

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



*Aplicación de técnicas de termografía para la evaluación  
de la uniformidad de riego en el jardín del Campus de  
Vera de la Universitat Politècnica de València.*

TRABAJO FIN DE GRADO

ALUMNO: César González Pavón

TUTOR: Juan Manzano Juárez

COTUTORA: M<sup>a</sup> Amparo Martínez Gimeno

*Curso Académico: 2014 - 2015*

**VALENCIA, 7 DE JULIO DE 2015**

**Título:** Aplicación de técnicas de termografía para la evaluación de la uniformidad de riego en el jardín del Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.

**Resumen:** El mantenimiento de la jardinería urbana supone importantes volúmenes de agua y su consumo eficiente debe ser fundamental. Para ahorrar recursos, tan importante es la aplicación adecuada de la cantidad de agua para satisfacer las necesidades del espacio verde, como que ésta se distribuya lo más uniformemente posible. Existen diversas maneras, y muy precisas, para estimar las necesidades; sin embargo no se presta demasiada atención a la determinación y ajuste de la uniformidad del riego. Actualmente, se pueden emplear diferentes indicadores, que requieren pruebas de campo y mediciones en la instalación y en la parcela regada que implican tiempo y ciertas imprecisiones en las determinaciones. Como alternativa a las pruebas clásicas, el presente trabajo presenta una novedosa metodología para análisis de la uniformidad mediante el uso de imágenes termográficas. Esta técnica tiene un alto potencial en la gestión práctica del riego en zonas verdes urbanas. Concretamente, se ha evaluado la uniformidad de distribución del sistema de riego por aspersión de ciertas parcelas del jardín del Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València (UPV). Adicionalmente se ha acotado la validez de esta técnica y sus particularidades para el caso de otros tipos de jardinería urbana. En el caso de estudio, el sistema de riego por aspersión emplea emisores de turbina emergentes. La red de distribución, que pertenece íntegramente a la UPV, se encuentra automatizada a nivel de subunidad. En las parcelas objeto de estudio las especies predominantes son las cespitosas, pudiendo encontrarse también árboles o arbustos diseminados. Se evaluaron diferentes parcelas, para lo cual, en cada caso se dispuso de una matriz pluviómetros donde se recogía el agua aplicada durante el transcurso de un riego ordinario. En paralelo se realizó toda una secuencia de fotografías térmicas a la superficie de la parcela evaluada. A partir del análisis geoestadístico de ambos métodos, se determinó la idoneidad de la técnica y si la aplicación del agua es correcta en las parcelas evaluadas, evidenciando los problemas principales asociados a la instalación de riego.

**Abstract:** Maintenance of urban gardens represents significant water consumptions. To save resources, is essential to apply the correct amount of water to satisfy plant water needs and distribute it evenly. Usually, irrigation needs are calculated properly, while the irrigation uniformity is less considered. Currently, for measuring irrigation uniformity, it is used several indicators that needs field tests and implies a lot of time in the pilot sites. In addition, it produces inaccuracies in the results. In this work is proposed a new methodology to analyze the irrigation uniformity using thermal images that could be an alternative to classical methods. This technique has a high potential in the management of urban gardens. In particular, distribution uniformity of the irrigation sprinkling system has been evaluated in some plots of Campus de Vera of the Universitat Politècnica de València (UPV). Further, the validity of this technique has been delimit and its uses in other types of urban gardening. In this case, the sprinkler system consist of emerging turbine emitters. The distribution network is operated as a subunit. In the garden, the grass is the predominant specie who is combined with trees and shrubs. In each plot studied, catch-cans have been placed to measure the water received during a typical irrigation event. Additionally, thermal images have been token in the same studied plots. It has been determinated the suitability of the technique and it has assessed if the water is applied correctly, using a geostatistical analysis of both methods. Results show the installation problems linked with the irrigation system.

**Palabras clave:** Riego, jardinería, uniformidad, termografía.

**Autor:** César González Pavón.

**Lugar y fecha:** Valencia, 7 de julio de 2015.

**Tutor:** Juan Manzano Juárez.

**Cotutora:** M<sup>a</sup> Amparo Martínez Gimeno.

## **Agradecimientos.**

La oportunidad de realizar este Trabajo Final de Grado vino a raíz de la concesión de una Beca de Colaboración en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Agroalimentaria. Durante los 3 meses que duró ésta me empezó a agrandar el tema y los resultados que se estaban obteniendo. Además, la acogida en este departamento fue desde el principio muy buena igualmente que la relación con todos sus componentes. Para mí fue bastante importante sentirme acogido en aquel inicio de curso de 2014.

