

LA INFORMACIÓN DE SUELOS EN LOS ESTUDIOS DE CAMBIO GLOBAL

Juan J. IBÁÑEZ MARTÍ¹ y Rafael ESPEJO SERRANO²

1:Centro de Ciencias Medioambientales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Serrano 115 dpdo. Madrid 28006

2:Dpto. Edafología. ETSI Agrónomos. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid

Abstract: The causes of the increase in the greenhouse effect are studied. Among these, certain processes of the soil-plant system play a more than trivial role, with special emphasis on those of anthropic origin of direct effect. The concept of climatic system from a perspective of a complex systems dynamics is contemplated. GCMs (general circulation models) are described in an attempt to determine the problems encountered when integrating into these models data on edaphic processes which effect the dynamics of the climatic system.

Key words: Global change, greenhouse effect, soils, pedologic information.

Resumen: Se analizan las causas del incremento del denominado efecto invernadero, sobre el que inciden de forma nada trivial ciertos procesos del sistema suelo - planta. Dentro de estos últimos se tratan preferentemente los de origen antrópico más directamente implicados en el forzamiento radiativo. Se describe el concepto de sistema climático desde la perspectiva de los sistemas complejos y su dinámica. Seguidamente se analizan los modelos de circulación general (MCGs) con objeto de determinar la problemática de la integración en los mismos de la información edafológica de mayor incidencia en la dinámica del sistema climático.

Palabras clave: Cambio global, efecto de invernadero, suelos, información edafológica.

INTRODUCCIÓN

¿Está cambiando el clima como consecuencia de las actividades humanas?. ¿Son las emisiones a la atmósfera de gases radiativamente activos y el incremento del albedo los responsables del calentamiento que parece sufrir el planeta?. ¿Se trata de un proceso irreversible?. Estas y otras preguntas relacionadas con el clima se están convirtiendo en algunos de los tópicos medioambientales que despiertan mayor interés a la opinión pública. Dentro de este

contexto cabe preguntarse cuál es el papel que desempeña el suelo.

Hasta hace unos 20 años, el desarrollo y conocimiento de los modelos climáticos estaba dominado por los físicos de la atmósfera; desde entonces el escenario ha cambiado. Actualmente, los restantes subsistemas del sistema climático (SC): hidrosfera, criosfera, edafosfera, litosfera y biosfera se consideran tan importantes como la atmósfera y los equipos de modelización climática buscan el concurso de especialistas en las otras disciplinas implica-

das, incluidos los edafólogos. En contrapartida, los edafólogos debemos conocer los conceptos fundamentales y las potencialidades de los modelos climáticos.

En las investigaciones sobre el cambio global, los expertos en las ciencias del suelo pueden aportar su experiencia e información a tres niveles distintos: (i). Asistencia en la implementación de modelos climáticos (incluidos los modelos de circulación general); (ii). Análisis de los impactos de los posibles cambios climáticos previstos por los expertos sobre todos aquellos problemas ambientales que requieren de información edafológica; (iii). Investigaciones sobre las estrategias de respuesta para mitigar los efectos de los cambios climáticos previsibles sobre el medio ambiente. Cabe anticipar que esta contribución es todavía escasa en (i) e importante en (ii) y (iii).

El problema

El efecto de invernadero es un fenómeno natural producido por la composición de la atmósfera. Gracias a él, la temperatura media del aire en la superficie terrestre es unos 30°C superior a la que acaecería en su ausencia y la vida pudo desarrollarse sobre la Tierra. Una buena parte de los datos disponibles, indican que el clima del Planeta se está calentando. Las causas de este forzamiento radiativo son en gran parte antrópicas (el creciente uso de combustibles fósiles, los cambios en los usos del suelo y a las modificaciones en la cobertura vegetal inducidos por ellos) que, al cambiar ligeramente su composición química, ha potenciado el efecto de invernadero natural. Se estima que, durante el último siglo, la temperatura media mundial del aire en la superficie terrestre ha aumentado entre 0,3 y 0,6°C; las previsiones del IPCC-95 indican que estas tendencias se mantendrán e incluso reforzarán en el futuro si no se frenan las mencionadas emisiones de gases radiativos. Tanto los cambios de temperatura y precipitación, como del nivel del mar, no serán espacialmente homogéneos, presentándose grandes variaciones a nivel regional,

siendo estos máximos en las altas latitudes septentrionales; también se prevé que los aumentos de temperatura en el sur de Europa sean superiores a la media, e irían acompañados por una reducción estival y una mayor variabilidad intra e interanual de las precipitaciones y de la humedad del suelo. Estas predicciones inducen a pensar en un agravamiento de los ya graves problemas de desertificación en el Mediterráneo (Ibáñez et al., 1995; González Rebollar et al., 1995; Espejo, 1997). También se prevén alteraciones de los patrones de la circulación general de la atmósfera (Balairón, 1995).

