

RESUMEN: Se inició un estudio del estado actual del comportamiento de los modelos hidráulicos con esquema bidimensional basado en volúmenes finitos, funcionando como modelos hidrológicos, para, de acuerdo a su rendimiento en diferentes escenarios y escalas espaciales y temporales, plantear un perfeccionamiento hidrológico a través de un modelo que describa los procesos a nivel de cuenca, y teniendo como referencia el hecho de lograr eficiencia en tiempos de simulación y proximidad a la realidad. El objetivo concreto es evaluar la utilización de las ecuaciones completas de Saint Venant en cualquier escala espacial y temporal en el proceso de secado en los modelos hidrológicos distribuidos, y optar por alternativas de simulación que mejoren los rendimientos, sin perjudicar la aproximación en la validez de las simulaciones. En esta etapa se avanzó en la inclusión de el código de pérdidas por ETP y el escenario fue la región del lucio de los Ánsares, Andalucía, España, donde los resultados de los diferentes modelos siguieron la misma tendencia real registrada de secado y corroboran un buen seguimiento del modelo de volúmenes finitos en la representación hidrológica del evento.

Palabras Clave- Cuenca, modelación, secado.

Modelación hidrológica

Distribuida con base en esquemas de volúmenes finitos

Abstract- A study of the present state of the behavior of the hydraulic models with bidimensional scheme based on finite volumes began, working like hydrologic models, for, according to its yield in different scenes and space and temporary scales, to raise an hydrologic improvement through a model that describes the processes concerning watershed, and having like reference the fact to obtain efficiency in the times of simulation and proximity to the reality. The concrete objective is to evaluate the use of the complete equations of Saint Venant in any space and temporary scale in the process of drying in the distributed hydrologic models, and to decide on alternatives of simulation that improve the performance, without harming the approach in the validity of the simulations. In this stage one advanced in the inclusion of the code of losses by ETP and the scene was the region of "Lucio de los Ánsares", Andalucía, Spain, where the results of the different models followed the same real tendency registered of drying and corroborate a good pursuit of the model of finite volumes in the hydrologic representation of the event.

Keywords- watershed, modelation, drying.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que se considera a la evapotranspiración como el segundo término en importancia de un balance hidrológico (después de la precipitación), o incluso el más relevante en regiones áridas y semiáridas, en la actualidad no existe una metodología para medirla a escalas mayores. Aunque redes de medida de flujos como la FLUXNET (Baldocchi et al., 2001) dan medidas en continuo de la evapotranspiración real, sus resultados no son directamente utilizables a escala de cuenca al ser necesario extrapolarlos espacialmente (Beven, 2001). Por estos motivos la práctica más común en hidrología es determinar la evapotranspiración real a partir de medidas de precipitación y caudal y por medio de la modelación hidrológica, siendo un procedimiento muy aceptable en la actualidad siempre y cuando se mantenga un criterio objetivo en el momento de escoger el método de cálculo a emplear en el cálculo de la ETP.

De esta manera, y a través la descripción física de los procesos hidrológicos mediante la aplicación de las ecuaciones completas de Saint Venant, ecuación de continuidad y cantidad de movimiento o las de balance hidrológico, se puede garantizar un modelo que aproxime a la realidad la cuantificación de los recursos hídricos. Sin embargo, la obtención de sus términos es normalmente complicada, principalmente por la falta de medidas directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (a acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca. El mejoramiento continuo de estas mediciones de parámetros climáticos, base para la modelación hidrológica, hace de ésta, cada día una mejor herramienta de decisión y gestión.

Los modelos hidrológicos tratan de reproducir el fenómeno lluvia-escurrimiento en una cuenca y se pueden clasificar de manera general en agregados y distribuidos. Los modelos agregados consideran básicamente a la precipitación y a las características físicas de la cuenca como un “promedio” de toda la cuenca. En cambio, los modelos distribuidos sí toman en cuenta la variación espacial de la precipitación y de las características físicas de la cuenca mediante una discretización espacial. Esta se realiza dividiendo o discretizando la cuenca en una malla de subcuencas, o como en este caso, a nivel de celdas de elementos o volúmenes finitos. Iber, como modelo hidrológico y caso estudio de la presente investigación representa un sistema distribuido de simulación numérica para flujo no permanente en lámina libre (Bladé, 2009) y permitirá la implementación de módulos que describan de manera adecuada la realidad hidrológica, y por ende respuestas acertadas en cuencas de estudio, o eventos puntuales.

