

Características y apreciaciones generales de los métodos de medida y estimación de la evapotranspiración¹

MARCELA INES SANCHEZ MARTINEZ

Instituto de Geografía
Pontificia Universidad Católica de Chile

RESUMEN

El trabajo que se presenta expone algunas características y apreciaciones generales de los diferentes tipos de métodos utilizados en la medida y estimación de la evapotranspiración. Para su presentación, estos se dividen en dos grandes grupos: el primero, comprende los métodos o modelos empleados convencionalmente en la cuantificación del proceso, mientras que, el segundo, considera aquellos que utilizan, en alguna medida, información obtenida por percepción remota.

ABSTRACT

This paper shows some of the characteristics and general appreciations of different kinds of methods used in measuring and estimation of evapotranspiration. The methods discussed are divided in two main groups; the first includes those methods or models conventionally used in the quantification of the process, and the second one includes those methods that in some way use information derived from satellite images.

INTRODUCCION

Dentro del intercambio constante de agua entre los océanos, los continentes y la atmósfera, la evaporación es el mecanismo por el cual el agua es transferida a la atmósfera en forma de vapor. En su sentido más amplio, involucra también la evaporación de carácter biológico que es realizada por los vegetales, conocida como transpiración y que constituye, según algunos autores, la principal fracción de la evaporación total (Choudhury y de Bruin, 1995; Kalluri *et al.*, 1998). Aunque evaporación y transpiración son procesos diferentes y se realizan independientemente, no resulta fácil separarlos, pues ocurren, por lo general, de manera simultánea, resultando de este hecho la utilización del concepto más amplio de evapotranspiración que los engloba.

Para que se produzca el proceso de evapotranspiración se debe contar con tres elementos: en primer lugar, se requiere de un suministro de agua para ser evaporada o transpirada; luego, una fuente que proporcione la energía necesaria para transformar el agua desde el estado líquido al gaseoso

y finalmente un medio de difusión del vapor una vez que éste se ha producido.

Teniendo en cuenta las condiciones señaladas, es posible comprender la relevancia del proceso, pues interviene, tanto en el balance hídrico en un área determinada como también en el balance de energía superficial. En efecto, la evapotranspiración constituye un importante componente del ciclo y balance del agua, puesto que se estima que un 70% del total de ella, recibida por una zona, es transferida a la atmósfera a través del proceso, mientras que el 30% restante constituye la escorrentía superficial y subterránea (Sánchez, 1992). Junto con ser un componente del ciclo hidrológico, la evapotranspiración interviene en el balance calórico (Rosenberg, *et al.*, 1983) y en la redistribución de energía mediante los intercambios que se producen con los cambios de estado del agua, permitiendo así un equilibrio entre la energía recibida y la entregada. La relevancia de la evapotranspiración en el balance de energía queda manifiesta si se considera que bajo condiciones favorables la energía disponible (radiación neta) para el desarrollo de la mayor parte de los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen en la superficie, se distribuye principalmente entre el flujo de calor latente o evapotranspiración y el flujo de calor sensible (Zhang y Lemeur, 1995).

La intervención de la evapotranspiración en los balances de agua y energía implica que el proce-

¹ Este trabajo expone parte de los resultados de la tesis doctoral titulada "Estimación de evapotranspiración a través de datos meteorológicos e imágenes de satélite", defendida por la autora en julio de 1999, en el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid, España.

so sea de interés para diversas disciplinas. Desde el punto de vista de la Geografía, quizás una de las más conocidas referencias al fenómeno pertenece a la climatología y la consideración y utilidad del fenómeno como un indicador de aridez de las distintas zonas; sin embargo, donde la evapotranspiración ha ganado un lugar realmente importante es en la evaluación de los volúmenes de agua involucrados, que además de tener interés en sí mismos, resultan indispensables en las tareas de planificación y gestión de los recursos hídricos, en ciertos estudios medioambientales y en la cuantificación de las demandas hídricas de la vegetación, especialmente de los cultivos y de algunas especies forestales.

Las latitudes templadas se caracterizan por una actividad agrícola preponderante, pero también están sujetas a variaciones considerables en las precipitaciones, las cuales pueden resultar extremas: inundaciones por un lado y sequías por otro. En este sentido, conocer la cantidad de agua perdida por evapotranspiración en regiones como las mediterráneas es importante, toda vez que el riego y su correcta programación es el único medio para suplir el déficit de agua y producir altos y estables rendimientos en las zonas de cultivo.

Una vez reconocida la importancia geográfica, climática, hidrológica, agronómica y forestal de la evapotranspiración es interesante conocer de qué manera es posible cuantificar los volúmenes de agua comprometidos en el proceso, los tipos de métodos o modelos aplicados en esta labor, la información necesaria para su operación y algunos alcances sobre los mismos y éste es el objetivo del trabajo que se presenta.

CONSIDERACIONES PREVIAS

La evapotranspiración como suma de los procesos de evaporación y transpiración se ve influida por diversos factores, variables en el tiempo y en el espacio. Si bien en la comprensión de la naturaleza y magnitud de la evaporación se puede alcanzar una buena aproximación si se consideran las condiciones meteorológicas en la que ésta se desarrolla (entre ellas, temperatura, humedad del aire, velocidad del viento); no ocurre lo mismo con la transpiración, proceso en el que junto a los factores ambientales o externos como los señalados, intervienen también los propios de las plantas. Esto señala a la transpiración como un hecho más complejo que la evaporación, pues está influida por factores de orden fisiológico asociados a las distintas especies vegetales, como su

etapa de desarrollo, profundidad de las raíces o capacidad para disponer del agua en el suelo (Elías y Giménez, 1965).