El sistema climático y sus procesos

El sistema climático (SC) está compuesto por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera. Se encuentra en continua evolución desde el origen de la Tierra; en otras palabras, la composición química de la atmósfera y los patrones de circulación atmosférica han cambiado con el tiempo y lo seguirán haciendo en el futuro, con o sin la ayuda del hombre. En todo caso cabe diferenciar entre tendencias unidireccionales, procesos más o menos cíclicos, debidos a factores internos (variación de los parámetros orbitales Sol-Tierra, dinámica de placas, etc.) y eventos de apariencia aleatoria generados por factores externos al propio sistema, como los impactos de grandes meteoritos. En consecuencia, el clima varía de manera natural sobre diferentes escalas temporales (entre 10⁹ años y horas) y espaciales (desde 10⁵ a menos de 1 km²) (Hardy et al., 1983; Anguita y Moreno, 1994). Así, en los últimos 10⁹ años, se han sucedido 6 largas épocas frías ó glaciales, (en la última de las cuales nos encontramos), separadas por otras cálidas ó de invernadero. A su vez dentro de una glaciación se distinguen periodos fríos ó glaciales y otros más benignos o interglaciales, como el presente. Estas últimas oscilaciones parecen estar relacionadas con los cambios en los parámetros definitorios de la geometría del sistema Sol-Tierra, según estableció Milancovitch en 1941. Los periodos glaciales e

interglaciales, presentan a su vez etapas con inversión de tendencia climática, producidas de una manera más o menos brusca (Jouzel et al., 1993).

Las épocas glaciales pudieran estar relacionadas con la dinámica de placas (las grandes glaciaciones de hace 600 y 300 ma coincidieron en el tiempo con ciertas distribuciones canónicas de las placas continentales) y con el período rotacional del Sol alrededor del centro de la galaxia, cuya periodicidad parece ser de unos 250 ma (Anguita y Moreno, 1994). La riqueza en CO_2 de la atmósfera primigenia, explicaría la ausencia de glaciaciones en los primeros 3.500 ma de la historia de la Tierra (la primera de que se tiene constancia se inició hace unos 2.500 ma). Se calcula que si todo el CO_2 de las rocas carbonatadas volviese a la atmósfera, esta tendría una presión de CO_2 2×10^5 veces superior a la actual.

Pero la variabilidad meteorológica no es intrínsecamente periódica; si se toma una serie temporal larga de una determinada variable meteorológica y sustraemos todos los componentes periódicos verificados o sospechados (p. ej. haciendo uso de los denominados análisis de series temporales), el residuo de variabilidad resultante manifiesta ser una señal fuertemente irregular. El clima es altamente inestable, lo que en terminología científica viene a denominarse un *sistema caótico* (Lorenz, 1994). Los sistemas caóticos son, por naturaleza, relativamente impredecibles. Por las mismas razones, el clima, más que evolucionar gradualmente, puede sufrir cambios bruscos de comportamiento. Sin embargo, la naturaleza y magnitud de estos últimos aún no es bien conocida ni incluida en los MCGs actuales.

La modelización del sistema climático

Desde un punto de vista físico-matemático, tanto el clima como el sistema climático son sistemas dinámicos complicados, cuya descripción requiere el conocimiento de las leyes que rigen sus comportamientos. Estas últimas son rigurosamente formalizadas mediante un con-

junto de ecuaciones matemáticas que posteriormente se tratan de resolver con vistas a predecir el comportamiento del sistema; con tal motivo se requiere incluir un gran número de variables. Sin embargo, lo que hace que la atmósfera y el SC sean sistemas dinámicos tan complicados no es tanto la proliferación de variables físicas como el hecho de que sus valores varían de un punto a otro y de un instante a otro. Por tanto, para conocer un único estado del SC global debemos conocer el valor de cada variable en cada punto.

Existen cuatro tipos básicos de modelos climáticos, que aumentan en complejidad, desde el primero hasta el cuarto (Herderson-Sellers y McGuffie, 1987): Los Modelos de Balance de Energía (MBE), los Radiativos-Convectivos (MRC), los Dinámico-Estadísticos (DE), y los de Circulación General (MCG). Los dos primeros, suelen ser unidimensionales, los terceros bidimensionales y los últimos tridimensionales.

Los MCGs, son los mejores instrumentos disponibles, hoy en día, para simular la estructura, dinámica y retroalimentaciones del sistema climático. Tratan de sintetizar los conocimientos sobre los procesos físicos y dinámicos del mismo; sin embargo en su estado actual, las descripciones de diversos procesos no son incluidas (p. ej., cambios naturales causados por la actividad volcánica, variaciones temporales de la constante solar), mientras que las de otros lo son de manera muy rudimentaria (p. ej., efectos de los aerosoles de sulfato, repercusiones del descenso de las concentraciones de ozono estratosférico), por lo que las predicciones generadas están sujetas a considerables incertidumbres. En todo caso, los MCGs se encuentran sometidos a continuas mejoras.

