

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

1.1. La teledetecció en l'estudi de la superfície terrestre

Les dades obtingudes des de satèl·lits artificials amb sensors òptics de resolucions mitjanes han esdevingut una font d'informació important en el camp de la dinàmica de la biosfera a escales tant regionals com globals. De fet, a aquestes escales, les observacions des de satèl·lit constitueixen l'única font d'informació útil per al monitoreig amb prou periodicitat de la superfície terrestre, amb una resolució uniforme i uns costos assumibles (Li i Garand, 1994).

Entendre els processos d'escala global i els fenòmens que modifiquen l'ambient terrestre ha esdevingut un requeriment bàsic de la comunitat científica. Tradicionalment, les disciplines de les ciències de la Terra han generat productes amb un ús limitat en els estudis integrals del planeta, ja que es tractava de productes cartogràfics, els quals s'elaboren a escales massa petites i presenten problemes d'uniformitat en la nomenclatura i la metodologia d'elaboració (Ehrlich *et al.*, 1994).

L'informe número 20 del *International Geosphere-Biosphere Program* (IGBP) (Townshend, 1992), destaca la importància de la base de dades del sensor satel·lital AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration* dels Estats Units) per als estudis globals de classificació de la cobertura terrestre, la modelització dels processos terrestres a escala global i per al seguiment dels processos de superfície. Encara que el NOAA-AVHRR presenta una sèrie de limitacions, fins fa poc ha estat l'únic sensor d'abast global amb prou resolució temporal per al seguiment de fenòmens terrestres a escala global, amb una àmplia utilització de les seves dades des de fa ja més d'una dècada (Holben, 1986; Tanré *et al.*, 1992; Gutman, 1994; Cihlar, 1996).

1.2. Estimació de paràmetres de superfície amb teledetecció

Paràmetres geofísics com l'albedo, l'emissivitat o la temperatura de superfície són necessaris en models de transferència radiativa, models numèrics de predicció meteorològica o models de clima global. A la Taula 1.1 es presenta un resum de diverses aplicacions dels principals paràmetres de superfície. Malgrat que a través de la teledetecció no es pugui fer una mesura real dels diferents paràmetres de la superfície

terrestre, les imatges de satèl·lit són el millor recurs, sinó l'únic, per estimar-los en extenses zones (fins i tot a nivell planetari) i amb certa periodicitat (Moody i Strahler, 1994; Cihlar *et al.*, 1998).

Taula 1.1. Aplicacions dels paràmetres geofísics de superfície, adaptat de Cihlar *et al.* (1999a)

Paràmetres/Aplicació	Pronòstic numèric	Clima	Dinàmica		Monitoreig	
			Estacional-Interanual	Foc	Sequera/Desertificació	Inundacions
Albedo	X	X		X		X
Temperatura de superfície	X	X	X	X		
Emissivitat	X	X	X	X		
Humitat del sòl	X	X			X	X
Fracció de vegetació activa			X	X	X	
Evapotranspiració					X	X

Els paràmetres de superfície es poden mesurar *in situ*, amb l'aparell adequat, però aquestes mesures no es fan de forma rutinària i tampoc solen fer-se per a zones extenses. Per tal d'obtenir mapes d'aquests paràmetres geofísics per a regions més extenses, s'acostuma a emprar mapes d'usos del sòl, assignant a cada categoria un valor mesurat, com és el cas de l'albedo de la figura 1.1.

