.
- PONS, X. and SOLÉ-SUGRAÑES, L., 1994, A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, **48**, pp. 191–204.

- RUBIO, E., CASELLES, V. and BADENAS, C., 1997, Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14  $\mu\text{m}$  waveband: analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, **59**, pp. 490-521.
- SALISBURY, J.W. and D'ARIA, D.M., 1992, Emissivity of terrestrial materials in the 8-14  $\mu\text{m}$  atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, **42**, pp. 83-106.
- SONG, C., WOODCOCK, C.E., SETO, K.C., LENNEY, M.P. and MACOMBER, S.A., 2001, Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, **75**, pp. 230-244.
- TANRÉ, D., DESCHAMPS, P.Y., DEVAUX, C. and HERMAN, M., 1988, Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data. *Journal of Geophysical Research*, **93**, pp. 15955-15964.
- VALOR, E. and CASELLES, V., 1996, Mapping land surface emissivity from NDVI: applications to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, **57**, pp. 167-184.
- VAN DE GRIEND, A.A. and OWE, M., 1993, On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, pp. 1119-1131.
- VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J.L., HERMAN, M. and MORCRETTE, J.J., 1997, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35**, pp. 675-686.