Los MCGS y la predicción del clima

Los experimentos que llevan a cabo los MCGs sobre el efecto de invernadero (generalmente mediante modelos acoplados océano-atmósfera) parten de un experimento control (simulando las condiciones actuales) y otro de anomalías. En este último, las concentraciones

de los gases de invernadero (expresados como equivalentes del valor radiativo del CO_2) se incrementan de forma gradual, por un lado, e instantánea, por otra. El experimento de incremento gradual sirve para simular la evolución del clima, mientras que el instantáneo es utilizado para los análisis de sensibilidad. Las diferencias detectadas entre los resultados de uno y otro cuantifican la respuesta del sistema climático al forzamiento radiativo de la atmósfera inducido por las actividades humanas.

Los GMCs deben comprender formulaciones realistas de los mecanismos implicados (leyes físicas), así como de las complejas y difícilmente modelizables interacciones y retroalimentaciones entre sus diversos componentes (p. ej., efectos radiativos de la nubosidad) (Dickinson, 1988). Otros problemas a resolver son el de la modelización adecuada de los cambios estacionales en la distribución océanos-criosfera, así como el de la distribución vertical del vapor de agua en la atmósfera (Dickinson, 1988).

En la predicción de los cambios climáticos provocados por el forzamiento radiativo, la inercia térmica de los océanos, que requieren décadas o siglos para alcanzar un estado estacionario tras cambios en el balance global de la energía terrestre, supone un serio obstáculo. De hecho, esta asincronía de los tiempos de respuesta entre atmósfera y océano es el principal escollo para mejorar los modelos acoplados océano-atmósfera.

Con vistas a afinar las predicciones actuales será necesario formular con mayor rigor y detalle las ecuaciones que describen el comportamiento del clima; así mismo, debería aumentarse la resolución espacial de los MCGs, de tal modo que se puedan elaborar escenarios espacialmente más precisos. Sin embargo, debido a la complejidad del SC, los modelos actuales, de muy baja resolución (incluyen unas 50.000 cuadrículas superficiales de 100×100 km, y unos 35 estratos verticales), tienen enormes necesidades de cálculo, hasta el punto de saturar la capacidad de los superordenadores más potentes.

Por tanto, a la hora de realizar simulaciones de mayor resolución se acude actualmente a los denominados modelos regionales de circulación. Estos últimos pueden partir de dos metodologías diferentes. La primera incluye los denominados procedimientos estadísticos de escalamiento descendente (*scaling down*), que tratan de relacionar los resultados de los GMCs para un determinado periodo histórico con mediciones reales de ciertas magnitudes meteorológicas en determinadas localidades. El segundo tipo de regionalización es de naturaleza dinámica, ya sea a través de las técnicas de anidamiento o de las de cuadrícula horizontal variable. En los primeros, modelos meteorológicos más detallados para determinadas regiones son anidados a los GMCs. En los segundos se utilizan GMCs con píxeles de tamaño variable. De este modo, las áreas a estudiar se encierran en cuadrículas de alta resolución (entre 50 y 100 km), mientras que estas disminuyen según nos alejamos del área de interés.

Modelización de los procesos superficiales y su incorporación a los modelos climáticos

Todos los modelos climáticos, y en especial los GCMs, pueden servir de base para la construcción de modelos biogeosféricos. Esta tarea requeriría el desarrollo de metodologías que permitieran integrar los procesos biogeosféricos en unidades territoriales (píxeles) de 100×100 km², que es el tamaño de cuadrícula más frecuente para describir los procesos atmosféricos y oceánicos en los MCGs. Sin embargo, una buena parte de los procesos biogeosféricos relevantes al SC resultan difíciles de sintetizar a escalas tan groseras. Por tanto, deberá avanzarse mucho más en su parametrización (p. ej., intercambio de calor, humedad y especies químicas) a las escalas requeridas. Conceptualmente se trata de elaborar una jerarquía anidada de bases de datos (*hierachical nested databases*) y modelos que permitieran resolver el problema de la transferencia de información entre distintas escalas. Los problemas metodológicos que esta actividad suscita no son nada triviales.

La variabilidad espacial de los suelos a todas las escalas es enorme. Incluir las propiedades edáficas en los MCGs demanda promediarlas sobre las dimensiones cuadrículas del modelo mediante procedimientos estadísticos complejos (Roswall *et al.*, 1988). El primer escollo a salvar es el de la parametrización de los procesos subcuadrícula (subpíxelicos) del continuum suelo-planta-atmósfera, sin lo que difícilmente se avanzará en la modelización del SC. Actualmente, los flujos verticales de vapor de agua, calor sensible y momento suelen ser abordados mediante modelos unidimensionales, cuya representatividad respecto a la realidad tridimensional es mal conocida (Dickinson, 1988).