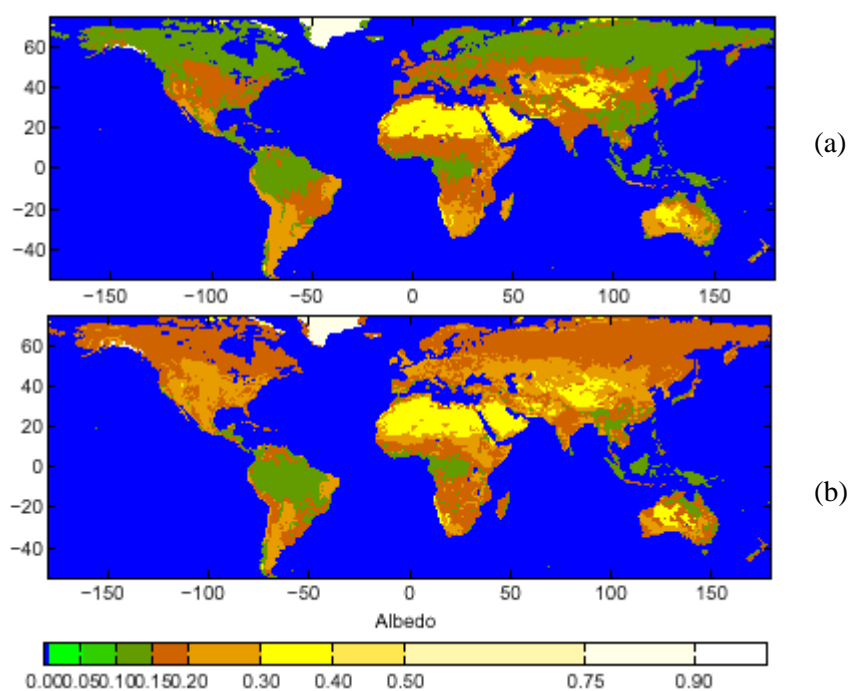


Figura 1.1. Albedo segons Matthews (1983) adaptat de Cabot (1995): (a) Hivern (b) Estiu.

Si es pensa en aplicacions climàtiques, com els models de circulació atmosfèrica global, cal disposar de mapes d'aquests paràmetres a nivell planetari. Abans de les dades de satèl·lit, l'albedo global s'havia estimat a través de mapes de vegetació (Matthews, 1983; Wilson i Henderson-Sellers, 1985). Aquestes primeres estimacions, al derivar-se de mapes d'usos del sòl, presenten una sèrie de limitacions:

- Es considera que la superfície terrestre es pot fraccionar en un conjunt limitat de tipus de superfície, doncs cal acotar la llegenda de qualsevol classificació a un nombre manejable de categories.

- Una mesura realitzada en un lloc suposadament representatiu d'una categoria és fa extensiva a totes les superfícies de la mateixa categoria.
- L'albedo d'un lloc determinat, no depèn de la radiació incident, sinó de la categoria del mapa.

L'interès de les imatges satel·litàries en l'estimació de paràmetres geofísics de superfície és doble; a part d'una estimació puntual en el temps del paràmetre, la periodicitat en l'adquisició d'imatges d'una mateixa zona fa que es puguin fer estimacions estacionals, mensuals o fins i tot de períodes més curts de temps, podent així fer un seguiment de la variació d'aquests paràmetres al llarg del temps.

La gamma de processos i requisits dels mesuraments té una conseqüència directa sobre les observacions que es volen fer des de plataformes satel·litàries i sobre els instruments de mesura que cal embarcar en aquestes plataformes. Hi ha una relació directa i inversa entre la qualitat de les mesures que pot fer un sensor (resolució espacial i radiomètrica) i la repetitivitat (resolució temporal) de les observacions (vegeu figura 1.2). En la gamma de possibles combinacions, els satèl·lits geostacionaris com el METEOSAT i el METEOSAT de segona generació (MSG, *Meteosat Second Generation*) ocupen l'extrem de la màxima repetitivitat, amb imatges cada mitja hora però amb una resolució espacial per sobre del quilòmetre, mentre que a l'altre extrem hi trobem sensors com el *Thematic Mapper* (TM) de LANDSAT o HRV de SPOT, amb una repetitivitat molt baixa, però amb una resolució espacial de fins a 10-15 metres en els canals pancromàtics. En l'espai mig es troben sensors com el AVHRR de NOAA o el VEGETATION de SPOT, amb períodes de revisita que teòricament són d'uns 10 dies, però que a la pràctica aporten dades d'una mateixa localització cada dia, encara que amb diferents angles de visió.