Los métodos que se han formulado y utilizado en la determinación de la evapotranspiración, hasta la actualidad, varían en complejidad y se relacionan directamente con el interés que se ha puesto por introducir en ellos el mayor número de factores que intervienen y modifican la magnitud de la evapotranspiración.

Por otra parte, la atención que se ha brindado a los factores que influyen en el proceso, ha favorecido el desarrollo de una serie de conceptos tendientes a lograr una mayor precisión de ideas al referirse al fenómeno y que surgen como un intento de separar, precisamente, la acción de los distintos factores que inciden en él. Algunos de estos conceptos son evapotranspiración potencial, evapotranspiración de referencia o del cultivo de referencia, evapotranspiración máxima y evapotranspiración real.

El concepto de evapotranspiración potencial (ETP) fue introducido por C. Thornthwaite en 1948 y fue definido como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación con desarrollo óptimo y sin limitaciones en el suministro de agua, ya sea lluvias o irrigación (Elías y Giménez, 1965; López Cadenas y Blanco, 1976; Sánchez, 1992; McKenney y Rosenberg, 1993 y Fernández, 1995, entre otros). Este concepto es ampliamente utilizado y desde su introducción ha tenido gran influencia en los estudios geográficos del clima mundial.

Las condiciones establecidas por la ETP no siempre se dan en la realidad, por ello se introdujo más tarde la idea de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), el cual pretende reducir las ambigüedades de interpretación a que da lugar la amplia noción de ETP y relacionar de forma más directa el proceso con los requerimientos de agua de los cultivos. Es similar al de ETP, incluso en algunos estudios son considerados equivalentes (McKenney y Rosenberg, 1993), pero se diferencian en que éste es aplicado a un cultivo específico (habitualmente gramíneas o alfalfa) y por ello, en los últimos años, está reemplazando al de ETP.

Otro concepto utilizado es el de evapotranspiración máxima (ET_m), similar a los anteriores en donde se establece también un umbral máximo de agua evapotranspirada, pero que se diferencia de la ETP y la ET_o, porque se refiere a los requerimientos hídricos de cualquier cultivo de interés.

No obstante, las mayores precisiones que se han alcanzado con la introducción de nuevos conceptos, la cantidad de agua que realmente es evaporada y transpirada por una cubierta vegetal, la evapotranspiración real (ETR) difiere de los límites máximos antes establecidos, puesto que además de los factores meteorológicos también influyen las características de la vegetación, el tipo de suelo y la condición real de humedad del mismo, la cual puede ser restringida; por ello, la ETR puede ser muy diferente a la ETP.

Junto a la precisión conceptual que se ha alcanzado con el estudio de la evapotranspiración, se han ido desarrollando numerosos métodos para su determinación; dada la profusión de ellos y la incorporación de nuevas técnicas y fuentes de información útil para determinar su magnitud, en la actualidad se puede hablar de dos grupos de modelos: los que en este estudio se han denominado clásicos o convencionales y los que utilizan, en alguna forma, información obtenida por percepción remota. De esta diferenciación se ocupa el próximo apartado.

METODOS DE MEDIDA Y ESTIMACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION

Desde que en 1802 Dalton enunciara su ley e introdujera la ecuación del transporte de masa, comenzaron a desarrollarse las primeras formulaciones teóricas para el cálculo de la evapotranspiración (Rosenberg *et al.*, 1983; Fernández, 1995). Sin embargo, sólo a partir de los años cincuenta del siglo XX, empieza una intensa y sistemática fase de experimentación que hará surgir los múltiples métodos conocidos y aplicados hoy. A esto se une más tarde el desarrollo alcanzado por la percepción remota (aproximadamente desde mediados de los años setenta) el cual contribuye al estudio y determinación de la evapotranspiración en dos aspectos: por una parte, es una nueva fuente de información, complementaria a las ya existentes y, por otra, permite generar nuevos modelos de estimación.

De acuerdo con lo anterior, los diversos modelos utilizados para calcular la evapotranspiración se pueden dividir en los dos grupos antes señalados: aquellos que se pueden denominar clásicos o convencionales, constituidos por los modelos basados en información obtenida por diversas fuentes, para algunos de ellos fundamental la de carácter climático o meteorológico, y aquellos que utilizan información o modelos derivados por la vía de la percepción remota.

1. Métodos clásicos o convencionales

Considerando la complejidad de la distribución en el espacio y en el tiempo de los factores o circunstancias que afectan la evapotranspiración, se puede comprender la dificultad de evaluar los volúmenes de agua perdidos por este proceso. Precisamente de ello deriva la diversidad de fundamentos sobre los que se basan los distintos métodos clásicos en vigor, así como las escalas espacial y temporal involucradas con su aplicación. Esta diversidad es la que también ha dado origen a una serie de intentos de clasificación de los mismos, tantos como autores han abordado el tema. No obstante, se prefiere seguir aquí las tres grandes categorías utilizadas por Martín (1983) y Fernández (1995), quienes hacen la distinción entre métodos directos, teóricos y empíricos.