II. UN MODELO HIDRODINÁMICO 2D COMO MODELO HIDROLÓGICO.

La base del caso estudio es el modelo IBER, antes llamado CARPA (Bladé, 2004), una herramienta hidráuli-

ca desarrollada por el grupo de investigación Flumen de la Universidad Politécnica de Catalunya, que describe el flujo de agua en lámina variable a partir de la resolución de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, es decir, las ecuaciones que describen la realidad del proceso sin simplificaciones. Se apoya en el programa GID como interfase de trabajo (CIMNE, 2002), que permite tratar los datos geométricos (como topográficos) a través de mallas de cálculo donde además de aplicación de diversos esquemas numéricos, se logra de manera muy amigable la visualización de resultados.

Antes de verificar la utilización de nuevas fuentes o códigos que permitan la implementación de más procesos hidrológicos, se menciona a continuación el estado actual de cómo opera IBER como modelo hidráulico, para posteriormente inducir a la necesidad de una complementación más adecuada en lo hidrológico. IBER maneja las ecuaciones completas de Saint Venant como se mencionó anteriormente, tanto en 1D como en 2D. Muchos eventos en hidráulica tienen un carácter unidimensional. Una de las maneras de obtener las ecuaciones de Saint Venant es suprimiendo las dependencias de dimensión y asumiendo cauces rectangulares de río con anchos promedios a partir de las ecuaciones bidimensionales. De cualquier manera, en nuestro interés hidrológico, la base de cálculo se centrará en las ecuaciones 2 D. Estas se obtienen a partir de leyes físicas de conservación de masa y cantidad de movimiento además de primera y segunda ley de la termodinámica, y de ellas, en un fluido Newtoniano e isótropo se obtienen las ecuaciones de Navier Stokes y para describir las variables promediadas en incrementos pequeños de tiempo y en la vertical, se concretan las ecuaciones de Reynolds. Estas ecuaciones se integran con las siguientes suposiciones de donde resultan las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant (Bladé, et al, 2009): Profundidad de la capa de agua pequeña en relación con otras dimensiones del problema. Además se asume distribución hidrostática de presiones en la vertical y una pendiente de solera reducida. En forma conservativa tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \nabla \mathbf{F} = \mathbf{H} \quad (1)$$

Donde $\mathbf{U}$ es un vector de variables de flujo, $(d/dt)\mathbf{U}$ representa la variación temporal de las variables de masa y cantidad de movimiento y $\mathbf{F}$ su variación espacial. $\mathbf{H}$ es el término independiente que representa la variación de masa y cantidad de movimiento por unidad de tiempo en un volumen diferencial que se mueve con el fluido.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu & hv \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} & huv \\ huv & hv^2 + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}; \mathbf{H} = \begin{pmatrix} I \cdot L \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

h es el calado, u y v son las componentes vectoriales de velocidad, g la aceleración de la gravedad, S_{ox} y S_{oy} las componentes vectoriales de la pendiente de fondo y S_{fx} y S_{fy} las de pendiente motriz.

Induciendo la ecuación de continuidad en las ecuaciones de movimiento tenemos las ecuaciones de Saint Venant en forma no conservativa. Tanto en la forma conservativa como no conservativa se nota la inclusión de (I-L) que hace referencia a las entradas y pérdidas hidrológicas.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = I \cdot L$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_{ox} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_{oy} - S_{fy})$$

Sin embargo, la forma conservativa presenta ventajas en el momento de plantear esquemas de resolución con discontinuidades.

Dentro de los esquemas numéricos clásicos, utilizados para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, se encuentra el método de las características, el de diferencias finitas o el de elementos finitos, sin embargo estas metodologías han presentado algunos inconvenientes en situaciones de discontinuidades o regímenes rápidamente variados (Gómez.M, 2004). Paralelamente se han desarrollado esquemas de alta resolución basados en la técnica de volúmenes finitos, que permiten tratar estos problemas. Con la discretización en volúmenes finitos el espacio se divide en una serie de celdas (o volúmenes finitos) y las variables utilizadas en el esquema numérico representan el valor medio de las variables dependientes en cada celda en un instante determinado (Cubells. R, 2004). En el caso bidimensional el espacio físico es dividido en polígonos que serán los volúmenes finitos, y cada uno de ellos tendrá unas condiciones de contorno definidas por los costados y vértices de ellos, este ha sido el esquema que desarrolló Bladé (2004) mediante su modelo CARPA (ahora IBER). De acuerdo a la disposición de la malla y vértices, este puede ser un sistema estructurado o no estructurado, lo cual es una diferencia notoria con esquemas como el de diferencias finitas donde la malla debe ser rectangular y uniforme para obtener esquemas no muy complicados (Bladé, 2004).