La importancia de la capa fronteriza entre la atmósfera y la superficie terrestre en los MCGs, se relaciona en primera instancia con la transferencia vertical de calor, humedad y momento. Ya en 1984, el Programa Mundial de Investigación del Clima consideró como líneas prioritarias de estudio la predicción de la cantidad de agua almacenada en los suelos y sus tasas de evaporación. Los primeros intentos de parametrización de estos procesos tenían en cuenta, la temperatura a nivel del suelo y su humedad, así como el viento, la temperatura y la humedad de la atmósfera sobre la capa fronteriza (Panofsky, 1985). Posteriormente se añadió la rugosidad superficial. A pesar de estos esfuerzos, en la actualidad, la humedad del suelo aún es incorporada de forma muy grosera, sin considerar los procesos físicos y biológicos implicados en la evapotranspiración.

La transferencia de agua y energía en la frontera suelo-planta-atmósfera comenzó a ser abordada para la elaboración de modelos microclimatológicos (Jones, 1983; Dickinson, 1984; Verstraete, 1985). Obviamente estos, suelen utilizarse a nivel de parcela experimental, microcuena, etc., por lo que las parametrizaciones obtenidas a escalas tan finas son difícilmente extrapolables a los GMCs. La validación de estos últimos submodelos con datos reales, para su incorporación en los GMCs, requiere grandes esfuerzos de campo (junto a la

ayuda de imágenes satelitales), dada la elevada anisotropía espacial del tamaño de píxel requerido (100 x 100 km).

Mediante un MCG, Walker y Raventree (1977), demostraron la incidencia de la humedad del suelo sobre la temperatura y las lluvias a nivel regional. Shukla y Mintz (1982) llegaron a la conclusión de que la modulación del clima por los contenidos de humedad edáfica es importante. Demostraron que las temperaturas estacionales podían llegar a ser mucho más elevadas en regiones sin apenas reservas de agua en el suelo frente a aquellas que se encontraran cerca de la saturación.

Con vistas a mejorar la implementación de los procesos superficiales terrestres en los modelos climáticos macroescálicos Bolin (1988), al margen de las transferencias de energía, momento y humedad, aconseja tener en cuenta los siguientes aspectos: (i) modulación del flujo de agua entre la tierra y la atmósfera debida a la biota; (ii) importancia de los procesos edáficos en las transferencias de energía, humedad y momento; (iii) papel de los organismos terrestres en la generación y destrucción de las especies radiativamente activas; (iv) transferencia de constituyentes químicos en el seno de la atmósfera, así como sus interacciones químicas y fotoquímicas y (v) metodologías para la formalización y parametrización de los procesos relevantes a las escalas de competencia de los distintos modelos climáticos.

Los suelos en el contexto del cambio climático

Los suelos se comportan como una "esfera" de frontera e interacción entre diversas esferas primarias (atmósfera, hidrosfera, biosfera, litosfera). La edafosfera sería pues como una geoderma o geomembrana del modelado terrestre con ciertas analogías a las biomembranas de los seres vivos (Targulian *et al.*, 1990a & 1990b); también cabe señalar que se trata de un sistema abierto, complejo, polifásico y multifuncional (Targulian *et al.*, 1990b).

Como geomembrana epilitosférica, a tra-

vés de la edafosfera se producen y regulan los flujos de energía y materia con aquellas esferas del sistema planetario con las que interactúa. Es decir afecta y es afectada por la atmósfera, litosfera, hidrosfera, biosfera, etc. Estas propiedades de la edafosfera provienen de su estructura: ligera, porosa, permeable a los gases atmosféricos y al agua, así como por constituir la habitación de las biocenosis (Targulian *et al.*, 1990b). Por tanto, muchas de las emisiones de gases radiativos desde el suelo y/o vegetación dependen de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

Los suelos y el uso que hacemos de los mismos, así como de la cobertura vegetal que sustentan, poseen notables consecuencias sobre el SC. Desde un punto de vista hidrológico, destaca su papel como reservorio temporal del agua, utilizada por las plantas y evapotranspirada a la atmósfera. Por otro lado, los suelos y la biota actúan como importantes fuentes y/o sumideros de diversos gases que contribuyen al forzamiento radiativo del clima (tabla 1).

El sistema suelo - planta como fuente sumidero de gases radiativos.