1.1. Métodos directos

Como señala Fernández (1995), los métodos directos corresponden a aquellos que calculan la evapotranspiración a través del control de las entradas y salidas de agua en el suelo; es decir, miden la ETR, la cual se determina como la diferencia entre los aportes de agua, ya sea producto de las precipitaciones medidas en el lugar o la aplicación de riego, y el agua sobrante o de drenaje. De esta forma, se tienen entradas y salidas, o bien, aportes y pérdidas; en último término, los componentes del balance hídrico², en el cual la evapotranspiración forma parte de las salidas o pérdidas.

Los métodos directos tratan de mantener las condiciones naturales en las que el proceso se desarrolla, por ello se consideran como los únicos realmente válidos (Martín, 1983). Cuentan con la ventaja de la precisión y sirven de referencia para calibrar la bondad de los resultados alcanzados por otros métodos (Fernández, 1995). No obstante, tienen la dificultad de ser costosos y delicados de aplicar junto al hecho de que los resultados obtenidos son puntuales, alcanzando su validez sólo cuando se mantienen las condiciones bajo las cuales se han generado.

Se puede señalar dentro de los métodos directos, los siguientes tipos e instrumentos utilizados: lisímetros, evapotranspirómetros, cámaras técni-

² $P + I = ET + R + G \pm \Delta S + L$, donde: P es la precipitación; I es el riego; ET es la evapotranspiración real; R es la escorrentía superficial; G es la variación en la reserva subterránea; ΔS es la variación en la reserva del suelo y L es la entrada o salida de escorrentía lateral (Sánchez, 1992).

cas, parcelas y cuencas experimentales, perfiles de humedad del suelo. Los principios y características generales de estos métodos pueden encontrarse en Martín (1983), Jensen *et al.* (1990), Sánchez (1992), De Juan y Martín de Santa Olalla (1993), Burman y Pochop (1994), Villar y Elías (1996), entre otros.

1.2. Métodos teóricos

Los métodos teóricos, o también llamados de base física, se generan fundamentalmente en la consideración de la evapotranspiración como elemento que forma parte del balance de energía y su papel en la transferencia de masa de vapor de agua entre la Tierra y la atmósfera (Fernández, 1995). Ambos aspectos están íntimamente asociados y transcurren simultáneamente.

Dentro de los procesos de orden físico, químico y biológico que tienen lugar en la Tierra, la evaporación y el calentamiento del suelo y del aire hacen uso de gran parte de la radiación neta o energía solar efectivamente disponible por la Tierra para estos y otros procesos. Lo que tratan de mensurar algunos de los métodos considerados teóricos, como los basados en la resolución de la ecuación del balance de energía³, son los volúmenes energéticos utilizados por tales procesos con el fin de determinar el valor correspondiente a la evapotranspiración o flujo de calor latente, ya sea a través de su medida o cálculo específico o estableciéndolo como un residual dentro de la ecuación general. El valor energético utilizado por la evapotranspiración se transforma luego en volúmenes de agua evaporada.

Por otra parte, los métodos teóricos que consideran la noción de transferencia turbulenta de masa de vapor de agua, se basan en el hecho que el aire en las capas bajas de la atmósfera se mueve en régimen turbulento, producto de la rugosidad del terreno y de la velocidad del viento; así el vapor de agua encuentra un medio de transporte para su difusión (Martín, 1983; Cuadrat y Pita, 1997). Dentro de los métodos teóricos se pueden mencionar los siguientes: el balance de energía propiamente, perfiles de humedad y velocidad del viento, y el flujo turbulento de humedad. Su principal desventaja está en la complejidad de los ins-

trumentos a utilizar y la cantidad de medidas necesarias para su correcta aplicación.

1.3. Métodos empíricos

Los métodos orientados a determinar la evapotranspiración, denominados empíricos por Martín (1983), Sánchez (1992) y Fernández (1995), son los métodos más utilizados en los estudios geográficos y medioambientales. Se trata, por lo general, de simplificaciones de métodos ya señalados, que a través de correlaciones entre medidas obtenidas por aquéllos y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas han permitido derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporativa de un ambiente determinado. Por ello, algunos autores, los denominan métodos climatológicos (Rosenberg *et al.*, 1983; Burman y Pochop, 1994; Villar y Elías, 1996).

Las fórmulas de los cientos de ecuaciones empíricas que se han desarrollado son muy variables en cuanto a complejidad, lo que determina que los datos necesarios para aplicarlas sean de disposición también variable. Los datos requeridos son habitualmente proporcionados por las estaciones meteorológicas completas.

En cuanto a sus limitaciones, los métodos empíricos se basan sólo (salvo excepciones) en el comportamiento de los elementos climáticos como indicadores de la evapotranspiración y por ello no son los que entregan los resultados más precisos. Por otra parte, su aplicación está fuertemente condicionada a la disponibilidad de datos en las estaciones meteorológicas. Su condición de empirismo constituye también una desventaja de estos métodos, ya que para asegurar su validez han de aplicarse en ambientes de condiciones muy similares a aquellas del área donde fueron generados. No obstante lo anterior, tienen la ventaja de ser más factibles de aplicar que los métodos anteriores por su mayor simplicidad y menor costo, sobre todo si se cuenta con una red de estaciones meteorológicas de registro continuo y emplazamiento adecuado.

