

Descripción de un proyecto de aprendizaje cooperativo multidisciplinar. Estimación versus medida de la radiación neta



F. Castellví

Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Escuela Técnica y Superior de Ingeniería Agraria, Universidad de Lleida, Calle Rovira Roure No.196. Lleida, España, CP 25198.

E-mail: f-Castellví@macs.udl.cat

(Recibido el 22 de Junio de 2010; aceptado el 7 de Septiembre de 2010)

Resumen

Cuando en el bachiller un estudiante escoge un itinerario curricular (vía) no adecuado para después cursar sus estudios universitarios, éste tiende a abandonarlos, y si en una clase hay un alto porcentaje de estos, subconscientemente el profesor tiende a reducir el nivel de exigencia. Ante esta situación se elaboró un proyecto multidisciplinar, Física y Climatología, con la finalidad de explotar sus destrezas cognitivas trabajadas en las diferentes vías, fomentar el proceso aprender para enseñar, acercar conocimientos adquiridos a la vida laboral, y mostrar la importancia de entender principios fundamentales. El proyecto se enmarca en el estudio de la radiación neta en una estación meteorológica, y se enfatiza que para su determinación, la comprensión de los procesos físicos involucrados puede ser incluso más útil que saber como se realiza su medida. El proyecto consta de tres subproyectos, siendo el dedicado a la modelización de la radiación neta crucial para que el proyecto tenga éxito. Este se detalla con el ánimo de facilitar un ejemplo de nivel exigido, así como su adaptación a un determinado centro.

Palabras clave: Proyecto multidisciplinar, Radiación neta, Climatología.

Abstract

A student having inappropriate educational background often fails the first university course. When the failure rate is expected to be high, the course objectives are difficult to attain. Modifying the teaching strategy could improve the situation, so a multidisciplinary project that involves topics in physics and climatology was developed. The project was designed to reinforce acquired capabilities, promote teaching improvement and learning, match expertise with instruction, and emphasize comprehension of principles. The project is structured in three parts and different subjects are related to the estimation of net radiation in a weather station. The main idea of the project is to promote that in some cases understanding the physics behind the parameter is often more useful than knowing how to measure it. Thus, modelling the net radiation is the crucial part of the project. The goals are to show the knowledge pursuit and to facilitate dissemination or adaptation to other universities.

Keywords: Multidisciplinary project, Net radiation, Climatology.

PACS: 92.70Np, 92.60 Vb, 92.60.Ry

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Debido a la variedad de vías (itinerarios curriculares) de acceso a las titulaciones de Ingeniería Agraria (agronomo y forestal) se ha observado que el nivel de conocimientos en Física, Matemáticas y Ciencias de la Tierra entre estudiantes de primer curso es muy dispar. Algunas de estas vías podrían considerarse como no recomendables pues a tenor de la exigencia (acorde al plan docente), recién iniciado el curso un grupo numeroso de estudiantes manifiestan su preocupación al intuir que su formación previa les dificulta seguir dichas materias con claridad. Ello, junto con su formación preuniversitaria, quizás explique su interés selectivo. Es decir, unos muestran interés en partes de la

materia que es directamente aplicable en campo, otros priorizan el uso de programas informáticos que simulan y resuelven problemas, mientras que unos pocos muestran una inquietud integral por el temario. En general, ello conlleva a la percepción de que la metodología y documentación que se ofrece para seguir el temario de la asignatura sea poco elaborada. Concretamente, desean una programación y material docente que incluya mayor número de problemas resueltos con detalle, mayor variedad de programas de simulación, sesiones dedicadas a la resolución de problemas con enunciados que reflejen tareas a realizar en la vida laboral, y la eliminación de algunos temas por ser *demasiado teóricos* (término usado como sinónimo de poca utilidad). En un contexto generalizado esta problemática no

es exclusiva para este caso particular o para estas ingenierías, parece una problemática internacional y de antaño reconocida [1, 2, 3]. No obstante, el continuo aumento de estudiantes que no han cursado asignaturas de física en el bachiller ha hecho que en estas titulaciones la problemática sea preocupante, especialmente en ingeniería forestal que mostró un incremento del 9% al 48% entre los cursos 2004/05 al 2009/10. En consecuencia, además de ofrecer un curso propedéutico de Física, para el primer curso de esta titulación se diseñó como estrategia de aprendizaje un proyecto multidisciplinar para mejorar los procesos enseñanza – aprendizaje – enseñanza, comunicación estudiante – profesor, relacionar materias que se dictan en las asignaturas de Física y Climatología y a su vez enmarcarlas en una perspectiva laboral.

El proyecto resulta adecuado para un grupo de 9 personas, y se compone de tres subproyectos. La heterogeneidad de vías (siete en total) permitió diseñar subproyectos diferenciados, así el proyecto trabaja multitud de competencias. Cada subgrupo queda formado por tres alumnos con vías curriculares diferentes para garantizar mayor variedad de destrezas y habilidades. Se pretende que cada estudiante explote sus virtudes curriculares, y se fuerce a aprender – enseñar en equipo. Se evalúa el proyecto, en consecuencia, el trabajo individual influye en la calificación de sus compañeros.