Adicionalmente, IBER tiene en cuenta para optimización de los procesos de cálculo la condición de Courant, limitando los tiempos de incremento en los cálculos:

$$\Delta t \leq \frac{L}{\sqrt{2} \cdot [\sqrt{u^2 + v^2} + C]}$$

Donde L es la longitud del elemento (volumen finito), u y v las dos componentes horizontales de velocidad y C es la celeridad ($C = \sqrt{g \cdot h}$). El sistema actualmente presenta un módulo hidrológico en donde interactúa la precipitación y las pérdidas por infiltración. La precipitación se presenta en manera de intensidad (mm/hora) y las pérdidas por infiltración de la misma manera a partir de 4 posibilidades de acuerdo al criterio del usuario y teniendo como base el criterio de ingeniero en el momento de cualificar el comportamiento del suelo en diferentes escenarios. Los métodos actuales de pérdidas por infiltración son: el método de pérdidas lineales FI, el de Horton y el de Green Ampt (Bladé, et al, 2009). IBER actualmente contiene dos códigos utilizados en el ambiente hidrológico. El código "leer lluvia", el cual capta todos los datos de intensidad de lluvia en la cuenca así como otros datos iniciales de la cuenca necesarios para el cálculo. El otro código utilizado "perdidas" contiene el procesamiento de las pérdidas según el método de infiltración seleccionado, asignando en cada instante de tiempo y para cada elemento de la malla, la precipitación y las pérdidas correspondientes. Al finalizar esto en cada instante, la nueva cota de agua hará parte de continuo proceso hidráulico que simula el modelo. El método Lineal de pérdidas es un modelo sencillo de dos parámetros, una abstracción inicial (mm) y la capacidad de infiltración del terreno (mm/hr). Es un método a utilizar en terrenos con poca variación de la capacidad de infiltración durante el suceso de lluvia. Normalmente esta condición sólo se halla en terrenos con poca humedad o en eventos cortos de lluvia. El método de Horton basa su principio en que la variación de la infiltración en cualquier instante es proporcional a diferencia entre la capacidad actual y la capacidad límite asintótica del tipo de terreno. Así mismo, el método de Green Ampt considera que el proceso de infiltración del suelo se rige a partir de la ley de Darcy, en combinación con la cantidad de humedad inicial del suelo, el nivel de encharcamiento del terreno y la capacidad de succión de éste, así como su permeabilidad. Así pues, todos los métodos son válidos en su contexto de aplicación, y representaban las pérdidas dentro del modelo IBER, que en principio tiene base hidráulica y no hidrológica.

III. TRATAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.

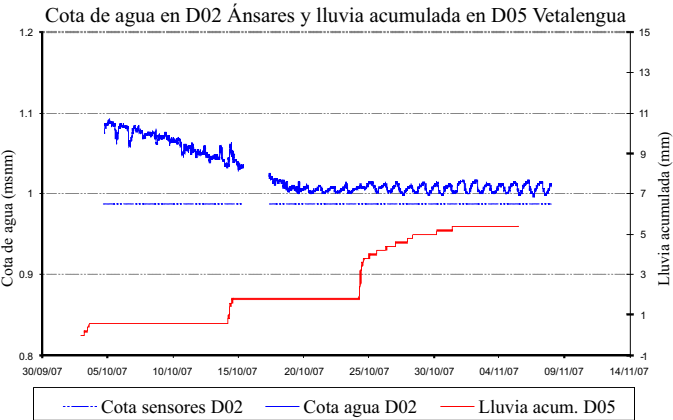
El cálculo de la ETP ha recibido gran atención por parte de los investigadores en todas partes del mundo, de tal manera que hoy en día se encuentra toda una gama de

formulas para su cálculo. De acuerdo a la utilización de diferentes procedimientos y su aplicabilidad en diversidad de escenarios en el mundo, se escogió un total de 7 métodos que representan el cálculo de la evapotranspiración potencial y que de acuerdo a estudios realizados son de mejor o peor adaptabilidad según características locales específicas, teniendo como base la modelación 2D con referencia en esquemas de volúmenes finitos. Se tuvieron en cuenta los siguientes métodos: Método de Cálculo de Evaporación por Balance Energético, Método de Jensen-Haise, Método de Blaney Criddle, Método de Thornthwaite, Método De Hargreaves Modificado, Método de Christiansen, Método De Fao-Penman-Monteith.