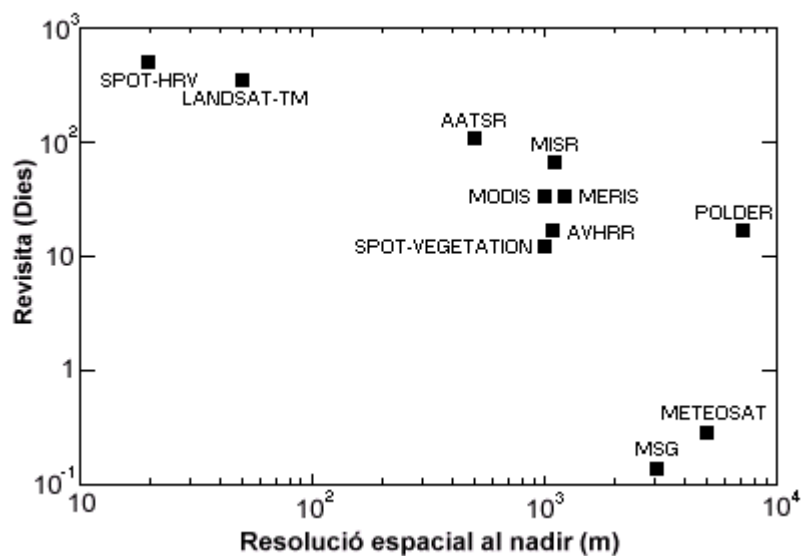


Figura 1.2. Relació entre la resolució espacial i temporal de diferents sensors satel·litars. El període de revisita està calculat per latituds mitjanes. La resolució espacial correspon al punt de la superfície que es troba en la vertical del satèl·lit. Adaptat de Cihlar *et al.* (1999a).

Les prestacions del sensor AVHRR en l'estimació de paràmetres de la superfície terrestre han portat a la construcció de mitjans més sofisticats en el camp dels sensors òptics de resolució mitjana, com el SeaWiFS, operatiu des de l'any 1997; el sensor VEGETATION, embarcat en la plataforma SPOT, llançada l'any 1998; el MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) i el MISR (*Multiangl Imaging SpectroRadiometer*), que són els primers sensors dissenyats per la NASA (*National Aeronautical*

and Space Administration dels Estats Units) en el camp dels sistemes d'observació de la terra (*EOS* en anglès, *Earth Observation Systems*), embarcats en la plataforma TERRA i operativa des de 1999; i finalment els sensors MERIS (*MEdium Resolution Imaging Spectrometer Instrument*) i AATSR (*Advanced Along Track Scanning Radiometer*) del satèl·lit ENVISAT de l'Agència Espacial Europea (*ESA, European Space Agency*), que va ser llançat el setembre de 2001.

El desenvolupament i manteniment d'un sistema operacional de processament d'imatges, necessari per al seguiment de l'evolució dels paràmetres de superfície, requereix un considerable esforç, si es volen obtenir uns paràmetres amb unes mínimes garanties de qualitat per tal d'incorporar-los a les aplicacions que es vulguin. Els principals problemes que es donen a l'hora d'enregistrar imatges des de 700-800 km són la presència de núvols, les condicions variables de l'atmosfera i la posició canviant al llarg del dia del sol. Els núvols cobreixen més del 50% de la superfície terrestre en qualsevol moment (Li i Garand, 1994), i el primer procés necessari és eliminar la contaminació de les imatges per núvols, que bàsicament es pot solucionar amb les imatges de síntesi, imatges lliures de núvols que s'obtenen combinant les zones sense núvols de les imatges d'una sèrie de dies.

Per tal d'aconseguir un sistema operatiu de processament, a la pràctica es tendeix a simplificar els algorismes de processat, obtenint resultats qualitatius i no quantitius. Si es volen resultats que es puguin considerar quantitius, per poder-los aplicar, per exemple, en el seguiment de la fenologia vegetal, caldrà incloure en la cadena de processament un seguit de correccions necessàries per obtenir uns resultats de prou qualitat.

1.2.1. Les imatges satel·litàries de síntesi

A nivell d'escala regional, els núvols sempre són presents a les imatges. Les tècniques de composició (o de síntesi) es fan servir per obtenir imatges sense núvols en períodes de diversos dies, durant els quals es considera que les condicions de superfície són invariants. Se solen usar períodes de 10 dies, en els quals els canvis en les condicions de superfície són inapreciables per als sensors de resolucions mitjanes (Roujean *et al.*, 1992) com en els casos de les imatges S_{10} de SPOT-VEGETATION (vegeu figura 1.3).