Los métodos empíricos pueden diferenciarse de acuerdo al concepto de evapotranspiración al cual se refieren y pretenden estimar. De esta manera, hay métodos orientados hacia la determinación de la ETP, ETo y también ETR. Otro aspecto que permite hacer distinciones entre los métodos, es la periodicidad para la cual pueden hacerse los cálculos de evapotranspiración. El período más habitual ha sido, tradicionalmente, el anual y el mensual, en estudios de carácter meteorológico y climático general; sin embargo, en la actualidad y

³ $Rn = \lambda ET + H + G + PH$, donde: Rn es la radiación neta; λET es el flujo de calor latente o evapotranspiración donde λ es el calor latente de vaporización y ET el flujo de agua evaporada; H es el flujo de calor sensible; G es el flujo de calor del suelo; PH es la energía utilizada en la fotosíntesis y en calentar la biomasa vegetal (Sánchez, 1992).

con fines agronómicos, forestales o hidrológicos aplicados, en términos generales de uso racional del agua, están ganando importancia los métodos aplicados a períodos diarios, horarios, e incluso algunos basados en mediciones instantáneas.

En la literatura relativa al tema se utilizan con frecuencia los conceptos de *medición* y de *estimación*. La idea de *medición* hace referencia al cálculo directo del agua evapotranspirada en el lugar en que se desea obtener la información; por tanto, se trata propiamente de una *medida* real, precisa si se efectúa con precaución, pero de validez local y que no permite extrapolación. Se puede decir que los métodos directos corresponden efectivamente al tipo de método utilizado para realizar una medición. Por otra parte, la *estimación* involucra el cálculo del parámetro a través de la medida de ciertos elementos que, según el método en referencia, se consideran parte de aquellos de los que depende o que intervienen en el proceso; de este modo, la cuantificación de la evapotranspiración no se hace de modo directo, sino indirecto. Si se aplica esta distinción, los métodos teóricos y climatológicos corresponden entonces a métodos que efectúan *estimaciones*.

La clasificación más frecuente de estos métodos es de acuerdo a la variable climática sobre la que se basa la determinación de la evapotranspiración o la de mayor peso relativo; así, los métodos más conocidos y utilizados en la actualidad están basados principalmente sobre la temperatura, la radiación solar y una combinación de las nociones del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua.

Métodos basados en la temperatura del aire: los métodos basados en la temperatura son los que menos información de entrada requieren y, por ello, son simples y fáciles de aplicar. Los más sencillos necesitan como único parámetro climático la temperatura media del aire del período para el cual se desea realizar el cálculo. Otra información necesaria es el momento del año en que se está trabajando para incorporar las variaciones estacionales y latitudinales del ingreso de la radiación solar teórica, representada en estos métodos por la temperatura del aire o la insolación. Son métodos útiles cuando no se dispone de otros datos meteorológicos, pero las estimaciones que producen son menos confiables que aquellas obtenidas por métodos que consideran otros factores (McKenney y Rosenberg, 1993).

Los métodos de este grupo difieren también en el parámetro que estiman: unos calculan ETP y otros ETo.

Dentro de los métodos más utilizados de este grupo se encuentran el propuesto por C. Thornthwaite en 1948, el de Blaney y Criddle presentado en 1950 y el de Samani y Hargreaves en 1985. A partir de los dos primeros se han realizado algunas modificaciones para intensificar su uso.

Métodos basados en la radiación solar: el fundamento de este grupo de métodos radica en el hecho de que la mayor parte de la energía que alimenta el proceso de evapotranspiración proviene de la radiación solar y, por ello, ambos elementos se encuentran directamente correlacionados.

Los métodos basados en la radiación solar son algo más difíciles de aplicar que los anteriores, puesto que para su operación se requiere, además de los parámetros climáticos rutinarios, información relativa a radiación que es básica para estos modelos y también muy escasa.

Dentro de este grupo los métodos más difundidos son los propuestos por J.L. Turc en 1961, el de Jensen-Haise en 1963, el de Priestley-Taylor en 1972, el de Radiación-FAO en 1977 y el de Hargreaves.

Métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua: los métodos que se comentan a continuación son conocidos como métodos de combinación, puesto que se fundamentan en la conjunción de dos teorías: la del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua (López Cadenas y Blanco, 1976), razón por la cual cada ecuación de este grupo cuenta con un término radiativo y uno aerodinámico. Pese a apoyarse en principios teóricos, la diferencia fundamental con los métodos propiamente teóricos yace en el hecho de que éstos utilizan coeficientes empíricos en su aplicación y evitan realizar medidas muy difíciles de obtener, alcanzando de esta forma menor precisión que aquellos, pero mayor aplicabilidad y difusión de uso (Martín, 1983).