En especial quiero agradecer este trabajo a mi cotutora y compañera de despacho Amparo Martínez, que me hizo un hueco en él desde el principio y siempre ha estado encima para todo lo que he necesitado. A mi tutor Juan Manzano por haberme dado la oportunidad de disfrutar de la beca de colaboración y su imprescindible dedicación en este trabajo final de grado. En general también agradecerle a todo el departamento su ayuda y apoyo durante estos meses.

Además, a mis compañeros y compañeras de clase, donde no es necesario dar nombres, cada uno de ellos sabe lo importante que ha sido para mí su compañía y apoyo durante este último año de carrera de donde además del título de llevo una gran familia. Gracias por todo.

## Índice de Contenidos.

1.	Introducción. ....	1
2.	Antecedentes.....	2
2.1.	Necesidades hídricas.....	2
2.2.	Dispositivos para el riego utilizados en jardinería.....	5
2.2.1.	Goteros.....	5
2.2.2.	Difusores.....	6
2.2.3.	Aspersores. ....	7
2.3.	Diseño de la instalación.....	8
2.4.	Termografía ..... 10	
3.	Objetivos.....	12
4.	Material y Métodos. ....	13
4.1.	Introducción. ....	13
4.2.	Jardín del Campus de Vera de la UPV. ....	13
4.3.	Parcelas del estudio. ....	14
4.3.1.	Parcela 1. Pradera Central.....	14
4.3.2.	Parcela 2. Rotonda. ....	14
4.3.3.	Parcela 3. Nexus. ....	15
4.3.4.	Especies predominantes. ....	15
4.4.	Evaluación de la uniformidad de riego.....	15
4.4.1.	Ensayo de pluviometría.....	15
4.4.2.	Procesado de datos obtenidos en la pluviometría.....	16
4.4.3.	Coordenadas de pluviómetros y aspersores. ....	16
4.4.4.	Interpolación de datos con ArcGis 10.1. ....	17
4.4.5.	Evaluación de la uniformidad del riego: coeficiente de uniformidad y uniformidad de distribución.....	17
4.5.	Toma de Termografías. ....	18
4.5.1.	Procesado de imágenes mediante ArgGis 10.1.....	18
4.5.2.	Propuesta de índices de uniformidad térmica. ....	20
4.5.3.	Datos de imágenes e interpolación.....	20
4.5.4.	Análisis estadístico. ....	20
4.6.	Identificación de fugas en riego localizado mediante termografía.....	22
5.	Resultados y discusión.....	23
5.1.	Ensayos de pluviometría. ....	23
5.1.1.	Parcela Nexus. ....	23
5.1.2.	Parcela Rotonda. ....	25
5.1.3.	Parcela Pradera Central.....	26
5.1.4.	Coeficientes de uniformidad y uniformidad de distribución. ....	28

5.2.	Termografía .....	29
5.2.1.	Parcela Nexus .....	29
5.2.2.	Parcela Rotonda .....	30
5.2.3.	Parcela Pradera Central.....	30
5.2.4.	Análisis estadísticos relación temperatura vs pluviometría.....	31
5.2.5.	Análisis de temperatura con pluviometría alta y pluviometría baja.....	33
5.2.6.	Resultados obtenidos de índices de uniformidad de temperaturas.....	33
5.3.	detección de fugas mediante el uso de termografía. ....	34
6.	CONCLUSIONES. ....	35
6.1	Propuestas de mejora. ....	36
7.	Bibliografía.....	37
8.	Anejos.....	41
8.1.	Anejo 1. Planos.....	41
8.2.	Anejo 2. Fotografías. ....	43