Anhídrido carbónico

El suelo actúa como depósito temporal de C orgánico y mineral, siendo importante en su ciclo biogeoquímico; sin embargo resulta difícil cuantificar su contribución al balance del

CO₂ atmosférico (Siegenthaler y Sarmiento, 1993; Moore *et al.*, 1996). El calentamiento global afectará a la dinámica del continuum suelo-planta-atmósfera mediante la denominada fertilización carbónica. Es decir, el incremento de CO₂ atmosférico podría aumentar la producción de biomasa (Kimball y Idso, 1983; Bouwman, 1990 a). Este proceso sería mayor en ambientes con déficits de humedad, ya que tal fertilización mejora, en teoría, la eficiencia en el uso del agua por las plantas, y por lo tanto sus producciones primarias para un consumo equivalente (Bouwman, 1990 b; Allen, 1991; Fleming, 1991; Ramos *et al.*, 1992). Se trata de un mecanismo de realimentación negativo que tendería a frenar el aumento de CO₂ atmosférico. Se debate si el sumidero debido al incremento de biomasa es causa del desajuste detectado entre el balance anual de aportes y pérdidas de CO₂ atmosférico (Denning *et al.*, 1995; Moore *et al.*, 1996). La ganancia de biomasa en los ecosistemas podría provocar mayores aportes de materia orgánica al suelo, que al mineralizarse volvería a la atmósfera. Según Bouwman (1990 a, b, 1990 b), también es posible que el incremento de CO₂ generara, tanto deficiencias en la asimilación de otros nutrientes como incrementos en la relación C/N de la necromasa, lo que ralentizaría su descomposición en el suelo.

Un proceso apenas estudiado es el secuestro edáfico de CO₂ atmosférico en forma de carbonatos. Este se produciría principalmente

Tabla 1. Datos referentes al CO₂, CH₄, y N₂O atmosféricos, según IPCC-95 y Bouwman (1990 a).

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Concentración atmosférica en 1750	280 ppmv	770 ppbv	275 ppbv
Concentración atmosférica en 1994	358 ppmv	1720 ppbv	312 ppbv
Años de pervivencia	50 - 200	10	150
Acciones antropogénicas que inciden sobre su dinámica en el sistema suelo-planta	Desforestación; uso de combustibles fósiles; cambios en uso del suelo; quema de biomasa	Cultivos de arrozales; uso de combustibles fósiles; quema de biomasa	Empleo de fertilizantes; cambios en el uso del suelo; quema de biomasa

en los ambientes áridos y semiáridos (incluidos los mediterráneos). El carbono inorgánico almacenado en los horizontes cálcicos y petrocálcicos se estima en 930 gigatoneladas. Por tanto, estos últimos podrían ser importante sumideros de CO_2 (aproximadamente el 35% del carbono orgánico e inorgánico almacenado en la edafosfera global). También se presume que los desiertos almacenan 5,7 veces más carbono inorgánico que orgánico (West *et al.*, 1994). Se trata de un proceso más lento que el sumidero de materia orgánica.

La deforestación, disminuye el sumidero de carbono en el sistema suelo-planta, reduce la evapotranspiración e incrementa el albedo. La agricultura itinerante ("shifting cultivation") sobre las cenizas de los bosques tropicales quemados, incrementa las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O . Los sistemas agroforestales (p. ej. dehesas mediterráneas, bocages de clima templado, reservas extractivas de los ambientes tropicales húmedos) son alternativas prometedoras sustituir tales prácticas. La combustión de biomasa por la quema de rastrojos y los incendios forestales de diversos biomas (especialmente sabanas y ecosistemas mediterráneos), la utilización de madera como combustible doméstico en el tercer mundo, etc. son otras prácticas emisoras de CO_2 , CH_4 y N_2O .

El calentamiento climático podría alterar las tasas e incluso invertir los procesos de secuestro de CO_2 en ciertas áreas. Tal es el caso de las regiones frías, con amplias extensiones de turberas y permafrost, entre otras.

Metano

Pese a caracterizarse por sus bajas concentraciones atmosféricas, el CH_4 absorbe 30 veces más radiación infrarroja que el CO_2 . Según los datos disponibles, las emisiones de metano desde la superficie terrestre superan el 75 % del total emitido a la atmósfera (Bouwman, 1990 b). El 25% restante procedería de los combustibles fósiles.

Los humedales y superficies encharcadas, son una de las principales fuentes de metano

(Whiting y Chanton, 1993). Interesa pues valorar la superficie de arrozales, muy extendidos en Asia y en expansión en África y América del Sur. Existen prácticas agronómicas aptas para reducir tales emisiones sin sacrificar su productividad (p. ej., mediante los denominados "arrozales pluviales").

Otras posibles fuentes de CH_4 serían los permafrost, gleysoles y termiteros (según Rasmussen y Khalil, 1983, las termitas generarían hasta un 15% del metano que fluye a la atmósfera desde el suelo). Paralelamente, la eutrofización de humedales (costeros o continentales) por fosfatos, contribuye a la formación de horizontes orgánicos anaeróbicos productores de CH_4 . Sería importante saber hasta que punto una mayor eficiencia en el uso de los abonos fosfatados contribuiría a reducir estas emisiones.

Como en el caso del CO_2 , un calentamiento climático alteraría las tasas de emisión de CH_4 e incluso podría invertir fuentes en sumideros y viceversa.