En el proyecto se elaboran instrumentos, se realizan medidas, se diseñan entornos para difundir datos, se elaboran pequeños manuales o protocolos, y se estudia como tema la radiación neta, término crucial en la ecuación de la primera ley de la termodinámica aplicada a una superficie natural y útil para estimar la evapotranspiración la cual es a su vez determinante en la ecuación del balance de agua [4]. Por último, el grupo aprende que para cuantificar una variable, a veces, el conocimiento teórico ofrece una solución más útil y práctica que el saber usar el instrumento que proporciona la medida.

Por ser la temática extremadamente abierta no se ha considerado necesario la asignación de expertos de la técnica puzzle pues se plantean numerosas cuestiones e incentiva conversaciones extraescolares no solo entre alumnos, también fuera del ámbito universitario con personas cuya actividad laboral es afín a alguna temática específica (electrónica, informática, ingeniería, etc.).

En base a la experiencia, el proyecto es ambicioso y uno de los subproyectos se considera demasiado abierto para estudiantes de primer curso. Por parte del equipo docente es crucial elaborar un documento guía muy ceñido al nivel de exigencia perseguido. Con el ánimo de facilitar parte del trabajo realizado, y abiertamente mostrar una propuesta de nivel a exigir, se detalla este subproyecto. Debido a la rapidez con la que avanza la tecnología, los otros dos subproyectos se describen de forma breve.

II. MÉTODO

El grupo se divide en tres subgrupos; S1, S2 y S3. Cada subgrupo es responsable de un subproyecto que debe

realizar siguiendo un documento guía. Una vez finalizado, mediante un número limitado de seminarios se hacen las sugerencias y aclaraciones oportunas para mejorarlo. Cada subgrupo decide cuando quiere organizar un seminario. A continuación se describen las tareas de cada subgrupo en el subproyecto.

Subgrupo S1: Responsable de construir instrumentos para medir la temperatura y humedad del aire, y la radiación solar, de elaborar un documento describiendo el material usado, los principios teóricos y un sucinto protocolo para que un lector pueda reproducir los instrumentos. Como patrón (calibración) se les facilitan instrumentos comerciales. Para medir la temperatura y humedad del aire hacen un termopar y se calibra un condensador cuya permitividad dieléctrica varía con la humedad del aire, respectivamente. Para la radiación solar se calibra una célula fotovoltaica.

Subgrupo S2. Responsable de elaborar un proceso de adquisición - almacenamiento – presentación de medidas. Consta de las siguientes tres tareas. Programar un *dataloguer* comercial para que operen los instrumentos elaborados por el subgrupo S1. Realizar transferencias de datos registrados a un terminal (por ejemplo, vía modem, rayos infrarrojos, etc.). Y elaborar una hoja de cálculo que facilite la difusión de las medidas y estimas de la radiación neta en una página web.

Subgrupo S3. Responsable de elaborar un documento con definiciones, explicaciones de leyes físicas, ecuaciones, conceptos y limitaciones para estimar la radiación neta.

Los subgrupos S1 y S2 cuentan con dos sesiones de seminario, mientras que el S3 cuenta con tres.

Supervisado el proyecto, todo el grupo procede a realizar una campaña de medidas sobre la superficie de referencia. Se instalan instrumentos comerciales y los elaborados por el subgrupo S1. Esta actividad permite comentar algunos aspectos sobre el protocolo establecido para la correcta instalación de una estación meteorológica estándar. Durante el periodo de toma de medidas, los subgrupos se disuelven, y se forman tres nuevos subgrupos. Cada integrante del nuevo subgrupo ha pertenecido a un subgrupo diferente, y debe explicar al resto su subproyecto. Finalizado el proceso de enseñanza – aprendizaje entre estudiantes, cada subgrupo procesa las medidas, y prepara una exposición de resultados que se realiza en un seminario conjunto. Ello fomenta la discusión y espíritu crítico. El seguimiento del proyecto, y la discusión propia del seminario permite otorgar a un estudiante destacado una calificación superior a la asignada al proyecto. La dinámica seguida no se ajusta exactamente a la técnica puzzle [5].

III. SUBPROYECTO S3. ESTIMA DE LA RADIACIÓN NETA

Los apartados A, B y C muestran el nivel teórico exigido, y se detallan para que puedan usarse como una referencia docente para una propia adaptación o como base para estudiantes que desarrollen trabajos relacionados más avanzados (proyectos o trabajos finales de carrera).

Partiendo de un documento guía, en los seminarios el subgrupo se va orientando para que básicamente trabaje los apartados presentados en estas tres secciones sin superar el nivel expuesto. Aunque vía web el estudiante puede encontrar parte de la información, su veracidad debe contrastarse con manuales recomendados [4, 6, 7, 8, 9, 10]. El apartado D describe un experimento únicamente usando instrumentos comerciales. Se muestran los resultados de mayor interés y se listan puntos de discusión relevantes a tratar en el seminario final de proyecto. Nótese que para los objetivos perseguidos no es necesario realizar una campaña de medidas tan extensa, y si no hubiera posibilidad de realizarla, el autor puede facilitar dichas medidas. Ello también facilita la adaptación de este subproyecto a un trabajo de grupo.