IV. PRUEBAS ETP EN EL LUCIO DE LOS ÁNSARES, ESPACIO NATURAL DOÑANA.

Con el fin de analizar el proceso de evapotranspiración en un modelo hidrológico distribuido 2D con base en Volúmenes finitos, de acuerdo a los métodos seleccionados, se realizó una validación de cada uno de ellos en la zona del Lucio de los Ánsares, dentro del Espacio Natural Doñana. El caso estudio es ideal ya que se cuenta con instrumentación suficiente y por ende información disponible en medidas climatológicas, hidráulicas e imágenes satelitales donde se puede corroborar el comportamiento de cada modelo de ET con el proceso real de secado del cuerpo de Agua en esta región. El periodo de interés para este caso estudio es delimitado de acuerdo a la disponibilidad de información de imagen satelital ASAR para una mejor apreciación y comparación del proceso de secado por evapotranspiración. Al mismo tiempo se verificó la disponibilidad de información climatológica e hidráulica para este mismo periodo, que se definió entre el 3 de Octubre y 7 de Noviembre de 2007. Específicamente, se contó con la siguiente información: Estación DO2 Ánsares: Cota de Agua, Calado y velocidades. La información obtenida de esta estación podría resumirse en el siguiente gráfico (Ramos, A):

FIGURA 4.- Cota de agua y Lluvia para el periodo de interés.



Además se usa la información de esta estación referente a la velocidad y dirección del viento. La velocidad media registrada para el periodo en referencia es de 2.94 m/s, la máxima de 15.6 m/s y una mínima de 0 m/s. Cabe resaltar que no hay disponibilidad de información para ese periodo de tiempo en el mismo año, Se usó información en el mismo periodo para el año siguiente (2008). Los datos de velocidad de la estación DO5 Vetallengua no difieren significativamente respecto a la estación DO2 Ánsares, en el periodo exacto de referencia (2007).

Estación DO5 Vetallengua: Temperatura del Aire en °C, Humedad relativa (%), Radiación Solar Incidente (W/m2), Radiación Solar reflejada (W/m2), y velocidad del Viento (m/s). Los valores más significativos y usados en cada uno de los modelos se muestran a continuación:

TABLA 1.- Datos Climatológicos a usar por los modelos de ET, para la zona y periodo de referencia.

RESUMEN DE DATOS CLIMATOLÓGICOS REGISTRADOS EN EL PERIODO DE REFERENCIA											
velvm/s= 2.1576		velv(Km/hr)= 7.77		HR= 74.5		rad neta(W/m2)= 171		rad neta(MJ/m2/dia)= 14.77			
rad extraterrestre= 24.35 MJ/m2/d				TMAX(° c)=29.26				neta(mm/dia)= 6.03			
9.93 mm/d				TMIN(° C)=7.54							
LAT 36.5 horas luz=11											
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL PERIODO DE REFERENCIA											
sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
21.6	18.2	11.7	10.2	11.8	13.3	13.7	16.4	17.2	21.6	23.4	23.0

Además de la información anterior, fundamental para la aplicación de los diferentes métodos de ET, se dispone del modelo de elevación digital con lo cual se formó en GID una malla de 3000 elementos distribuidos de acuerdo a condiciones de permisión máxima de error cordal relativo igual a 1 %, absoluto de 0.1m y un tamaño máximo de elemento igual a 150 m, donde se calcula de manera individual el comportamiento del calado ante el efecto de la evapotranspiración de referencia. Además se tuvo en cuenta las siguientes condiciones iniciales dentro del pre-procesamiento de datos en iber: Elevación inicial de 1.08 m.s.n.m, Maning: 0.030 (sand and clay). Los datos de lluvia introducidos al modelo tuvieron episodios esporádicos durante el mes de estudio con intensidades medias de 1.2 mm/hr.

V. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÉTODOS EN ESCENARIO SIN VIENTO.