En este grupo destaca el modelo propuesto por H.L. Penman en 1948 y es la primera expresión con una fuerte base física para calcular la ETP. A partir de este modelo, se han realizado modificaciones como la propuesta por J.L. Monteith en 1965, conocida como ecuación de Penman-Monteith y considerada, en la actualidad, una de las más precisas para el cálculo de la ETo. Otras variaciones de la ecuación original de Penman son la de Penman-Jensen-ASCE (1974) y la de Penman-Monteith-FAO (1990). También se en-

cuentra, entre las ecuaciones de combinación, el método generado en 1977 por E.T. Linacre (Rosenberg *et al.*, 1983).

Métodos de estimación de evapotranspiración real: los métodos empíricos comentados hasta aquí permiten la estimación de la evapotranspiración en su límite superior, sea ésta ETP o ETo; es decir, la máxima cantidad de agua que es transferida a la atmósfera por un suelo cubierto por vegetación; sin embargo, en muchas aplicaciones prácticas lo que se requiere conocer es una medida del agua realmente evapotranspirada; en otras palabras, la ETR, en cuya determinación interviene la humedad disponible en el suelo como principal factor que establece las diferencias entre lo potencial y lo real.

Los métodos directos son los únicos que entregan una medida precisa de la ETR; no obstante, su costo y complejidad hace que su uso sea, aun en la actualidad, muy escaso. Una forma de paliar esta deficiencia, es la aplicación de algunas fórmulas empíricas propuestas por diversos autores para calcular la ETR en función de pocas variables climáticas como precipitación o temperaturas. Las más conocidas son las establecidas por L. Turc, Coutagne y el balance hídrico de Thornthwaite y Matter propuesto en 1955.

2. Métodos apoyados en la percepción remota

La percepción remota o teledetección ha logrado en los últimos años progresos notables en la determinación de una serie de variables terrestres útiles a múltiples disciplinas del saber preocupadas del estudio de las interacciones entre la superficie de la tierra y la atmósfera (Zhang y Lemeur, 1995), en las cuales el proceso de evapotranspiración constituye un interesante tema común. Desde comienzos de los años ochenta se preveía la determinación y seguimiento de la evaporación y evapotranspiración como una de las más desafiantes y promisorias de las aplicaciones de la percepción remota (Price, 1982; Barret y Curtis, 1992).

Entre los parámetros que intervienen en la evapotranspiración de la superficie terrestre, como ya se ha señalado, se encuentran la temperatura, la humedad del suelo, el albedo, el tipo de cubierta vegetal y también la radiación solar, para cuya determinación las observaciones obtenidas por percepción remota son de gran utilidad (Barret y Curtis, 1992; Engman y Gurney, 1991). Sin embargo, esta técnica todavía no permite obtener, al

menos de modo operativo y frecuente, otras variables de gran importancia en la evapotranspiración, como la temperatura del aire en las proximidades de la superficie, el déficit de vapor de agua, y datos relativos a los vientos. Así, la percepción remota tiene como tarea pendiente avanzar de acuerdo a sus potencialidades en estos aspectos (Barret y Curtis, 1992; Engman y Gurney, 1991).

La mayor parte de los modelos que utilizan información obtenida por percepción remota son complejos y utilizan, en mayor o menor proporción, datos de la superficie lograda a través de las redes meteorológicas convencionales (métodos empíricos) o medidas directas de evapotranspiración (métodos directos), con la finalidad de convertir en datos absolutos, las observaciones obtenidas por el sensor en términos relativos, así como para calibrar nuevos modelos (Bussières *et al.*, 1996). Según esto, todavía no se puede afirmar que la percepción remota constituya una alternativa a los métodos convencionales, sino una vía complementaria a los mismos, aportando como ventaja insuperable información sistemática, completa y espacialmente exhaustiva, a distintas resoluciones espaciales y también temporales sobre la variabilidad espacial de las cubiertas superficiales para toda la región estudiada (Friedl, 1996).

Los intentos que tratan de clasificar los modelos de determinación de la evapotranspiración apoyados en la percepción remota, al igual que ocurre con los modelos clásicos, son diversos. Sin considerar algunas propuestas específicas de clasificación (Delegido *et al.*, 1991 ; Caselles *et al.*, 1993 y Kustas y Norman, 1996), este apartado intenta presentar de manera general y simplificada los modelos, procedimientos o aproximaciones operativas que están orientados a la estimación de la evapotranspiración y que utilizan información proporcionada por la percepción remota.

Dentro de los modelos se pueden distinguir aquellos que han sido elaborados con este fin (directos) y los que han sido creados para el estudio de otros fenómenos o procesos superficiales, pero son útiles en el campo que aquí interesa, dada su relación con el problema (indirectos). Se puede hablar, en primer término, del modelo general basado en el balance de energía que puede ser considerado directo. Luego, las aproximaciones relacionadas con la temperatura superficial, con las características de la vegetación y aquellas que aprovechan la combinación de ambos aspectos se pueden considerar como métodos indirectos.

2.1. Modelo basado en el balance de energía superficial

Como ya se ha mencionado, la solución de la ecuación del balance de energía⁴ que describe la distribución de la radiación neta recibida por la superficie terrestre superficial, constituye uno de los métodos teóricos que intentan estimar la evapotranspiración. Numerosos intentos apoyados en la percepción remota han tratado de superar algunas de las dificultades de aplicación de esta ecuación, mediante la resolución parcial o total de sus términos, aunque estos logros todavía no son suficientes para una utilización relativamente fácil y operativa de la ecuación en su formulación original.