Encara que nominalment aquestes imatges es consideren lliures de núvols, sempre tenen píxels contaminats. Així com els píxels totalment coberts per núvols són fàcilment identificables, el problema rau en els píxels parcialment coberts per núvols. Altres fonts de soroll són les variacions angulars que es produeixen en les mesures de reflectivitat, producte dels canvis al llarg de l'any en la geometria Sol-superfície-sensor.

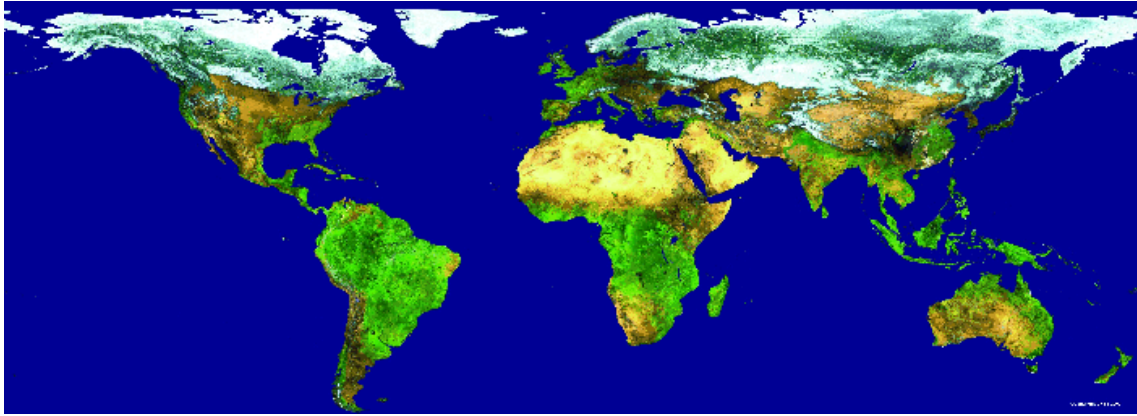


Figura 1.3. Imatge global de síntesi de deu dies (S_{10}) obtinguda amb el SPOT-VEGETATION, corresponent al període del 21 al 31 de març de 1999. Imatge en fals color amb la combinació RGB: Infraroig mitjà, infraroig proper i vermell.

1.3. Els paràmetres geofísics en els models meteorològics

El correcte tractament de les propietats físiques de la superfície terrestre cada cop és més important en els models meteorològics, a mesura que aquests treballen a escales de més detall. Certs paràmetres geofísics són importants en els models meteorològics ja que intervenen en els processos de circulació atmosfèrica i cal que les condicions de simulació siguin el més semblants a les reals per tal d'obtenir bones simulacions (Chen i Dudhia, 2001). Models de mesoescala¹ actuals com el MM5 o el MASS incorporen els paràmetres de superfície amb un esquema simple que assigna el paràmetre en funció de l'ús del sòl i de l'estació de l'any.

Un dels objectius del IGBP és la millora de la caracterització de la superfície en els models numèrics a través de la teledetecció (Gutman, 1994). Les reflectivitats en el visible i l'infraroig proper, i les emissions en el tèrmic mesurades amb sensors remots han de servir per determinar els paràmetres de superfície dels models que no es poden obtenir amb observacions convencionals, així com per a validar les parametritzacions que fan els models climàtics globals (GCNM, *Global Climate Numerical Models*).

1.3.1. Paràmetres de superfície en els models meteorològics

La capa superficial del sòl és la que interacciona directament amb l'atmosfera i és el medi on es produeix un intercanvi energètic. Aquest intercanvi de fluxos varia en funció de les característiques de la superfície, representades als models meteorològics a través de certes variables, essent les més usuals les que es detallen tot seguit.

1.3.1.1. Albedo

L'albedo (α) representa el valor mitjà de reflectància en superfície (integrat per a tots els angles de la hemisfera que cobreix cada punt del terreny) de la radiació solar incident, per al conjunt de l'espectre solar (0,3 a 3-4 μm).

¹ Els sistemes o pertorbacions atmosfèriques es classifiquen en diferents escales segons les seves característiques espai-temps. Vegeu la Taula 6.1 per a més detalls.