Una vez organizada la información disponible de datos climatológicos e hidráulicos en zona de estudio, se modeló el proceso hidrológico, después de involucrar los métodos dentro del proceso de modelación. Dadas las condiciones de impermeabilidad predominante en el suelo de la zona de estudio, se ignoran las pérdidas por infiltración, dejando como única fuente de pérdidas las referidas a Evapotranspiración. Aquí se tiene en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP), en general para todos los métodos, ya que es la condición que de acuerdo a la disponibilidad hídrica del periodo de

referencia, representa mejor las condiciones físicas de la zona, sin embargo hay que aclarar que el método de FAO Penman-Monteith, trata específicamente la evapotranspiración de referencia (ET₀), y es el método recomendado por la FAO, pero esta denominación tiene el mismo fundamento teórico de la ETP. Sin embargo cada zona en el mundo, como ya se explicó anteriormente tiene condiciones muy específicas de climatología y los métodos son muy subjetivos aún hoy en día. A continuación se presentan los resultados de modelación de cada método para este caso estudio, primero se enfatizan los parámetros empleados por cada método y al final se enuncia el valor de calado inicial, y calado final (en el mismo elemento), que son los dos puntos a tener en cuenta ya que son los valores a comparar o “validar” con el dato real de cambio de calado medido en la estación DO2-Ánsares y que se fijó en 6.5 cm. También se validarán con el dato de evaporación en tanque en una de las 4 estaciones de evaporación que tiene la zona del espacio natural de Doñana.

5.1. Método de Penman Monteith FAO (evapotranspiración):

Radiación neta (MJ/m²/ día): 14.77

Temperatura periodo uno (°C): 18.2

Temperatura periodo dos (°C): 11.7

Diferencia en días entre el periodo uno y dos: 30

Altitud sobre el nivel del mar (m.s.n.m): 17

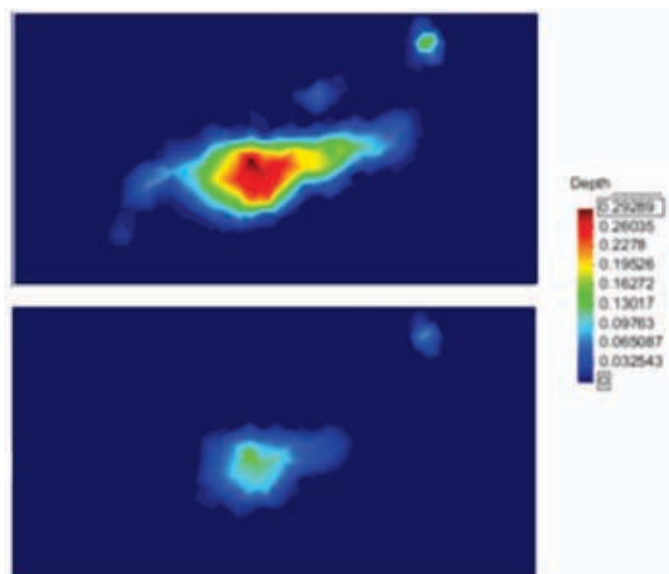
Velocidad del viento (m/s): 2.94

Temperatura de punto de Rocío (°C): 13

Valor de calado inicial: 0.30m

Valor de calado(al final del periodo): 0.14m.

FIGURA 2.- Visualización del estado Pre y Post modelación de la ETP en la zona y periodo de estudio. Método de Penman Monteith FAO



5.2 Análisis comparativo con el dato de sensor.

Cada uno de los métodos de acuerdo a su base teórica y dependiendo de su orientación energética o aerodinámica, o energética y aerodinámica, o simplemente empírica, arroja resultados que se adaptan más o menos a las condiciones físicas de la zona de estudio.

Por este motivo un modelo hidrológico debe contar con una buena cantidad de opciones de cálculo de evapotranspiración potencial y en lo posible, validarlo de manera física, para caracterizar lo más preciso posible uno de los parámetros de mayor impacto en el balance hídrico de una región (Hernández, M, 1997).