La resolución de la ecuación del balance de energía superficial, para fines de determinación del flujo de calor latente o evapotranspiración, deriva en el denominado *método residual*⁵, una de las aproximaciones más ampliamente utilizadas en la estimación de la evapotranspiración instantánea y diaria (Choudhury, 1994).

El método residual determina cada uno de los términos que igualan al flujo de calor latente y obtiene éste como el residuo de la ecuación; sin embargo, de los cuatro términos, sólo la radiación neta puede obtenerse en forma relativamente directa a partir de medidas de satélites (López-Baeza, 1991); los demás términos se pueden conseguir tras la combinación con información observada en tierra, fundamentalmente en estaciones meteorológicas completas.

2.2. Modelos basados en la medida de la temperatura superficial: derivaciones del método residual

Los conceptos de evaporación, transpiración y evapotranspiración, son dependientes parcialmente del déficit de presión de vapor entre la superficie evaporante y la capa de aire en contacto con ella, a lo que se suma también la cantidad de agua disponible en el suelo. Si se asume que este suministro es adecuado, la tasa de evapotranspiración (ETR) está mayormente controlada por el déficit de presión de vapor, el cual está a su vez determinado por la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie evaporante (Engman y Gurney, 1991). Esto significa que cuando una superficie está evaporando agua, está gastando parte de la

energía solar recibida y consecuentemente se está enfriando; es este enfriamiento lo que puede ser observado desde el espacio (Price, 1982; Bussiès, 1995).

Establecidas algunas relaciones entre la temperatura superficial y distintos aspectos del proceso de evapotranspiración, se entiende la importancia de estimar aquélla para determinar la evapotranspiración. La temperatura superficial es especialmente importante en el método residual, pero éste no resulta fácilmente aplicable debido a la dificultad de calcular los flujos de radiación; por ello, su formulación original ha sido modificada por R.D. Jackson y colaboradores, de acuerdo a una serie de razonamientos expuestos sistemáticamente por Delegido *et al.* (1991), Caselles *et al.* (1993) y Delegido y Caselles (1993). El modelo reformulado, que algunos autores como Carlson *et al.* (1995) y Seguin (1996) denominan *ecuación simplificada*⁶, también tiene en cuenta la temperatura superficial entre sus términos. En la posibilidad de su medida con medios remotos se fundamenta el principal aporte que puede hacer la percepción remota a la cuantificación del fenómeno de evapotranspiración. Esta ecuación sigue siendo revisada y modificada para alcanzar una mayor operatividad en su uso; en este sentido destacan los modelos elaborados y/o aplicados por Seguin *et al.* (1989 y 1994), Seguin (1993), Artigao *et al.* (1997) y Caselles *et al.* (1998) para determinar la ETR y el presentado por Delegido *et al.* (1991); Caselles *et al.* (1992 y 1993) y Delegido y Caselles (1993) para calcular la ETo y ETm.

2.3. Modelos basados en la relación entre la evapotranspiración y características de la vegetación

El fundamento sobre el que se basa la relación existente entre la evapotranspiración y algunas características de la vegetación, generadas a partir de información lograda por percepción remota, mediante el uso de diversos índices, radica en el hecho de que los tejidos vegetales, cuyo vigor es medido por alguno de esos índices, son activos igualmente en los procesos de fotosíntesis y transpiración. Por otro lado, como señalan Yang, W. *et al.* (1997) estos parámetros son afectados por elementos meteorológicos como la temperatura, la

⁴ cf. nota 3.

⁵ $\lambda ET = Rn - H - G$ donde los términos ya han sido definidos.

⁶ $ET_d = Rn_d^* - B \times (T_s - T_a)_i$ donde: ET_d es la evapotranspiración real diaria; Rn_d^* es la radiación neta diaria, expresada en mm/día; B es una constante empírica y $(T_s - T_a)_i$ es la diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire medidas cerca del mediodía.

radiación solar y el déficit de presión de vapor, entre otros.

De acuerdo con lo anterior, para comprender las variaciones en la transpiración y evapotranspiración es necesario contar con información cuantitativa de los cambios espaciales y temporales de las características de la vegetación, lo cual es posible en percepción remota (Choudhury y de Bruin, 1995; Kalluri *et al.*, 1998).

2.4. Modelos basados en la relación entre los índices de vegetación y la temperatura de superficie

Numerosos estudios han demostrado una clara relación lineal negativa entre la temperatura superficial y los índices de vegetación derivados de imágenes de satélite, en especial el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Nemani y Running, 1989; Caselles *et al.*, 1998, entre otros). Esta alta correlación sintetiza una serie de conexiones entre procesos, con lo cual tiene diversos significados y puede ser utilizada en distintos aspectos, entre ellos la evapotranspiración.

Refiriéndose a esta relación Nemani y Running (1989), Yang, X. *et al.* (1997) y Caselles *et al.* (1998) señalan que la disminución en la temperatura, a medida que se incrementa la densidad de vegetación, es producto del enfriamiento provocado en la misma por el flujo de calor latente o evapotranspiración. En consecuencia, las variaciones térmicas reflejan la tasa de transpiración vegetal y de evaporación del suelo (Gillies y Carlson, 1995; Moran *et al.*, 1996, entre otros).