Óxido nítrico

El N_2O se encuentra en la atmósfera en una proporción de 0.31 ppmv, pero su adsorción de radiación infrarroja es 200 veces superior a la del CO_2 y su concentración sigue aumentando (Keller *et al.*, 1993). Se estima que el 90% de la emisión de N_2O a la atmósfera se produce desde el suelo, mientras que la mayor parte del otro 10% provendría de la combustión de combustibles fósiles. Los procesos microbiológicos de la nitrificación y desnitrificación, altamente sensibles a las variaciones de humedad y temperatura edáficas, merecerían ser mejor cuantificados. En este sentido resultan relevantes las investigaciones sobre la fijación biológica de nitrógeno, ya sea por microorganismos de vida libre, ó por fijadores simbióticos, muy importantes en los bosques tropicales y sabanas, en donde además se detectan fuertes emisiones de N_2O a la atmósfera tras cambios en el uso del suelo (Umarov, 1991; Bouwman, 1990 b). La creciente utilización de fertilizantes

nitrogenados, tiene mucho que ver con el aumento de emisiones de N_2O . El incremento de biomasa que se prevé por el efecto de la fertilización carbónica promoverá un mayor uso de fertilizantes por parte de los agricultores.

Vapor de agua

El vapor de agua es el principal contribuyente al efecto de invernadero. Sin embargo, su comportamiento es diferente del de los restantes gases considerados, por cuanto forma parte del ciclo hidrológico y no de la química atmosférica s.s. De este modo, su estudio está relacionado con la humedad del suelo y la evapotranspiración del continuum suelo-planta-atmósfera. Sin embargo, el vapor de agua también responde a los cambios en la física y química atmosférica amplificando y redistribuyendo sus efectos en el espacio y el tiempo.

La tabla 2 recoge algunos de los procesos antrópicos degradativos implicados en la emisión de gases radiativos.

Resulta esencial estudiar las repercusiones de un calentamiento climático sobre el papel del sistema suelo-planta como fuente y sumidero

de gases radiativos; se sospecha que muchos sumideros actuales podrían convertirse en fuentes tras el reforzamiento del efecto de invernadero (Van Breemen y Feijtel, 1990). Una aportación edafológica de interés consistiría en abordar una adecuada cartografía y monitorización de los regímenes de humedad y temperatura de los suelos, así como indagar en sus relaciones con las emisiones de gases. Por todo lo dicho, debería avanzarse en el estudio y modelización de las repercusiones de un posible calentamiento climático sobre las propiedades hidrofísicas (p. ej., porosidad), químicas y microbiología de los suelos.

Los sistemas de información de suelos y el cambio global

Desafortunadamente, no se está prestando la debida atención para la mejora y/o creación de bases de datos georeferenciadas sobre suelos, vegetación y clima a las escalas pertinentes para su incorporación en los MCGs. Tampoco se ha avanzado lo suficiente en el desarrollo de metodologías que permitan generalizar la información existente desde escalas más detalla-

Tabla 2: Tendencias de procesos antrópicos relacionados con la emisión de gases radiativos. Según Bouwman, 1990 a.

Causas	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	H ₂ O	Albedo	Rugosidad
Incremento de la deforestación	+	#	+	-	+	+/-
Idem cultivo de arroz	±	+	+/-	±	±	±
Idem fertilizantes con N	±	±	+	±	±	±
Reducción permafrost	+	+	+	±	±	±
Avance desertificación	-	±	-	-	+	-

das hacia los mencionados niveles de resolución. Lo mismo es cierto en lo que concierne a la parametrización de los procesos edafológicos.

Nuestro conocimiento de la distribución geográfica de suelos, sus usos, vegetación silvestre y otros recursos naturales es muy deficiente. De hecho, el Mapa de Suelos del Mundo de la FAO y sus posteriores bases de datos georeferenciadas, aún adoleciendo de graves deficiencias, constituyen el mejor y más detallado inventario de un recurso natural a escala global (FAO, 1993). Si bien es cierto que elaborar bases de datos globales es una tarea ingente y cara, también lo es que por muchos progresos que puedan realizarse a nivel metodológico, poco podemos avanzar en el análisis, modelización y monitorización del cambio global, sino procedemos a su inventario riguroso (Sombroek, 1990).

Los reconocimientos tradicionales de suelos y sus cartografías se sustentan en sistemas taxonómicos basados en rasgos edáficos de gran estabilidad. Sin embargo, muchas propiedades que podrían ser modificadas por el calentamiento de la atmósfera son más dinámicas temporalmente (iones en la solución del suelo, compactación, infiltración, etc.). Más aún, la mayor parte de las propiedades físicas de los suelos, necesarias para la modelización del continuum suelo-planta-atmósfera, no suelen ser estudiadas en los levantamientos edafológicos.