Para este caso específico, el modelo que mejor se adaptó a las condiciones del Lucio de los Ánsares y su proceso de secado en este periodo, fue el método de Thornwaitte, logrando estimar una pérdida por ET de 6 cm, frente a los 6.5 medidos en la estación, y llama la atención la sobre estimación que aporta el método de FAO-Penman-Monteith (16 cm), el cuál reúne la mayor cantidad de variables climatológicas en su proceso de cálculo. Cabe resaltar que este arroja un valor teórico de Evapotranspiración de referencia, y podría hacerse importante en este caso particular el uso del coeficiente de cultivo y así lograr una mejor estimación en el resultado de ETR de este método, sin embargo para este caso, donde se supone que están dadas las condiciones para cumplirse el valor potencial de la evapotranspiración, por condiciones de humedad disponible, el método simplemente no logra una validación de acuerdo a su estructura, para esta zona específica, lo que si logra Thornwaitte. Lo anterior tomando como referencia el dato de medida de nivel del sensor.

Los demás métodos presentan mejores o peores validaciones, también es importante resaltar que el método de Hargreaves, uno de los considerados por muchos autores (Carrera, J, Sanchez, T, 2005, et al) como el mejor de los métodos empíricos de base no física, en este caso no presentó resultados satisfactorios ya que subestimaron notablemente la ET, respecto a la lluvia caída en el periodo. Sin embargo, hay que aclarar que los mejores resultados, con excepción de lo ya mencionado acerca de Thornwaitte, los presentaron los métodos de base energética y aerodinámica, que para este caso hacen referencia a los métodos de Penman Monteith y de Christiansen.

Las metodologías que presentaron una mayor sobreestimación de resultados fueron en general los métodos de base energética, como es el caso de Blaney y Jensen. A continuación se expone una tabla explicativa de estos resultados.

TABLA 2.- Resumen general de datos de ET obtenidos por los diferentes métodos tomando como punto de comparación el dato medido de pérdida por ET en la estación Ánsares.

Método	Base	número de parámetros	pérdida estimada por ET o Ev (cm)	Sobre estimación (cm)	Sub estimación (cm)	Error(%)
Thornwaitte (EtP)	temperatura	4	6	-	0.5	7.7
Hargreaves(ETP)	energética	4	0	-	6	100.0
Cristiansen(EtP)	aerodinamica y energética	7	10	4	-	53.8
Penman Monteith FAO(Eto)	aerodinamica y energética	7	16	10	-	146.2
Blaney Criddle(ETP)	energética	3	29.6	23.6	-	355.4
Balance de Energía(Ev)	energética	3	0	-	6	100.0
Jensen Haise(ETP)	energética	2	18	12	-	176.9

La tabla anterior podría dar para discutir acerca de ese porcentaje de error que en la mayor parte de los casos podría considerarse escandaloso, sin embargo hay que tener en cuenta que estas metodologías de cálculo se afinan de manera significativa mientras se analicen periodos de tiempo más largos, además al ser el periodo de análisis relativamente corto, la cantidad de mm evapotranspirados no es alta y la sensibilidad en el error de medida de los sensores puede afectar mucho la dispersión entre el dato real y el modelado, además que en estos casos la precisión en los parámetros de los métodos usados debe ser de gran confiabilidad, y es allí donde la incertidumbre en el modelo de FAO Penman Monteith es muy alta, por la difícil consecución de sus variables, y puede verse un poco injusta en casos como éste, valorarlo negativamente.

VI. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÉTODOS EN ESCENARIO CON VIENTO.

Un factor a tener en cuenta y que puede incidir en el resultado de estos modelos a nivel de calado, es la acción del viento en el tiempo y su posible afección hacia el movimiento de expansión del cuerpo de agua, lo que supondría la conservación del recurso en cantidad, pero en una mayor extensión. Es un punto que se intenta analizar posteriormente. Los valores empleados en la modelación tuvieron componentes en dirección x, y y su media fue 1.7 en x, 1.7 en y.