A. Definiciones y conceptos

El cultivo de referencia. Típicamente gramíneas o alfalfa (el recomendado es *festuca arundinacea*), de 10 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y bien regado. Es el que por normativa se encuentra en las estaciones meteorológicas para así poder comparar registros tomados en lugares diferentes.

Cuerpo negro. Es un cuerpo capaz de absorber cualquier onda electromagnética que incida sobre su superficie. No tienen lugar procesos de reflexión y transmisión, solo absorción. Es un cuerpo ideal.

Emisión radiativa. Un cuerpo a temperatura T emite energía radiante. En consecuencia, todo cuerpo emite energía radiante puesto que la tercera ley de la termodinámica establece que un cuerpo no puede alcanzar una temperatura de cero absoluto. El término energía radiante se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de un cuerpo. Esta energía es la transportada por ondas electromagnéticas emitidas y se calcula como la integración de la energía monocromática para todo el espectro. Una onda monocromática se caracteriza por una longitud de onda, λ , y una frecuencia, ν , y transporta una energía, E_ν , de valor, $E_\nu = h \nu$ (h es la constante de Planck). Un cuerpo en equilibrio térmico emite a razón de la energía absorbida, por tanto un cuerpo negro emite el máximo de energía (radiador perfecto).

Radiación extraterrestre, R_a . Radiación emitida por el Sol que por unidad de tiempo recibiría la superficie terrestre unidad si no hubiera atmósfera. Es por tanto un flujo de energía de origen electromagnético. El 98.8 % de R_a es recibida por ondas que comprenden longitudes de onda dentro de la banda, $10 \text{ nm} \leq \lambda \leq 0.1 \text{ m}$. El 7.8 % de R_a corresponde a la banda del ultravioleta ($10 \text{ nm} \leq \lambda \leq 0.4 \mu\text{m}$), el 39.8 % al visible ($0.4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$), el 38.8 % al infrarrojo ($0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 100 \mu\text{m}$), y el 12.4 % a las microondas ($100 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.1 \text{ m}$). El flujo de energía restante (1.2 %) la comprenden los rayos X ($0.1 \text{ nm} \leq \lambda \leq 10 \text{ nm}$).

Radiación solar, R_s . Es la porción, τ , de R_a que incide sobre la superficie terrestre, $R_s = \tau R_a$ [τ se denomina transmisividad atmosférica, es adimensional, y típicamente oscila entre 0.2 (días totalmente nublados) y 0.8 (días

totalmente despejados)]. La R_s se recibe en forma de radiación directa y difusa, así pues es la suma de ambas. La mayor parte de R_s corresponde a la banda del visible e infrarrojo cercano, $0.4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m}$. Comúnmente, este espectro se denomina espectro de onda corta. El instrumento para medir la R_s se denomina piranómetro.

Radiación terrestre. Radiación dentro del siguiente espectro, $3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 80 \mu\text{m}$. Comúnmente, este espectro se denomina espectro de onda larga. La Tierra emite radiación terrestre donde el 99% de esta corresponde a la banda, $3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 80 \mu\text{m}$. La atmósfera emite radiación terrestre, básicamente en la banda, $4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 120 \mu\text{m}$.

Albedo, α . Cantidad, típicamente expresada en porcentaje, referida a una superficie obtenida como el cociente entre la radiación solar reflejada y la incidente. La banda del espectro que básicamente compone toda la radiación reflejada es de 0.4 a 3.0 μm . En promedio (integrado para diferentes ángulos de radiación incidente) el albedo de la nieve reciente es máximo, $\alpha = 86 - 95 \%$. Las nubes tienen un albedo muy variable, típicamente varía entre 20 – 90 %. Para un cultivo denso y homogéneo bien regado de *festuca arundinacea*, $\alpha = 20 - 25 \%$, típicamente se toma como valor medio $\alpha = 23 \%$.

Radiación terrestre resultante en superficie, R_{tr} . Suma entre la radiación terrestre saliente o hacia arriba (emitida por la superficie terrestre) y la incidente o hacia abajo (emitida por la atmósfera). Por convenio, el flujo de energía incidente se toma positiva y viceversa. Se determina mediante un balance en onda larga. La R_{tr} , siempre es negativa.

Radiación neta, R_n . Balance de energía. La R_n se determina añadiendo a R_{tr} el balance de radiación en onda corta. Puede ser positiva (día) o negativa (noche). Típicamente, R_n se determina en una superficie situada encima del sistema suelo – vegetación, y en consecuencia se invierte en calentar (enfriar) el suelo, G , el aire adyacente, H , y la vegetación, W , en activar el proceso de fotosíntesis, F , y fomentar transiciones de fase del agua (evaporación, transpiración, condensación, solidificación), LE . Para una superficie extensa y homogénea (ello permite despreciar energía advectada en la horizontal), se tiene, $R_n = G + H + W + F + LE$, que constituye la ecuación del primer principio de la termodinámica para el sistema suelo – vegetación – atmósfera en superficie, comúnmente denominada ecuación del balance de energía en superficie. En general (a excepción de superficies con vegetación densa y de mucha envergadura, típicamente bosques), los términos W y F son pequeños (inferiores a un 5% de R_n). Por ello es común, y especialmente en agricultura, el uso de la siguiente simplificación, $R_n = G + H + LE$. En base diaria, R_n es el término energético dominante. El instrumento de medida se denomina radiómetro neto.