## Índice de Figuras.

Figura 1: Curva característica de un aspersor emergente. ....	5
Figura 2: Emisor de riego pinchado (izquierda) y emisor de riego integrado (derecha). ....	6
Figura 3: Difusor de riego. ....	6
Figura 4: Aspersor de turbina (izq.) y aspersor de impacto (drcha.).....	7
Figura 5: Pluviometría acumulada para dos difusores con un solape del 50%. ....	8
Figura 6: Localización y situación del Campus de Vera de la UPV. ....	13
Figura 7: Valores de referencia para los indicadores empleados en la evaluación. ....	18
Figura 8: Distribución de pluviómetros (azul) y aspersores (amarillo) en parcela Nexus.....	23
Figura 9: Interpolación de la pluviometría (mm/h) en parcela Nexus. ....	24
Figura 10: Encharcamiento producido por exceso de riego. Parcela Nexus.....	24
Figura 11: Zonas externas a la parcela con abundante agua. ....	24
Figura 12: Detalle del agua aportada fuera de la parcela por la incorrecta dotación del ángulo de giro del aspersor.....	25
Figura 13: Distribución de pluviómetros (azul) y aspersores (amarillo) en Parcela Rotonda. ....	25
Figura 14: Interpolación de la pluviometría (mm/h) en Parcela Rotonda. ....	26
Figura 15: Arbusto obstaculizando el riego en Parcela Rotonda. ....	26
Figura 16: Distribución de pluviómetros (azul) y aspersores (amarillo) en parcela Pradera Central. ....	26
Figura 17: Interpolación de la pluviometría (mm/h) en parcela Pradera Central.....	27
Figura 18: Detalle de la intercepción del chorro de agua con un árbol y una farola en parcela Pradera Central. ....	27
Figura 19: Detalle de la deriva producida y aspersor que no emerge correctamente. ....	28
Figura 20: Detalle de charco producido por el impacto del agua con un elemento del jardín... ..	28
Figura 21: Valores obtenidos de CU de los ensayos de pluviometría. ....	28
Figura 22: Evolución de la temperatura durante el riego. Parcela Nexus.....	29
Figura 23: Evolución de la temperatura durante el riego. Parcela Rotonda.....	30
Figura 24: Evolución de la temperatura durante el riego. Parcela Pradera Central. ....	31

Figura 25: Relación Temperatura - Pluviometría e $\Delta T$ – pluviometría en parcela Nexus al finalizar el riego.....	31
Figura 26: Relación Temperatura - Pluviometría e $\Delta T$ – pluviometría en parcela Rotonda al finalizar el riego.....	32
Figura 27: Relación Temperatura - Pluviometría e $\Delta T$ – pluviometría en parcela Pradera Central al finalizar el riego.....	32
Figura 28: Relación Temperatura tiempo en zona de baja pluviometría (rojo) y alta pluviometría (azul).....	33
Figura 29: Valores obtenidos de coeficiente de uniformidad de temperaturas.....	33
Figura 30: Momentos pre (izquierda) y post (derecha) fuga en parcela con baja densidad de vegetación.....	34
Figura 31: Momentos pre (izquierda) y post (derecha) fuga en parcela con alta densidad de vegetación.....	34
Figura 32: Plano situación Campus de Vera. UPV.....	41
Figura 33: Plano situación Parcela Nexus.....	41
Figura 34: Plano situación parcela Pradera Central.....	42
Figura 35: Plano situación parcela Rotonda.....	42
Figura 36: <i>Penisetum clandestinum</i> .....	43
Figura 37: <i>Cynodon dactylon</i> .....	43
Figura 38: <i>Festuca arundinacea</i> .....	44
Figura 39: Ensayo de pluviometría en parcela Nexus.....	44
Figura 40: Ensayo de pluviometría en parcela Rotonda.....	45
Figura 41: Ensayo de pluviometría en parcela Rotonda.....	45
Figura 42: Ensayo de pluviometría en parcela Pradera Central.....	46
Figura 43: Recuento de aspersores en ensayo de pluviometría.....	46
Figura 44: Báscula utilizada para el pesaje de los pluviómetros.....	47
Figura 45: Aspersor de turbina durante el riego.....	47
Figura 46: Zonas seleccionadas para alta y baja pluviometría.....	48
Figura 47: Detalle de las tres parcelas del estudio.....	48
Figura 48: Aspersor que no emerge totalmente.....	49

Figura 49: Aspersor que no emite bien el riego provocando encharcamientos. ....	49
Figura 50: Encharcamiento provocado por la mala selección del ángulo de giro. ....	50
Figura 51: Secuencia de imágenes térmicas durante el riego en parcela Nexus. ....	51
Figura 52: Visual Nexus. ....	51
Figura 53: Secuencia de imágenes térmicas durante el riego en parcela Pradera Central. ....	52
Figura 54: Visual Pradera Central. ....	52
Figura 55: Secuencia de imágenes térmicas durante el riego en parcela Rotonda. ....	53
Figura 56: Visual del ensayo de termografía en parcela Rotonda. ....	53
Figura 57: Parcela de simulación de detección de fugas con termografía. ....	54
Figura 58: Toma de imágenes térmicas en la detección de fugas. ....	54



## Índice de símbolos

$C_d$ : Coeficiente de descarga de la tobera de un aspersor.