1.3.1.2. Emissivitat

L'emissivitat (ϵ) de la superfície terrestre és la mesura de l'eficiència inherent de la superfície per convertir l'energia calorífica en energia radiant fora de la superfície. Depèn en gran mesura de la composició, rugositat i humitat del sòl. És un paràmetre necessari per l'estimació de la temperatura de la superfície terrestre.

1.3.1.3. Humitat

La humitat del sòl (o contingut d'aigua al sòl) es defineix com la massa o volum d'aigua per unitat de massa o volum de sòl sec. Aquest paràmetre és un dels més importants a l'hora de modelar els intercanvis entre l'atmosfera i el sòl, però també és un dels més complicats de calcular. Amb tècniques de teledetecció òptica només es pot estimar indirectament, doncs no hi ha relació física directa entre les mesures i la humitat del sòl. La temperatura de la superfície n'és un indicador, encara que si la cobertura no és homogènia (sòls nus o cobertures vegetals totals) la relació no és tant directa, i malauradament en la majoria de casos les cobertures del sòl no són homogènies, sobretot en els nostres paisatges mediterranis, típicament molt fragmentats.

1.3.1.4. Inèrcia tèrmica

La inèrcia tèrmica (P) expressa la resistència d'un material a les variacions de temperatura. Si hom es refereix a la superfície terrestre, s'entén P com una mesura de la resposta tèrmica de la superfície a un subministrament d'energia per part del Sol. La humitat en superfície té una forta dependència de la inèrcia tèrmica i aquesta és útil per poder-la estimar indirectament.

1.3.1.5. Rugositat

La rugositat (més concretament la longitud aerodinàmica de rugositat, Z_0) de la coberta terrestre es defineix com l'alçada (en metres) sobre el nivell del terra on la velocitat del vent esdevé nul·la per l'efecte de la vegetació (o altres objectes com les construccions a la ciutat).

1.4. Presentació de l'estudi

1.4.1. Motivacions

En aquest treball s'ha volgut establir una metodologia per tal de calcular els paràmetres geofísics de la superfície terrestre més comuns, els quals tenen aplicacions en el camp de la meteorologia i la climatologia. S'ha buscat un mètode alhora pràctic, en el sentit de que tingui una fàcil implementació operativa, i amb el màxim rigor i precisió en els resultats, factors que sovint venen limitats per la capacitat computacional i les dades disponibles. S'ha integrat tots els processos en el mateix programari, amb l'objectiu d'obtenir un sistema de fàcil gestió per al processat quasi-automàtic d'imatges AVHRR.

El treball de tesi doctoral es deriva de les tasques realitzades pel doctorant dins del projecte IMPACTE, concretament de l'objectiu quatre (vegeu detalls al quadre 1.1). IMPACTE és un projecte d'investigació

que va reunir grups de treball de diferents universitats catalanes (UPC, UB, UAB, UdG, URV) i centres d'investigació (IEEC, CREAM), els quals durant tres anys van intercanviar resultats i coneixement amb l'objectiu d'integrar diferents metodologies per a la modelització i previsió de la contaminació ambiental.

Els grups d'investigació que treballen amb models numèrics relacionats amb la meteorologia o la climatologia no sempre estan al dia de les possibilitats que ofereix la teledetecció a l'hora d'establir les característiques físiques de la superfície en un moment donat. En aquest sentit, la sinergia entre grups del projecte IMPACTE va resultar molt positiva, doncs es van integrar els resultats obtinguts del tractament de les imatges de satèl·lit en els models numèrics per mirar de millorar-ne les simulacions. Aquests resultats es presenten al capítol VI.

La part del tractament d'imatge i obtenció de paràmetres de superfície es va desenvolupar en el grup de treball del Departament de Física Aplicada de la UPC a Manresa, sota la direcció del Dr. Joan Jorge Sánchez. La integració de les dades en el model de mesoescala MM5 es va realitzar en el Laboratori de Modelització Ambiental del Departament de Projectes d'Enginyeria, de la ETSEIB (UPC), en col·laboració amb el doctorant Oriol Jorba Casellas i sota la direcció del Dr. José M. Baldasano Recio.