Unidades típicas usadas en ingeniería agraria para R_a , R_s y R_n : W m^{-2} , y $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

B. Principios fundamentales. Consecuencias

La Distribución de Planck. La superficie de un cuerpo a temperatura T (K) emite ondas electromagnéticas cuya

distribución espectral de energía (distribución de Planck) se puede expresar en términos de longitud de onda o de frecuencia. La densidad de energía por unidad de longitud de onda, $dE_\lambda/d\lambda$, expresada en $J m^{-3} s^{-1}$, es:

$$\frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

donde $h = 6.62606896 \times 10^{-34} J s$ (constante de Planck), c es la velocidad de la luz ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) y k es la constante de Boltzmann ($k = 1.3805 \cdot 10^{-23} J/K$).

Ley de desplazamiento de Wien. Igualando la Ec. (1) a cero (condición de máximo), se determina que un cuerpo negro a temperatura T emite su máxima energía monocromática en una longitud de onda, λ_x (m), de valor $\lambda_x = 2.898 \cdot 10^{-3}/T$.

Ley de Stefan-Boltzman. Integrando la Ec. (1) para todas las longitudes de onda, se obtiene la energía total, E , emitida por un cuerpo negro por unidad de superficie y tiempo, $E = \sigma T^4$, siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$.

Consecuencias. El sol puede considerarse como un cuerpo negro a una $T \approx 5900 K$, y puesto que $\lambda_x \approx 0.49 \mu m$ la mayor parte de Ra se centra en la banda del visible e infrarrojo cercano. La Tierra y la estratosfera se comportan como cuerpos negros a $T = 288 K$ y $210 - 220 K$, respectivamente. Emiten su máxima energía en el infrarrojo lejano en longitudes de onda centradas sobre los $10 \mu m$ y $14,5 \mu m$, respectivamente. Los gases que componen la atmósfera tienen muy poca capacidad de absorber ondas en el dominio espectral $7 \mu m \leq \lambda \leq 12 \mu m$ que es justamente el dominio donde se centra la máxima energía emitida por la Tierra. Este dominio espectral se conoce como ventana atmosférica. El agua líquida (gotas) y aerosoles en suspensión en la atmósfera reducen la ventana atmosférica, y por tanto, en estos casos la atmósfera absorbe más energía. Para un determinado lugar, las temperaturas mínimas, Tn , alcanzadas en noches de cielo despejado son pues menores que en cielos con nubes o contaminados. Los gases atmosféricos también tienen poca capacidad de absorber ondas en el dominio espectral del visible, pero las nubes tienen un albedo muy variado. Por ello, la R_s (o transmisividad) es tan variable. A mayor R_s , mayor será el registro de la temperatura máxima, Tx , del aire en contacto con la superficie terrestre, y en consecuencia la amplitud térmica diaria del aire, $(Tx - Tn)$, y viceversa. Existe pues una correlación positiva entre la transmisividad atmosférica y la amplitud térmica del aire en base diaria. Diversos experimentos muestran una alta correlación para la siguiente expresión:

$$\frac{R_s}{R_a} = a(Tx - Tn)^{0.5}. \quad (2)$$

Donde a es un coeficiente empírico que, sobre el cultivo de referencia, típicamente varía dentro del rango, $0.16 \leq a \leq 0.19$, tomando valores mayores y menores en lugares de costa y continentales, respectivamente. Lo ideal es calibrar la Ec. (2) en el lugar de estudio mediante una expresión

lineal generalizada, $\tau = a(Tx - Tn)^{0.5} + b$, especialmente en islas.

Puesto que un cuerpo negro es un objeto modelo o ideal, la ley de Stefan-Boltzmann aplicada a un cuerpo real se describe como; $E = \varepsilon \sigma T^4$ siendo ε un coeficiente denominado emisividad que indica la fracción de radiación de cuerpo negro que es capaz de emitir una superficie natural. Para la atmósfera, ε aumenta a mayor contenido de vapor agua. Al integrar la ley de Stefan-Boltzmann en una columna de atmosfera, se obtiene la siguiente expresión semi-empírica para la emisividad de la atmósfera, ε_a :

$$\varepsilon_a = \beta \left(\frac{e}{T}\right)^{1/7}. \quad (3)$$

Siendo β una constante, e es la presión de vapor en kPa , y T expresada en K . También se han propuesto diferentes relaciones empíricas que básicamente dependen de la presión de vapor, por ejemplo, $\varepsilon_a = (\beta_1 + \beta_2 \sqrt{e})$ siendo β_1 y β_2 dos constantes que deben calibrarse. Para una superficie natural suelo - vegetación, la emisividad varía en el rango $0.95 \leq \varepsilon_{sv} \leq 0.99$.