$CM_{\text{efecto}}$ : Cuadrado medio efecto.

$CM_{\text{residual}}$ : Cuadrado medio residual.

$CM_{\text{total}}$ : Cuadrado medio total.

CU: Coeficiente de uniformidad (%).

CUT: Coeficiente de uniformidad de temperaturas (%).

DU: Uniformidad de distribución (%).

DUT: Uniformidad de distribución de temperaturas (%).

$E_a$ : Eficiencia de aplicación. (%)

$EF_r$ : Eficiencia de riego. (%)

ET: Evapotranspiración (mm/día).

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia (mm/día).

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

H: Presión de trabajo (kPa).

K: coeficiente característico de un emisor.

$K_c$ : Coeficiente de cultivo.

$K_d$ : Coeficiente de densidad.

$K_e$ : Coeficiente de especie.

$K_j$ : Coeficiente de jardín.

$K_{mc}$ : Coeficiente de microclima.

$NH_n$ : Necesidades hídricas netas (mm/día).

$NH_t$ : Necesidades hídricas totales (mm/día).

$NR'$ : Cantidad de agua aportada (mm/día).

$P_a$ : Pluviometría de un aspersor (mm/h).

$P_e$ : precipitación efectiva (mm/día).

$Q_d$ : Caudal disponible (L/h).

$Q_u$ : Caudal unitario (L/h).

R: Radio de alcance de un aspersor (m).

$R^2$ : Coeficiente de determinación.

$S_a$ : Superficie mojada ( $m^2$ ).

$S_o$ : Sección del orificio de salida de un aspersor ( $m^2$ ).

SC: Suma de cuadrados.

$SC_{\text{residual}}$ : Suma de cuadrados residual.

T: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_{1q}$ : Temperatura media del primer cuartil ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_i$ : Temperatura de cada pixel ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_m$ : Temperatura media de todos los píxeles ( $^{\circ}\text{C}$ ).

X: Exponente característico del emisor.

$X_{1q}$ : Altura de agua medida en el cuartil inferior (mm).

$X_i$ : Altura de agua medida en cada uno de los pluviómetros (mm).

$X_m$ : Media de la altura de agua de todos los pluviómetros (mm).

$\alpha$ : Exponente característico de un aspersor o difusor.

$\beta$ : Coeficiente característico de un aspersor o difusor.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En la Tierra existen infinidad de recursos naturales, uno de ellos y el más importante para que exista vida en el planeta, es el agua. Ésta se mueve y cambia de estado constantemente lo cual da lugar al concepto de “ciclo del agua”. Se mueve por acción de la lluvia, la escorrentía, la infiltración, evaporación, etc. Dado que el agua simplemente se desplaza de un lugar a otro por lo fenómenos anteriormente mencionados y cambia de estado, es considerada como un recurso renovable.

De cara a las necesidades del ser humano en los distintos sectores donde se utiliza agua es importante hacer un uso responsable de ésta. En la actualidad, en el mundo se requieren anualmente unos 4600 km<sup>3</sup>, y las previsiones hablan de que en el año 2025 los requerimientos se incrementaran hasta rondar cifras como los 5100 km<sup>3</sup> anuales. Uno de los campos donde más se requiere es en el agronómico, al cual se destina un 70 % del total de agua consumida en el mundo. (AGÈNCIA CATALANA DE L’AIGUA, 2015). En las condiciones climáticas mediterráneas el riego es imprescindible para el desarrollo de la agricultura y la jardinería. La jardinería urbana representa un 1,5% del agua total consumida en España. No es una cifra alta si se compara con otros usos pero aun así es de vital importancia el ahorro en este sector (Pintado, 2001).

En España, en la zona Este de la de península, el agua se ha convertido en un recurso muy escaso y a la vez difícil de conseguir en numerosas ocasiones. La Asociación Española de Parques y Jardines, cuantificando el uso de agua en jardinería constató consumos muy dispares, desde 2 hasta 17 l/m<sup>2</sup> /día en la época de máximas necesidades. Estos datos de partida asociados a la gestión de jardines, sirven para señalar la importancia de ajustar al máximo la cantidad de agua y la energía asociada requeridas. (Martínez Gimeno, et al, 2013).