En consecuencia, las cartografías digitalizadas deben ser enriquecidas con todas aquellas propiedades implicadas en el balance radiativo y ciclo hidrológico. Algunas de ellas pueden ser inferidas de los levantamientos convencionales a los que se asocian bases de datos de perfiles de suelos con información morfológica y analítica. Nachtergaele (1996) sintetiza las propiedades derivadas de que disponen las escasas bases de datos georeferenciadas de suelos a nivel global y regional. Entre las primeras cabría citar la "Global Pedon Database" Nachtergaele, (1996) y la WISE, construida específicamente para estimar las emisiones de gases desde el suelo a la atmósfera (Batjes *et al.*, 1995).

Posiblemente, en un futuro próximo, la metodología SOTER (Soil and Terrain Digital Database, at the Scale 1:1.000.000), llegará a generalizarse, por cuanto es más útil para los estudios de cambio global, al considerar simultáneamente bases de datos computerizadas de topografía, fisiografía, suelos, litología, clima, vegetación y usos del suelo (UNEP/ISSS/ISRIC/FAO, 1995). La superposición y acoplamiento de estas bases, mediante tecnologías SIG, permiten obtener unidades ambientales que posteriormente podrían ser utilizadas para medir sobre el terreno las emisiones de gases, así como otras variables de interés en la modelización y parametrización del continuum suelo-planta-atmósfera. La delimitación de estas unidades debe realizarse sobre criterios relevantes respecto a la emisión de gases, albedo, regímenes de humedad y temperatura de los suelos, etc. Por otro lado, aun no se ha extraído toda la información posible de las imágenes satelitales (albedo, biomasa, humedad del suelo, etc.), fácilmente integrables con las bases de datos mencionadas.

REFERENCIAS

- Allen, L.H. (1991). Effects of increasing carbon dioxide levels and climate change on plant growth, evapotranspiration, and water resources. In: *Managing water resources in the West under conditions of climate uncertainty*. Nat. Academy Press, Washington. 101-147.
- Anguita, F. & Moreno, F. (1993). Procesos geológicos externos y geología ambiental. Ed. Rueda, Madrid. 311 pp.
- Balairón, L. (1995). Análisis de la variabilidad espacial y temporal de los procesos meteorológicos. En: J.J. Ibáñez & C. Machado (Eds.), *Análisis de la Variabilidad Espacio-Temporal y Procesos Caóticos en Ciencias Medioambientales*. Ed. Geoforma, Logroño. 243-258.
- Batjes, N.H., Bridges, E.M., & Nachtergaele,

- F.O. (1995). World inventory of soil emission potentials: development of a global soil database of process controlling factors. In: S. Peng et al. (eds.), *Climate Change and Rice*, Springer Verlag, Heidelberg, 110-115.
- Bolin, B. (1988). Linking terrestrial ecosystems process models to climate models. In: T. Rosswall, R.G. Woodmansee & P.G. Risser (eds.), *Scales and Global Change*. Scope **35**, Wiley, Chichester. 109-124.
- Bouwmán, A.F. (1990a). Conclusions and recommendations of the conference working groups. In: A.F. Bouwmán, (ed.), *Soils and the Greenhouse Effect*. Wiley, UK, 1-21.
- Bouwmán, A.F. (1990b). Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: A.F. Bouwmán (ed.), *Soils and the Greenhouse Effect*. Wiley, UK. 61-127.
- Denning, A.S., Fung, I.Y. & Randall, D. (1995). Latitudinal gradient of atmospheric CO₂ due to seasonal exchange with land biota. *Nature* **376**, 240-243.
- Dickinson, R.E. (1984). Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. In: *Climate Processes and Climate Sensitivity*. Geophys. Monograph 29, Vol **5**, Am. Geophys. Soc. 58-72.
- Dickinson, R.E. (1988). Atmospheric systems and global change. In: T. Rosswall, R.G. Woodmansee & P.G. Risser (eds.), *Scales and Global Change*. Scope **35**, Wiley, Chichester. 57-80.
- Espejo, R. (1997). El entorno mediterráneo y la desertificación. Tendencias pasadas y futuras. En: J.J. Ibáñez, B. Valero & C. Machado (Eds.), *Paisajes Mediterráneos en el Espacio y el Tiempo*. De. Geoforma, Logroño. 161-186.
- FAO, (1993). *World Soil Resources. An Explanatory Note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25,000,000 scale*. World Soil Resources Report **66**, Rev. 1. FAO, Rome. 64 pp.
- Fleming, P.M. (1991). *Climate change and climate variability. An examination of its impact in water resources planning*. CSIRO, Camberra.
- González Rebollar, J.L., García Álvarez, A. & Ibáñez, J.J. (1995). A mathematical model to predict climate change in mediterranean bioclimatic landscapes. In: S. Zwerver, R.S.A.R. van Rompaey, M.T.J. Kok & M.M. Berk, *Climate Change Research. Evaluation and Policy Implications*, Studies in Environmental Sciences **56B**, Elsevier, Amsterdam. 757-762.
- Hardy, R., Wriqth, P. and Kington, J. (1983). *El Libro del Clima*. Hermann Blume Ediciones, Madrid. 224 pp.
- Henderson-Sellers, A. & McGuffie, K. (1987). *Introducción a los modelos climáticos*. Omega, Barcelona. 231 pp.
- Ibáñez, J.J., García Álvarez, A., González Rebollar, J.L. & Imeson, A.C. (1995). Mediterranean soilscapes and climatic change: an overview. In: S. Zwerver, R.S.A.R. van Rompaey, M.T.J. Kok & M.M. Berk (eds.), *Climate change research: evaluation and policy implications*. Elsevier, Amsterdam. 751-756.
- Jones, H.G. (1983). *Plants and microclimate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 323 pp.
- Jouzel, J., Lorius, C., Johnson, S., & Grootes, P. (1994). Climate instabilities: Greenland and Antarctic records. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **319**, 65-77
- Keller, M., Veldkamp, E., Weitz, A. & Reiners, W. (1993). Effects of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. *Nature* **365**, 244-246.
- Kimball, B.A., & Idso, S.B. (1983). Increasing atmospheric CO₂; effects on crop yield, water use, and climate. *Agricultural Water Management*, **7**, 55-72.
- Lorenz, E.N. (1994). *La Esencia del Caos*. Ed. Debate, Madrid. 232 pp.
- Moore, P.D., Chaloner, B. & Stott, P. (1996). *Global environmental change*. Blackwell Science, Oxford. 244 pp.