1.4.2. Objectius

Aquest treball, d'una banda, té un enfocament de caire general centrat en definir una metodologia de processament d'imatges a partir d'una revisió bibliogràfica. Per altra banda, també té uns objectius específics, centrats en l'obtenció de paràmetres de superfície per un any concret així com en l'aplicació dels mateixos en el camp de la simulació numèrica. Concretant, els objectius del treball són:

- Establir una metodologia operacional per l'obtenció periòdica de paràmetres geofísics de superfície.

Els paràmetres a calcular a partir d'imatges satel·litàries del sensor AVHRR són: l'albedo, l'emissivitat, l'índex de vegetació NDVI, la temperatura de superfície i la inèrcia tèrmica. Una revisió metodològica extensa sobre les diverses opcions de processat de les imatges ha de permetre configurar una metodologia operacional de processament, des de la recepció fins a obtenir imatges corregides, de les quals es deriven els paràmetres de superfície esmentats.

- Obtenir resultats per al període d'un any per a Catalunya, per poder caracteritzar l'evolució anual de les propietats físiques de la superfície.

Un cop establerta la metodologia operacional, el processament de les imatges AVHRR de l'any 2000 ha de permetre obtenir els paràmetres de superfície, amb una periodicitat mensual, de la zona d'estudi. A part de les imatges resultants, és necessari un tractament estadístic per tal d'obtenir resultats numèrics, relacionant els paràmetres de superfície amb els usos del sòl.

- Integrar els resultats en els models meteorològics de mesoescala per tal de millorar-ne les prestacions.

Els models numèrics de pronòstic del temps fan servir dades climàtiques globals de la superfície terrestre per tal d'establir les condicions de superfície de la zona i període de temps a simular. La introducció de dades locals ha de permetre definir millor les condicions d'inici i així millorar els resultats d'aquests models. Concretament, es vol modificar el mapa d'usos de sòl i les taules d'assignació dels paràmetres de superfície del model de mesoescala MM5, per veure com afecta a les simulacions meteorològiques per Catalunya.

1.4.3. Estructura del document

El treball s'estructura en 7 capítols. En el primer capítol es presenta l'ús de la teledetecció en l'estimació de paràmetres de superfície, l'interès que tenen aquests paràmetres en diferents disciplines científiques, així com els problemes i limitacions que tenen les dades satel·litàries en el càlcul de paràmetres de superfície.

El segon capítol s'ocupa de la descripció de les dades que s'han fet servir al llarg del treball, del programari i del maquinari emprats.

El tercer capítol s'ocupa en detall del procés d'obtenció dels paràmetres de superfície, fent una revisió de les metodologies usades per el seu càlcul. Es tracta la calibració de les imatges, la correcció angular, la correcció atmosfèrica i les diverses metodologies proposades per l'estimació dels paràmetres geofísics de superfície.

Al quart capítol es presenta el processat de les imatges segons la metodologia triada, fins a l'obtenció dels paràmetres de superfície per a la sèrie d'imatges NOAA-AVHRR de l'any 2000.

Al capítol cinquè es desenvolupa una discussió dels resultats. Les estimacions amb dades satel·litàries tenen unes limitacions, que s'han de concretar; cal comparar els resultats obtinguts amb dades ja publicades; cal veure com afecten certs tractaments com per exemple la correcció atmosfèrica.

Els resultats obtinguts amb dades de satèl·lit són espacials, són imatges que ens donen valors quantitius per a cada cel·la de la superfície estudiada. Per petites que siguin les zones d'estudi, de seguida s'acumulen moltes dades, i cal fer-ne una síntesi per tal de poder fer-ne un tractament estadístic. En la majoria de casos aquesta síntesi es fa a través de mapes d'usos del sòl o de coberta, els quals classifiquen la superfície terrestre en una sèrie de classes, reduint-se la zona estudiada a uns estadístics per al conjunt de classes presents. Com tota simplificació, aquesta comporta una pèrdua d'informació; i en aquest punt cal ser força crític a l'hora de triar una classificació d'usos del sòl de la regió de treball ja que aquesta en condicionarà força els resultats. Aquest aspecte, al que sovint no se li dona prou importància, és un dels punts on s'ha volgut aprofundir en aquest treball. Encara que les categoritzacions dels paràmetres de superfície ja es fan servir al capítol quart, és en el capítol cinquè on s'entra a discutir els resultats derivats de la utilització d'un mapa d'usos del sòl determinat.