6.1 Método de Penman Montheit FAO

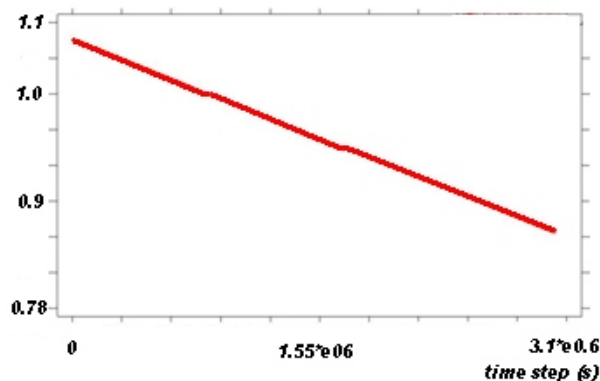
El efecto de viento provoca, debido a la dirección e intensidad de éste, un leve movimiento del cuerpo de agua en el mismo sentido, y evidentemente incide en la variación del calado al final del evento modelado. De igual manera, el error menor lo ha mostrado el método de Thornwaitte, seguido por Hargreaves, lo que demostraría que en esta zona de estudio dominarían los métodos con base energética o de temperatura, sobre los de base aerodinámica, lo que nos hace pensar que el efecto del viento en este caso no incide significativamente en el comportamiento hidrológico de la zona, esto, si el dato de referencia (dato arrojado por el sensor) se considera confiable.

TABLA 3.- Resumen general comparativo (con viento vs sin viento) de datos de ET obtenidos por los diferentes métodos tomando como punto de comparación el dato medido de calado en la estación Ánsares.

Método	Sobreestimación (cm)	Subestimación (cm)	Error ETP sin viento(%)	Error ETP con viento(%)
Thornwaitte	2.5	-	7.7	38.5
Hargreaves	-	5.5	100	84.6
Cristiansen	8.5	-	53.8	130.8
Penman Monteith FAO	15.5	-	146.2	238.5
Blaney Criddle	23.5	-	355.4	361.5
Balance de Energía	-	6.5	100	100.0
Jensen Haise	19.5	-	177	300.0

En la figura 3, podemos ver el efecto causado por el viento en la variación temporal del calado en un elemento x de la malla.

water elevation



water elevation

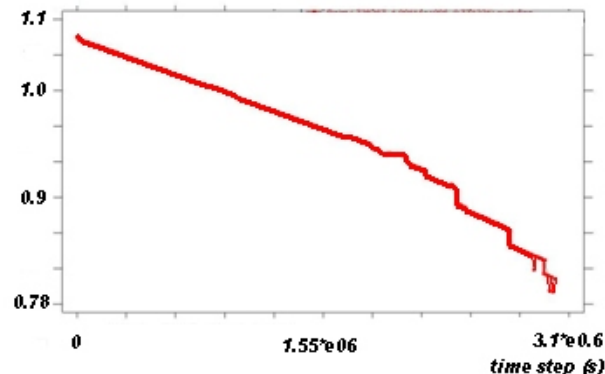


FIGURA 3.- Evolución temporal de la cota de agua en un elemento de malla. Caso sin viento(izquierda) y con viento(derecha).

Los resultados de este caso estudio, aportan conclusión específica local y no puede generalizar el comportamiento de un método o de los métodos expuestos de evapotranspiración potencial, de acuerdo a que conceptualmente cada uno de los métodos son calibrados y adaptados a condiciones locales, algunos tratan de involucrar más variables para ser un poco más generales, pero su calibración de igual manera ha sido de carácter local (M.I.Sánchez Toribio, Et al). A pesar que se

recomienda abiertamente el uso del método FAO Penman Monteith en general (Smith, et al., 1991), algunos métodos se adaptan mejor a algunas condiciones locales, como es el presente caso, donde los mejores resultados los arroja Thornwaitte, dejando claro que es la metodología que mejor se adapta a las condiciones que inducen a la evapotranspiración de la zona del lucio de los Ánsares, pero también enfatizando en que la falta de medidas reales en algunos parámetros del método de FAO Penman Monteith, pueden distorsionar significativamente su resultado.

VII. CONCLUSIONES

La adecuación del módulo hidrológico 2D de base en Volúmenes finitos, como modelo hidrológico permitió el uso de las ecuaciones completas de Sant Venant en eventos y condiciones específicas, en este caso el proceso de secado y mostró eficiencia en la representación hidrológica a escala de cuenca.

Todos los métodos de estimación de la evapotranspiración potencial tienen validez local, de acuerdo a las características de vegetación, disponibilidad de agua y condiciones ambientales de la zona, algunos de ellos se adaptan mejor o peor a ella. En condiciones generales, el método de ETP que tiene en cuenta, de mejor manera el proceso evaporativo de una región, describiendo el

actuar de la mayor cantidad de variables climatológicas y validado en la mayor cantidad de tipos de regiones en el mundo y por ende recomendado por la FAO es el de FAO-Penman-Monteith. Aunque el método que mejor se adaptó a la zona del Lucio de los Ánsares con errores de sólo el 7 y 38% de error fue en de Thornwaitte (teniendo como referencia la medición de calado por medio de sensor), método que ya había presentado resultados óptimos en distintos estudios realizados en el sur de España, es importante resaltar que el método de FAO Penman Monteith requiere precisión en la estimación de cada uno de los parámetros que lo componen, y la disponibilidad de esta información no siempre es sencilla.