Para el buen uso del agua en este sector, el personal dedicado a la gestión de los jardines tiene la obligación de aprovechar el agua al máximo y conseguir buenas eficiencias de riego. Para conseguirlo, existen ciertas técnicas de estudio de eficiencias de riego que, de aplicarse de forma correcta, pueden dar buenos resultados, lo que conllevaría disminuir costes y ahorrar agua de forma significativa.

Al margen de que el consumo hídrico en jardinería sea de gran importancia, también se puede considerar como un tema moral, es decir, se debe aprovechar este recurso al máximo sabiendo que hay zonas del planeta donde es muy escasa o incluso inexistente.

En ocasiones, en jardinería pueden darse consumos más altos por unidad de superficie que en agricultura. Esto puede ser debido a que en este sector, al hacer uso de especies ornamentales, de las cuales no se va a obtener ningún beneficio económico, simplemente se busca un beneficio visual, no se es consciente en numerosas ocasiones de los recursos que se usan para llegar a ese punto. Además, que en cualquier plantación ya sea ornamental o agrícola, el beneficio que se obtiene de él al aplicar más agua o menos no es exponencial.

En numerosas ocasiones los excesos de consumo de agua en jardinería se producen por una mala planificación de los riego o incluso por el desconocimiento de las necesidades hídricas de las especies a las que está destinado el riego.

En el presente Trabajo Fin de Grado de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural se ha realizado una evaluación del riego en distintas parcelas de los jardines del Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València (UPV), donde se tomaron datos de campo que posteriormente mediante aplicaciones informáticas que han permitido calcular las uniformidades de riego de cada una de las parcelas.

## 2. ANTECEDENTES.

La gestión de los espacios verdes es indispensable para conseguir ciudades más sostenibles. Con el fin de tener parques urbanos sostenibles es necesario aplicar los principios del desarrollo sostenible en todos los ámbitos: el diseño, la ejecución, el mantenimiento y la gestión de la zona verde. La gestión ha de apoyarse en tres aspectos (CONSEJERIA DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO RURAL. 2015):

- Una gestión sostenible y un uso eficiente de los recursos naturales.
- Potencialización del uso público del espacio y la participación ciudadana, considerando los parques y jardines lugares de ocio, encuentro...
- Espacio para la divulgación y educación ambiental.

En jardinería es muy común la combinación de gran cantidad de especies vegetales con el fin de crear un ambiente distinto dentro de las poblaciones. Se suelen mezclar gran variedad de cespitosas que cubren la mayor parte de la superficie del suelo con plantas y arbustos de pequeño tamaño y grandes árboles. La mayoría de las especies vegetales usadas en este ámbito tienen necesidades climáticas, hídricas y de fertilización muy distintas. Esto, de cara a la gestión de un jardín es un problema ya que no se deben uniformizar todos estos factores, es decir, no se deben aportar las mismas cantidades de agua, y menos aún las mismas dosis de fertilización. Es por ello que una gestión sostenible contempla todo el ciclo de uso de los jardines, gestión de recursos hídricos, reciclaje de residuos, mantenimiento, gestión energética, etc.

La gestión hídrica es uno de los objetivos prioritarios en el diseño de un jardín sostenible. La selección de especies vegetales, ya sean autóctonas o alóctonas, que han de estar adaptadas al entorno y el empleo de sistemas de riego eficientes teniendo en cuenta el uso de aguas recicladas, son los aspectos más a tener en cuenta.

### 2.1. NECESIDADES HÍDRICAS.

Como se menciona anteriormente, cada especie vegetal que compone el jardín tiene unas necesidades hídricas distintas. Para una correcta gestión del jardín, se deben conocer los requerimientos hídricos de cada una de ellas, con el fin de distribuirlas en el espacio según este criterio y conseguir así unos consumos hídricos coherentes.

Para la cuantificación de las necesidades hídricas de las especies vegetales se parte de la evapotranspiración ( $ET_c$ ), que se define como la suma de la evaporación directa desde la superficie del suelo, la transpiración y la evaporación desde la superficie de las plantas (Jensen, 1990).