Al capítol sisè s'introdueix el model meteorològic de mesoescala MM5, al qual s'hi han incorporat els resultats dels capítols anteriors per intentar millorar les prediccions que puguin sortir de les simulacions

que fa el model. Es comenten els resultats d'aquestes simulacions i se n'extreuen una sèrie de recomanacions.

Finalment, al capítol setè es presenten les conclusions del treball. Després de les conclusions es detalla la bibliografia emprada i es presenta un llistat d'adreces d'Internet d'on s'ha obtingut dades i informació d'interès, així com un llistat dels acrònims utilitzats al llarg del treball.

IMPACTE: INTEGRACIÓ METODOLÒGICA I DE MODELS PER A LA PREVISIÓ I ANÀLISI DE LA CONTAMINACIÓ I EL TEMPS I ELS SEUS EFECTES

Conveni entre el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, la Comissió Interdepartamental de Recerca i Tecnologia (CIRIT) i la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Durada: Tres Anys (1999-2002). Àmbit UNESCO: 2501, 2509, 2417, 3307 i 3308.

Grups de treball

- Laboratori de Modelització Ambiental del Departament de Projectes d'Enginyeria, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, UPC, amb la col·laboració del Departament de Física Aplicada, secció de Manresa (UPC) i de l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)
- Física de l'atmosfera Universitat de Barcelona (UB).
- Unitat d'Ecofisiologia Vegetal i Biogeoquímica Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)
- Departament de Física Universitat de Girona (UdG)
- Departament de Química, Universitat Rovira i Virgili (URV)
- Grup d'Enginyeria Electromagnètica i Fotònica. Departament Teoria del Senyal i Comunicacions (UPC)

Objectius del projecte

1: Predicció meteorològica

Introducció de millores al model de mesoescala MASS. Aplicació del model MASS a la predicció immediata per Catalunya. Millora de les simulacions del MASS incorporant de dades de radar meteorològic, satèl·lit i dades de radiosondatges. Aplicació des models estadístics de predicció a llarg termini a Catalunya i avaluació dels seus resultats.

2: Predicció de la qualitat de l'aire

Posta a punt dels models de dispersió fotoquímica per el seu funcionament en temps real. Desenvolupament de l'inventari d'emissions necessari per l'aplicació dels models de dispersió. Proves de l'ús de les sortides dels models meteorològics i d'emissió en l'execució dels models de dispersió. Campanyes de mesures de les dades meteorològiques i de contaminació. Integració del model de predicció de la qualitat de l'aire amb els altres models desenvolupats.

3: Recerca bàsica en el camp dels processos atmosfèrics

Simulacions d'un model fotoquímic d'alta resolució i avaluació de les mesures dels perfils verticals realitzades amb el globus sonda i amb el LIDAR. Definició de situacions adients per la avaluació dels models i la interpretació dels resultats obtinguts. Obtenció de valors representatius per a Catalunya d'irradiància solar UVB i UVA i de les dosis eritemàtiques. Consideració de l'efecte de la radiació UV sobre les plantes.

4: Utilització de la informació de satèl·lits

Automatització de l'emmagatzematge de les imatges Meteosat i NOAA. Treball amb el banc d'imatges històriques, desenvolupant el programari a implementar de forma automàtica per a l'obtenció de productes meteorològics en temps quasi-real. Caracterització de l'impacte biològic a partir de les imatges Landsat-TM

5: Sistema LIDAR

Disseny i realització de l'equip LIDAR transportable incoherent. Algoritmes d'inversió i processament de dades. Campanyes de mesures. Incorporació de capacitat de mesura de velocitat del vent per efecte Doppler al LIDAR fix ja existent.

6: Efectes biològics/Emissions biogèniques

Efectes sobre diferents vegetals exposats a concentracions ambientals d'ozó. Desenvolupament dels algoritmes moduladors del risc de diferents concentracions d'ozó i altres contaminants depenent de les condicions meteorològiques. Mesures bimensuals de les concentracions de VOCs. Modelització i desenvolupament de l'inventari de les emissions biogèniques a Catalunya.