En otro contexto, Nemani y Running (1989) han sugerido considerar la relación inversa entre TS y NDVI como un indicador del cociente entre la evapotranspiración real y la potencial; razón que puede ser considerada a su vez como un índice de las disponibilidades de agua en modelos hidrológicos, o si se prefiere de estrés hídrico vegetal en estudios agrometeorológicos; la misma relación puede tomarse como un indicador de peligro de incendio forestal (Martín *et al.*, 1995; Vidal *et al.*, 1994 y Chuvieco *et al.*, 1996, entre otros).

Uno de los primeros intentos de estimación de estrés hídrico en los vegetales, lo que se relaciona directamente con la disponibilidad de agua y con la evapotranspiración, fue el realizado por Jackson *et al.* (1981) al elaborar el denominado *Crop Water Stress Index* (CWSI), modelo que se ha hecho de uso más masivo y operativo a partir del trabajo realizado por Moran *et al.* en 1994, donde presentan el modelo *Water Deficit Index* (WDI).

CONSIDERACIONES FINALES

Se puede desprender de la exposición realizada que las características y apreciaciones generales sobre los métodos utilizados en la determinación de la evapotranspiración, que el fenómeno, dadas sus implicancias, ha despertado el interés de diversas ciencias y disciplinas, lo cual ha derivado en los progresos alcanzados en las últimas décadas. Estos avances se traducen en una mayor comprensión del proceso y, especialmente en la búsqueda constante por mejorar los métodos empleados en la cuantificación del proceso y en el desarrollo de nuevos modelos. En este último sentido, debe destacarse la incorporación de la percepción remota como una técnica que permite generar información sobre la superficie terrestre, útil en los estudios relativos a la evapotranspiración, hecho que merece ser considerado.

BIBLIOGRAFIA

- ARTIGAO, M.M.; HURTADO, E.; CASELLES, V.; CASTERAD, A. y MARTÍNEZ, A. (1997): Estimación de la evapotranspiración en el polígono de regadío de Flumen (Huesca). En *Teledetección. Usos y Aplicaciones* (J.L. Casanova y J. Sanz, Ed.), Serie Ciencias, Nº 14, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid, Valladolid, pp. 3-7.
- BARRET, E.C. y CURTIS, L.F. (1992): *Introduction to Environmental Remote Sensing*. Chapman and Hall. Third edition. London.
- BURMAN, R. y POCHOP, L.O. (1994): *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Developments in Atmospheric Science, 22. Elsevier. Amsterdam.
- BUSSIÈRES, N. (1995): Preliminary analysis of AVHRR brightness temperature for evapotranspiration estimation over the Mackenzie basin, summer 1994. En *reprints of the 17th Canadian Symposium on Remote Sensing*, June 13-15, 1995, Saskatoon, Saskatchewan, Canadá, vol. 1, pp. 15-20.
- BUSSIÈRES, N.; GRANGER, R. y GOITA, K. (1996): Application of satellite evapotranspiration algorithms. Documento HTML, URL: <http://www.on.doe.ca/GEWEX/projects/transpiration/aosea2.htm>.
- CARLSON, T.N.; CAPEHART, W.J. y GILLIES, R.R. (1995): A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, pp. 161-167.
- CASELLES, V.; DELEGIDO, J.; SOBRINO, J.A. y HURTADO, E. (1992): Evaluation of the maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13(5), pp. 939-946.
- CASELLES M., V; DELEGIDO G., J.V. y HURTADO S., E. (1993): Teledetección: Aplicación a la determinación de la evapotranspiración. En: *Agronomía del Riego* (coordinadores F.J. Martín de Santa Olalla y