- Nachtergaele F.O. (1996). From the Paper Soil Map of the World to the Digital Global Soil and Terrain Database: 1960-2002, manuscrito no publicado, FAO, Roma. 18 pp.
- Panofsky, H.A. (1985). The planetary boundary layer. In: Saltzmann (ed.), *Issues in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Advances in Geophysics, **28**, Academic Press. 359-385.
- Ramos, C., Lidón, A. & Rodrigo, A. (1992). The effects of climate change on irrigated soils: water resources and solute leaching. In: *Soil responses to climate change*. M.D. Rounsevell, & P.J. Loveland (eds.). NATO ASI Series I: Global Environmental Change, Vol. **23**. 99-111.
- Rasmussen, R.A., & Khalil, M.A.K. (1983). Global production of methane by termites. *Nature* **301**, 700-702.
- Rosswall, T., Woodmanse, R.G. & Risser, P.G. (eds.). (1988). *Scales and Global Change*. Scope **35**, Willey, Chichester. 355 pp.
- Schütz, H., Seiler, W. & Rennenber, H. (1990). Soil and land use related sources and sinks of methane (CH₄) in the context of the global methane budget. In: A.F. BOUWMAN (ed.), *Soils and the Greenhouse Effect*. Willey, UK. 269-285.
- Shukla, J., & Mintz, Y.C. (1982). Influence of land-surface evapotranspiration on earth's climate. *Science* **215**, 1498-1501.
- Siegenthaler, U., and Sarmiento, J.L. (1993). Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature* **365**, 119-125.
- Sombroek, W.G. (1990). Geographic quantification of soils and changes in their properties. In: A.F. Bouwman (Ed.), *Soils and Greenhouse effect*. Willey, UK. 225-244.
- Targulian, V.O., Arnold, R.W., Solomon, A.M. & Szabolcs, I. (1990a). Introduction. In: R.W. Arnold, I. Szabolcs & V.O. Targulian (Eds.), *Global Soil Change*. IIASA, Laxenburg, Austria. 15-20
- Targulian, V.O., Arnold, R.W. & Rozanov, B.G. (1990b). Pedosphere. In: R.W. Arnold, I. Szabolcs & V.O. Targulian (Eds.), *Global Soil Change*. IIASA, Laxenburg, Austria. 21-29.
- Umarov, M.M. (1990). Biotic sources of nitrous oxide (N₂O) in the context of the global budget of the nitrous oxide. In: A.F. Bouwman (Ed.), *Soils and the Greenhouse effect*. Willey, UK. 263-268.
- UNEP-ISSS-ISRIC-FAO. (1995). *Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER) Procedures Manual*. World Soil Resources Report **74**, FAO, Roma. 122pp.
- Van Breemen, N. & Feijtel, T.C.J. (1990). Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems. In: A.F. Bouwman, (ed.), *Soils and the Greenhouse Effect*. Willey, UK. 195-223.
- Verstraete, M.M. (1985). *A Soil-Vegetation-Atmosphere Model for Microclimatological Research in Arid Regions*. National Center for Atmospheric Research. Cooperative Thesis **88**.
- Walker, J., & Rowentree, P.R. (1977). The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Soc.* **103**(435), 29-46.
- West, N.E., Stark, J.M., Jhonson, D.W., Abrams, M.M., Wright, J.R., Heggen, D. & Peck, S. (1994). Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America, *Arid Soil Research and Rehabilitation* **8**, 307-351.
- Whiting, G.J. & Chanton, J. (1993). Primary production control of methane emissions from wetlands. *Nature* **364**, 794-795.