C. Estimación de la radiación neta mediante medidas estándar en una estación meteorológica. Disponibilidad de medidas

La suma del balance de energía radiativa entrante y saliente de la superficie terrestre en onda corta, $(E_c \downarrow + E_c \uparrow)$, y en onda larga $(E_L \downarrow + E_L \uparrow)$, para una superficie colocada paralelamente sobre el sistema suelo-vegetación puede expresarse como sigue:

$$Rn = (1 - \alpha) R_s + R_{tr} \quad (4)$$

Donde $R_{tr} = \varepsilon_a \sigma T^4 - \varepsilon_{sv} \sigma T_{sv}^4$, siendo T_{sv} la temperatura radiativa de la superficie suelo - vegetación. Puesto que T_{sv} no se mide en las estaciones agro - meteorológicas (no es una medida estándar), ésta se aproxima a T . Para superficies herbáceas, uniformes y regadas, $(1 - \alpha) \approx 0.77$, $\varepsilon_{sv} \approx 0.975$, y en la Ec. (3), $\beta \approx 1.72$. Luego, Rn puede estimarse cada 20 min., 30 min.,..., 60 min. mediante la siguiente expresión:

$$Rn = 0.77 R_s + \left[1.72 \left(\frac{e}{T}\right)^{1/7} - 0.975 \right] \sigma T^4. \quad (5)$$

Para periodos mayores (diurno, diario) debe integrarse la Ec. (5), aunque para un día otras expresiones permiten su estimación a partir de medidas diarias. Por ejemplo, la FAO propone:

$$Rn = 0.77 R_s - \left(a_c \frac{R_s}{R_{sx}} + b_c \right) (a_1 + b_1 \sqrt{e}) \sigma \frac{(Tx^4 + Tn^4)}{2}. \quad (6)$$

R_{sx} denota la radiación solar para un día despejado. Esta puede estimarse mediante la expresión, $R_{sx} = \tau_x Ra$, donde τ_x es la transmisividad máxima. Su valor medio es 0.75. Si el lugar de estudio se encuentra a una altura considerable sobre el nivel del mar, z (m), la siguiente expresión permite corregir la reducción de capa de atmosfera, $\tau_x = 0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z$. Los coeficientes a_c , b_c , a_1 y b_1 son constantes específicas del lugar. Si su calibración no es posible, se recomiendan los siguientes valores: $a_c = 1.35$, $b_c = -0.35$, $a_1 = 0.34$ y $b_1 = -0.14$.

Disponibilidad de medidas. Si bien la medida de Rn no es común, en regiones dedicadas a la agricultura las estaciones meteorológicas registran medidas de radiación solar, temperatura y humedad (o presión de vapor) del aire. Puede suceder que durante un determinado periodo/s haya falta de registro (rotura de un instrumento, pérdida de datos, etc.). Típicamente, en zonas remotas únicamente se registran medidas de precipitación y temperatura en base diaria, si bien existen modelos para estimar la presión de vapor [11, 12]. Otra alternativa, consiste en usar ecuaciones empíricas basadas en la temperatura media del periodo considerado y se recomienda reemplazar en la Ec. (5) el término $[a_1 + b_1 e^{0.5}]$ por la expresión,

$$\varepsilon_a = 0.261 e^{(-7.7710 \cdot T^2)} - 0.02. \quad (7)$$

Con respecto a R_s , no hay una expresión consensuada para su estimación [13, 14]. Para climas donde predominan situaciones anticiclónicas, la Ec. (2) ofrece buenas estimas en base diaria o en periodos mayores (semanal, quincenal, mensual) [13]. Para un terreno extenso y plano (en la práctica sin obstáculos importantes alrededor del lugar), la radiación extraterrestre en base diaria para el día juliano J puede determinarse conociendo la latitud del lugar, ϕ (positiva y negativa para el hemisferio norte y sur, respectivamente, y expresada en radianes). La siguiente expresión determina Ra en $MJ m^{-2} día^{-1}$.

$$Ra = [24(60)/\pi] C d [W \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin W], \quad (8)$$

C es la constante solar, $C = 0.0820 MJ m^{-2} min^{-1}$, d es la distancia relativa Tierra-Sol, $d = [1 + 0.033 \cos (2\pi J/365)]$, δ es la declinación en radianes, $\delta = 0.409 \sin [2\pi J/365 - 1.39]$, y W es el máximo ángulo horario, $W = \text{acos} [-\text{tag } \phi \text{ tag } \delta]$.