- J.A. De Juan), Capítulo X. Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- CASELLES, V.; ARTIGAO, M.M.; HURTADO, E.; COLL, C. y BRASA, A. (1998): Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: application to the Barrax area, Albacete, Spain. *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, pp. 1-10.
- CHOUDHURY, B.J. (1994): Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 264-274.
- CHOUDHURY, B.J. y DE BRUIN, H.A.R. (1995): First order approach for estimating unstressed transpiration from meteorological satellite data. *Advances in Space Research*, vol. 16(10), pp. (10)167-(10)176.
- CHUVIECO, E.; AGUADO, A.; BARREDO, J.I.; CAMARASA, A.; COCERO, D.; MARTIN, M.P. y SALAS, F.J. (1996): Analysis of relationships between fuel moisture content, meteorological danger indices, satellite images and fire occurrence, MINERVE-2, Final Report, pp. 2-17.
- CUADRAT, J.M. y PITA, M.F. (1997): *Climatología*. Ediciones Cátedra. Madrid.
- DE JUAN, J.A. y MARTIN DE SANTA OLALLA, F.J. (1993): El estrés hídrico en las plantas, Capítulo III; La evapotranspiración, Capítulo IV; La medida de la evapotranspiración, Capítulo V; El cálculo y la estimación de la evapotranspiración, Capítulo VI. En *Agronomía del Riego* (coordinadores F.J. Martín de Santa Olalla y J.A. De Juan). Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- DELEGIDO, J.; CASELLES, V. y HURTADO, E. (1991): Determinación a escala regional de la evapotranspiración. En *La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Recursos Renovables: Agricultura* (coordinadores de la edición S. Gandía y J. Meliá), Universitat de València, Departament de Termodinàmica, Valencia, pp. 345-370.
- DELEGIDO, J. y CASELLES, V. (1993): Evapotranspiración. En *La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Climatología y Desertificación* (coordinadores de la edición S. Gandía y J. Meliá), Universidad de Valencia, pp. 205-213.
- ELIAS CASTILLO, F. y GIMENEZ ORTIZ, R. (1965): *Evapotranspiraciones Potenciales y Balances de Agua en España*. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Agricultura.
- ENGMAN, E.T. y GURNEY, R.J. (1991): *Remote Sensing in Hydrology*. Chapman and Hall. Cambridge.
- FERNANDEZ, F. (1995): *Manual de Climatología Aplicada. Clima, Medio Ambiente, Planificación*. Editorial Síntesis. Colección Espacios y Sociedades. Serie Mayor Nº 2. Madrid.
- FRIEDL, M.A. (1996): Relationship among remotely sensed data, surface energy balance, and area-averaged fluxes over partially vegetated land surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35(11), pp. 2091-2103.
- GILLIES, R.R. y CARLSON, T.N. (1995): Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 34, pp. 745-756.
- JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. y PINTER, P.J. (1981): Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, vol. 17, pp. 1133-1138, citado por Vidal, A., y Devaux-Ros, C. (1995).
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D. y ALLEN, R.G. (Eds.) (1990): *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. Manuals and Reports on Engineering Practice, Nº 70, Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, ASCE. New York.
- KALLURI, S.N.V.; TOWNSHEND, J.R.G. y DORAISWAMY, P. (1998): A simple single layer model to estimate transpiration from vegetation using multispectral and meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19(6), pp. 1037-1053.
- KUSTAS, W.P. y NORMAN, J.M. (1996): Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 41(4), pp. 495-517.
- LOPEZ-BAEZA, E. (1991): Climatología desde satélites. En *La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Recursos Renovables: Agricultura* (coordinadores de la edición S. Gandía y J. Meliá), pp. 325-344. Universitat de València, Departament de Termodinàmica, Valencia.
- LOPEZ CADENAS DE LLANO, F. y BLANCO CRIADO, M. (1976): *Hidrología Forestal*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Sección de Publicaciones. Madrid.
- MARTIN, M. (1983): Componentes primarios del ciclo hidrológico. En *Hidrología Subterránea* (directores de la edición E. Custodio y M.R. Llamas), Sección 6, pp. 281-350. Ediciones Omega S.A. Segunda edición. Barcelona.
- MARTIN, M.P.; DOMINGUEZ, L. y CHUVIECO, E. (1995): Estimating forest fire danger from AVHRR data. En: *Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing, Proceedings of the 14th EARSeL Symposium* (J. Askne, Ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 371-376.
- MCKENNEY, M.S. y ROSENBERG, N.J. (1993): Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 64, pp. 81-110.
- MORAN, M.S.; CLARKE, T.R.; INOUE, Y. y VIDAL, A. (1994): Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 246-263.
- MORAN, M.S.; RAHMAN, A.F.; WASHBURNE, J.C.; GOODRICH, D.C.; WELTZ, M.A. y KUSTAS, W.P. (1996): Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 80, pp. 87-109.
- NEMANI, R.R. y RUNNING, S.W. (1989): Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and Thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 28, pp. 276-284.
- PRICE, J.C. (1982): Estimation of regional scale evapotranspiration through analysis of satellite thermal infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-20(3), pp. 286-292.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L. y VERMA, S.B. (1983): *Microclimate, the Biological Environment*. John Wiley & Sons. Second edition. New York.

- SANCHEZ T, M.I. (1992): *Métodos para el Estudio de la Evaporación y Evapotranspiración*, Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño.
- SEGUIN, B. (1993): NOAA/AVHRR data for crop monitoring at a regional level: possibilities and limits in the european context. En *EARSEL Advances in Remote Sensing*, vol. 2(2), pp. 87-93.
- SEGUIN, B. (1996): Estimation and mapping of actual ET on a regional scale using satellite thermal infrared data: applications in the field of agricultural meteorology. En *Workshop The Use of Remote Sensing Technique in Agricultural Meteorology Practice* (Zoltán Dunkel, Ed.), Budapest, 1995, EUR Reports 16924 EN, European Commission, Luxembourg, pp. 67-72.
- SEGUIN, B.; ASSAD, E.; FRETEAID, J.P.; IMBERNON, J.; KERR, Y. y LAGOUARDE, J.P. (1989): Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10(6), pp. 1101-1117.
- SEGUIN, B.; COURAULT, D. y GUERIF, M. (1994): Surface temperature and evapotranspiration application of local scale methods to regional scales using satellite data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 287-295.
- VIDAL, A.; PINGLO, F.; DURAND, H.; DEVAUX-ROS, C. y MAILLET, A. (1994): Evaluation of temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 296-303.
- VILLAR, J.M. y ELIAS, F. (1996): Evapotranspiración. En: *Agrometeorología* (coordinadores F. Elías y F. Castellvi), Capítulo VII, pp. 259-279. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- YANG, W.; YANG, L. y MERCHANT, J.W. (1997): An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18(10), pp. 2161-2180.
- ZHANG, L. y LEMEUR, R. (1995): Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 74(1-2), pp. 139-154.