Es posible que con información completa y más precisa, el método que mejor se adapte en esta zona de estudio, igualmente sea el propuesto por la FAO, incluso, en una comparación hecha con datos medidos de evaporación en tanque, justo éste es el método más cercano al igual que Christiansen, lo que abre por ahora una incógnita respecto a la precisión o error en el sensor y su influencia en el orden de magnitud de las variables en este estudio.

Se comprueba que el efecto de viento tangencial influye de manera directa en la variación del calado y ampliación de la mancha de agua.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Abbot, M B, Bathurst, J C, Cunge, J A, Connell, P E, Rasmussen, J, 1986, An introduction to the European Hydrological System "SHE" 1:History and philosophy of a physically based, distributed modeling system, *Journal of hydrology*, 87, 45-59.
- Allen, R, Pereira, L, Raes, D, Smith, M, 1996, *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*, FAO irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/2008.
- Allen, R, 1996, Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 97-106.
- Bandaragoda, C, Tarboton, D G, Woods, R, 2004, Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project, *Journal of Hydrology* 298, 178-201.
- Baxter, E, 2002, Vflo: A distributed model in a real time, Viewinc Corp.
- Beven, K J, 1996, A discussion of distributed hydrological modelling, *Distributed Hydrological Modelling*, 255-278.
- Beven, K J, 1979, A sensitivity analysis of Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates, *Journal of Hydrology* 44, 169-190.
- Bladé, E, 2005, Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales, *Análisis Integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones*. Tesis doctoral, Flumen, UPC.
- Bladé, E, Sánchez, M, Sánchez, H, Niñerola, D, Gómez, M, 2009, Modelación Numérica en Ríos en régimen permanente y variable, edicions UPC (ISBN:978-84-9880-389-1).
- Bladé, E, Corestein, G, Sánchez, M, Gómez, M, 2009, user's Manual of CARPA modelling system, version 4.0.1, Flumen, UPC.
- Bladé, E, Gómez, M, 2006, Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. *Análisis Integrado en una y dos dimensiones*. Monografía CIMNE-97.
- Cambronero, G, 2006, Estudio de la hidrodinámica de la marisma de Doñana, Dirección : José Dolz, Flumen, UPC.
- Campos, D F, 2008, Calibration of the rational method I eight rural watersheds under 1650Km² of the hydrological region No 10 (Sinaloa), México, *Agrociencia* 42, 615-627.
- Carvalho, L, Sánchez, M, 2006, Estimación de evapotranspiración Potencial, ETP, a partir de imágenes NOAA-AVHRR en la VI región del libertador general Bernardo O'Higgins, *Revista de Geografía, Norte Grande* (ISSN: 0379-8682) 36, 49-60.
- Cubells, R, 2004, Construcció d'un model hidrològic a partir de la resolució de les equacions completes de Saint Venant en dues dimensions, director: Gómez, M, Flumen, UPC.
- Dyras, I, Serafin, D, 2005, The Application of GIS technology for precipitation mapping, *meteorology appl* 12, 69-75.
- Feidas, H, Kontos, T, Saulakellis, N, Lagouvardos, K, A GIS tool for the evaluation of the precipitation forecasts of a numerical weather prediction model using satellite data, *Computers and Geosciences* 33, 989-1007.
- Galvino, J D, Moura, M S, Sousa, F A, Water balance model to predict climate change impacts in the watershed epitácio pessoa dam paraiba river-brazil, 13th World Water Congress, Montpellier, France.
- Goodrich, D C, Smith, R E, 1994, Comment on "Physically based hydrologic modeling, is the concept realistic? by Grayson", *Water Resources Research*, vol 30, 851-854.
- Gómez, M, Nania, L, 2006, Ingeniería Hidrológica, Grupo editorial Universitario, ISBN: 84-8491-636-7.
- Gómez, M, 2008, Curso de hidrología Urbana, ISBN: 978-84-612-1514-0. UPC.