D. Materiales y métodos

Sobre una parcela (85 x 42 m²) de *festuca arundinacea* (0.12 m de altura en promedio) regada por aspersión operaron durante cinco meses (mayo – septiembre) a 1.5 m de altura los siguientes instrumentos comerciales: Un piranómetro (CMP3, Kipp & Zonen), tres radiómetros netos [CNR1 y RnLite (Kipp & Zonen) y Q7 (Radiation and Energy Balance Systems)] y una sonda de temperatura y humedad relativa (HMP50, Vaisala). Se tomaron medidas cada media hora. Durante los 75 primeros días (periodo I) todos los sensores operaron en el centro de la parcela. A excepción del radiómetro CNR1, y del piranómetro, durante el resto de la campaña (periodo II) el resto de los

instrumentos se trasladaron a un extremo de la parcela cerca de la transición parcela – suelo desnudo y en donde la vegetación no estaba en las mismas condiciones que el resto de la parcela (debido a riego deficitario y procesos de micro-advección de flujo de calor sensible). El radiómetro Q7 se colocó a 0.5 m dentro de la parcela, y el radiómetro RnLite junto con la sonda HMP50 se colocaron justo en la transición. Los desplazamientos se realizaron como pruebas de casos en que la parcela no es homogénea. El radiómetro CNR1 se tomó como referencia (mide las cuatro componentes de la Ec (4) por separado) [15]. La bondad de las medidas de RnLite y Q7, y la estima de Rn , Ecs. (5) y (6), se compararon mediante un análisis de regresión, el error cuadrático medio, ECM, y su porcentaje de error sistemático, SE_sist (%), como indicador de la porción de error que podría ser corregido sin modificar ostensiblemente el modelo [16], y el error relativo, RE (%). En la comparación se excluyeron días con precipitación, y de mantenimiento (riego, segado y limpieza de sensores). Para los periodos I y II, se obtuvieron un total de 32 y 29 días completos, respectivamente.

E. Resultados

La Rn horaria y diaria se determinó como promedio de las medidas y estimas [Ec. (5)] cada 30 min. La Tabla I muestra los resultados en base horaria y diaria para ambos periodos. Los resultados de las estimas cada 30 min. no se muestran por ser similares a los horarios. Así mismo, puesto que en base diaria se observó que las diferencias entre la radiación neta determinada mediante las Ecs. (5) y (6) resultaron insignificantes, la Tabla I únicamente muestra los resultados obtenidos mediante la Ec. (6).

TABLA I. Resultados de la regresión lineal (pendiente, Pend.; intersección, Int.), coeficiente de regresión, R², error cuadrático medio, ECM, y su porcentaje de error sistemático, SE_sist, y el error relativo RE de la comparación de medidas (Q7 y RnLite) y estimas [Ecs. (5) y (6)] en base horaria y diaria con respecto a la medida de referencia (CNR1).

Base temporal:	Periodo I			Periodo II		
Horaria	Q7	RnLite	Ec. 5	Q7	RnLite	Ec. 5
Pend.	0.96	1.01	1.00	1.01	1.08	1.00
Int. (W/m ²)	16	6	8	17	7	8
R ²	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98
ECM (W/m ²)	15	11	29	20	29	30
SE_sist (%)	82.5	48	9	88	91	9
RE (%)	6	5	6	12	12	6
Diaria	Q7	RnLite	Ec. 6	Q7	RnLite	Ec. 6
Pend.	0.89	1.00	0.82	0.93	1.08	0.81
Int. (W/m ²)	2	1	3	3	1	3
R ²	0.99	0.99	0.73	0.99	0.99	0.74
ECM (W/m ²)	0.87	0.67	1.26	1.58	1.67	1.25
SE_sist (%)	95.5	91.5	50.5	98.5	98.5	53
RE (%)	7	5	7	12	12	7

En base horaria (o semi-horaria), para el periodo I tanto la Rn medida como estimada pueden considerarse de calidad. Los valores del coeficiente de correlación indican que prácticamente se capturó toda la variabilidad de la Rn de

referencia, y un RE del 5% es una precisión adecuada para la mayoría de estudios micrometeorológicos [15]. La diferencia básica entre la medida y la estima se debe al valor obtenido para SE_{sist} . Puesto que la Ec. (5) contempla todos los procesos físicos involucrados en Rn , el pequeño porcentaje de SE_{sist} indica que no sería fácil mejorar las estimas mediante un único algoritmo. Sin embargo, las medidas podrían mejorarse significativamente mediante una calibración, especialmente para el radiómetro Q7 que presenta una regresión lineal no centrada en el origen. Para el periodo II, las medidas muestran un error relativo superior al 10% y se acentúa la necesidad de calibración de los radiómetros observada para el periodo I. Las pendientes aumentan debido a que el albedo del suelo desnudo es menor que para el cultivo de referencia. Las estimas observadas son similares al periodo I. En base diaria, para el periodo I se observa que a pesar de que las estimaciones están sujetas a un error relativo del 7%, el ECM podría reducirse significativamente si se ajustasen los coeficientes empíricos de la Ec. (6). Para la Ec. (5), en base diaria SE_{sist} fue, $SE_{sist}=49\%$, mientras que en base horaria, $SE_{sist}=9\%$. Esta diferencia sugiere que los coeficientes debieran ajustarse para diferentes periodos (por ejemplo, nocturno y/o diurno), y/o para diferentes intervalos de alguna variable relevante (humedad, altura solar, etc.). Dicho ajuste mejoraría el valor del coeficiente de correlación. Para el periodo II, las estimas son de la misma calidad que para el periodo I, mientras que las medidas ofrecen un RE demasiado elevado, $RE=12\%$, como para considerarlo una referencia de comparación.

F. Discusión

Cuando una variable es fundamental, el uso de la estima con respecto a la medida debe justificarse. Para Rn sobre el cultivo de referencia en estaciones meteorológicas podría decirse:

1. Si se dispone de un piranómetro, un termómetro, y un higrómetro, las Ecs. (5) y (6) ofrecen estimas de calidad. Para superficies homogéneas (caso de estudio durante el periodo I) otros estudios corroboran los resultados mostrados en la Tabla I [7].
2. Un radiómetro neto de precisión tiene un coste (adquisición y mantenimiento) elevado, el cual es difícilmente justificable para tareas que no sean de investigación. No debe compararse el coste total de un piranómetro y una sonda de temperatura y humedad con el de un radiómetro neto. Una red de estaciones meteorológicas no tiene como único objetivo medir Rn .
3. Frecuentemente, la superficie de las estaciones no cumplen las normas de referencia. Ello puede ocurrir debido a: 1) fallos en el sistema de riego, 2) encharcado frecuente en climas húmedos, 3) el segado para mantener continuamente la vegetación entre 10 -15 cm de altura tiene un coste elevado, 4) en climas fríos la vegetación entra en dormancia. Ello induce a que el albedo sea variable y superior al 23%. En estos casos la medida debe eliminarse. Subsecuentemente, se tienen series temporales con gran número de lagunas (falta de dato). Sin embargo, como

muestra la Tabla I, las Ecs. (5) y (6) ofrecen estimas más acordes a la que se obtendría si estos incidentes no hubieran ocurrido. Los autores de este trabajo no han encontrado otros estudios similares para establecer una comparación (búsqueda bibliográfica restringida a revistas SCI). Los resultados obtenidos se deben a que el balance de energía en onda corta, $(1-\alpha)R_s$, no queda alterado, y el error cometido en la estima de Rn debido a *errores* (diferencias entre una superficie homo y heterogénea) en la presión de vapor y la temperatura del aire es pequeño en comparación con el error asociado a una variación en α .

4. Además de la problemática mencionada en 3, puede suceder que el radiómetro neto no funcione correctamente. Aparte de la rotura de algún componente (típicamente rotura de las cúpulas que resguardan las células fotoeléctricas), a veces pequeñas motas de polvo, heces de animales, etc. depositadas sobre su superficie, o una pequeña desnivelación (por ejemplo asentamiento de pájaros en los soportes, etc.) distorsionan significativamente la medida. Puesto que Rn es un término importante dentro de la ecuación de balance de energía, aunque su medida fuera disponible, se recomienda su estima. La comparación entre medidas y estimas puede ayudar a detectar deficiencias en la medida, y también ser usada para rellenar la falta de dato en la serie temporal de Rn .

5. Junto con la Ec. (7), un experimento previo para calibrar la Ec. (2) permite estimar Rn diaria en estaciones termopluviométricas. Bajo la hipótesis de que la calibración sea robusta en una zona climáticamente homogénea (no ha habido cambios en el entorno que afecten al microclima), cabe la posibilidad de construir largas series de Rn en lugares remotos [17].

6. Generalmente, los modelos de simulación climática generan datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, y radiación solar [18, 19]. Implementando las Ecs. (6) y (7), se determina Rn que permite usar las ecuaciones más precisas para estimar la evapotranspiración [6, 8, 17]. Ello permite simular dosis de riego y evaluaciones de recursos hídricos.

IV. CONCLUSIONES

Se presenta un marco en el que se observó un creciente distanciamiento entre alumno - profesor debido al brusco cambio de exigencia bachiller – universidad y en algunos casos agravado por haber cursado vías curriculares no adecuadas. En base a la experiencia de diferentes autores [20, 21, 22, 23], se decidió diseñar un proyecto como estrategia de aprendizaje que ayudara a corregir la percepción formada sobre los denominados temas *demasiado teóricos o poco útiles*. Entre otras habilidades, el proyecto trabaja la determinación de una variable de forma que el conocimiento teórico es más útil que la toma de la medida. En nuestro caso el proyecto tuvo un periodo de adaptación de cuatro cursos académicos (2004/05 al 2007/08) en el que los alumnos realizaron trabajos de carácter voluntario. El proyecto descrito se implementó a partir del curso 2008/09 debido a la creciente y alta

participación que pasó del 38% (curso 2004/05) al 81% (2007/08).

Como indicadores de los resultados académicos obtenidos se destacan tres. Primero, la disminución de la calificación 'no presentado' que paso del 21% (promedio de los cursos del 2001 al 2004 en que no se aplico ningún trabajo) al 6% para los dos cursos en que se aplico el proyecto. Segundo, la mayor afluencia de alumnos desarrollando proyectos y trabajos finales de carrera en temas afines. Con respecto al promedio del periodo 2001-2004, incrementó en un 27% (periodo 2008-2010). Y tercero, desde el curso 2007/08 más del 90% de alumnos que cursan la asignatura Agrometeorología (optativa) provienen de ingeniería forestal

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la competente tarea de revisión que ayudo a mejorar la exposición de resultados referentes a la aplicación del proyecto. También la ayuda recibida por R.L. Snyder (Dpt. Land, Air and Water resources, Univ. of California, Davis) y X. Carrera (Dpto de Pedagogía y Psicología, Universidad de Lleida) por el asesoramiento recibido en la redacción de este trabajo. La campaña de medidas forma parte del proyecto PROCLAM-I CGL2009-12797-C03-01 (Ministerio de Ciencia y Tecnología de España).

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Educación Nacional, *¿Qué pasa con la Ingeniería en Colombia?*, Centro Virtual de Noticias. <http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-162876.html> (Fecha de consulta: 4/11/2010).
- [2] Cravino, J. P. y Lopes, J. B., *La Enseñanza de la Física general en la Universidad. Propuestas de investigación*, Enseñanza de las Ciencias **21**, 473–482 (2003).
- [3] Ausubel, D. P y Novak, J. D., *Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo*, 2ª Ed. (Trillas, México 1983) p. 49.
- [4] Castellví, F. y Elias, F., *Agrometeorología*, 2ª ed. (Mundi Prensa Libros, Madrid, 2001) p. 517.
- [5] Aronson Elliot, <http://www.jigsaw.org> (Fecha de consulta: 5/26/2010)
- [6] Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere. Theory, History and Applications* (D. Reidel Pub. Co, Dordrecht, 1988) p. 299.
- [7] Linacre, E., *Climate data and resources: a reference and guide* (Rouledge, London), p. 366.
- [8] ASCE. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE. Manuals and Reports on engineering Practice. N° 70* (Jensen, Burman y Allen, New York. 1990) p. 322.

- [9] Foken, T., *Micrometeorology* (Springer Verlag, Berlin, 2008) p. 306.
- [10] Monteith, J. L. y Unsworth, M. H., *Principles on Environmental Physics* (Arnold, London, 1990) p. 304.
- [11] Castellví, F., Pérez, P. J., Villar, J. M y Rosell, J. I., *Analysis of methods for estimating vapor pressure deficits and relative humidity*, Agricultural and Forest Meteorology **82**, 29-45 (1996).
- [12] Castellví, F., Pérez, P. J., Stöckle, C. O y Ibáñez, M., *Methods for estimating vapor pressure deficit at a regional scale depending on data availability*, Agricultural and Forest Meteorology **87**, 243-252 (1997).
- [13] Castellví, F., *A new simple method to estimate the monthly and daily solar radiation, A study case in Lleida (a semiarid climate)*, Theoretical and Applied Climatology **68**, 231- 238 (2001).
- [14] Castellví, F., *Evaluation of three practical methods for estimating daily solar radiation in dry climates*, The Open Atmospheric Science Journal **2**, 185-189 (2008).
- [15] Kohsiek, W., Liebenthal, C., Foken, T., Vogt, R., Oncley, S.P., Bernhofer, Ch y DeBruin, H.A.R., *The energy balance experiment EBEX-2000. Part III: behavior and quality of the radiation measurements*, Boundary- Layer Meteorology **123**, 55–75 (2007).
- [16] Castellví, F., Snyder, R. L., Baldochi, D. D. y Martínez-Cob, A., *A comparison of new and existing equations for estimating sensible heat flux using surface renewal and similarity Concepts*, Water Resources Research **42**, W08406 (2006).
- [17] Castellví, F., Stockle, C. O., Perez, P. J. y Ibañez, M., *Comparison of methods for applying the Priesley-Taylor equation at regional scale*, Hydrological Processes **15**, 1609-1620 (2001).
- [18] Castellví, F. y Stockle, C. O., *Comparing the performance of Climgen and Wgen in the generation of temperature and solar radiation*, Transactions of the ASAE **44**, 1683-1687 (2001).
- [19] Castellví, F., Mormeneo, I. y Perez, P. J., *Generation of daily precipitation from standard climate data. A study case for Argentina*, Journal of Hydrology **289**, 286-302 (2003).
- [20] American Association of Physics Teachers, *Goals of the Introductory Physics Laboratory*, American Journal of Physics **66**, 483-485 (1998).
- [21] López, J. B., *Desarrollar Conceptos de Física a través del Trabajo Experimental. Evaluación de Auxiliares Didácticos, Enseñanza de las Ciencias*, Revista de Investigación y Experiencias Didácticas **20**, 115-132 (2002).
- [22] Carreras, C., Yuste, M. y Sánchez, J. P., *La importancia del trabajo experimental en física: un ejemplo para distintos niveles de enseñanza*, Rev. Cubana de Física **24**, 80-83 (2007).
- [23] Ministerio de Educación Nacional, *¿Por qué es eficaz el aprendizaje cooperativo?*, Instituto de Tecnologías Educativas. http://www.ite.educacion.es/w3/recursos2/conviencia_escolar/1_3.htm (Fecha de consulta: 5/25/2010).