El cálculo de la  $ET_c$  se realiza mediante la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Para el cálculo de la  $ET_0$  se toma como referencia de cultivo las gramíneas, por ello la definición de  $ET_0$  es la velocidad de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura uniforme, en crecimiento activo, sombreando completamente el suelo y a las que no les falta agua (Doorenbos y Pruitt, 1975).

Para el cálculo de la  $ET_0$  (mm/día), existen distintos modelos agroclimáticos. En la actualidad, de los modelos existentes, el que goza de mayor aceptación es el Penman – Monteith.

Además, se debe conocer el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para poder calcular la  $ET_c$  (mm/día). Éste se define como factor que incluye los efectos propios del cultivo sobre la  $ET$ ,

como puede ser el área foliar, la altura, el porcentaje de suelo cubierto, etc. (Doorenbos y Pruitt, 1975).

El  $K_c$  está asociado al ámbito de la agricultura, en jardinería puede ser sustituido por el coeficiente de jardín conocido como  $K_j$ , en el cual influyen distintos parámetros que se explican a continuación. (Costello, y Jones, 2000).

$$ET_c = K_j \cdot ET_0$$

El  $K_j$  tiene tres factores intrínsecos que son los que finalmente ajustarán el valor de  $ET_c$  (mm/día) para dar las necesidades de riego netas de la parcela.

El primero de ellos es el coeficiente de especie ( $K_e$ ) que tal y como su nombre indica, es el que hace variar las necesidades hídricas en función de la especie del jardín. En el caso probable de tener más de una especie, se elegirá el  $K_e$  medio de todas las especies existentes en el jardín.

En segundo lugar se trata del coeficiente de densidad ( $K_d$ ) en el cual se tienen en cuenta las distintas densidades de vegetación existentes en el jardín. El rango de valores en el que oscila dicho coeficiente es de 0.5 a 1.3 siendo el valor más bajo para jardines con poca densidad de plantación y el valor más alto para jardines con alta densidad de árboles y cespitosas.

El último factor que modifica el  $K_j$  es el coeficiente de microclima ( $K_{mc}$ ). Este factor determina la importancia de los elementos propios del paisaje como edificios, zonas pavimentadas... que puedan influir en factores como la temperatura, velocidad del viento, humedad relativa o la intensidad luminosa que desencadenan en una variación de la tasa de evapotranspiración. Este factor de corrección se mueve entre valores de 0.5 a 1.4 donde el valor más bajo sería para zonas muy sombreadas por los elementos anexos y el valor más alto sería para jardines muy soleados donde no interfieren los elementos anexos. (Valín. M.I. et al. 2011).

Por tanto, el  $K_j$  (Costello y Jones, 2000) quedaría definido de la siguiente forma:

$$K_j = K_e \cdot K_d \cdot K_{mc}$$

Respecto a la expresión de cálculo de la  $ET_c$ , se debe tener en cuenta los posibles eventos de lluvia. Este parámetro a considerar se denomina precipitación efectiva ( $P_e$ ) y se define como la precipitación no perdida por escorrentía o percolación (Dastane, 1974). Este parámetro puede ser calculado por el método FAO (Doorenbos y Pruitt, 1986.).

Una vez conocida la  $P_e$  se procede al cálculo de las necesidades hídricas netas ( $NH_n$ ) en mm/día siguiendo la siguiente ecuación (Montalvo, 2007).

$$NH_n = ET_c - P_e$$

Conocidas las  $NH_n$ , se calculan las necesidades hídricas totales o brutas ( $NH_t$ ) en mm/día, las cuales son función de la eficiencia de riego ( $Ef_r$ ) y del coeficiente de uniformidad ( $CU$ ). El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación (Pascual España, 2008).

$$NH_t = \frac{NH_n}{Ef_r \cdot CU}$$

El concepto de  $Ef_r$  se define como la relación del volumen de agua de riego transpirada por las plantas, más la evaporada por el suelo, más la necesaria para regular la concentración salina de la solución del suelo y la utilizada para la formación de los tejidos de la planta, con

respecto al volumen total de agua derivada, almacenada o bombeada para riego (Jensen et al., 1967).

Aunque en este caso, dada la temática del trabajo, tiene más sentido hablar de eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) pudiéndose sustituir este parámetro directamente por la  $E_f$ . El concepto de eficiencia de aplicación según Montalvo, (2007) se define como la relación que existe entre el agua consumida por el cultivo ( $NH_n$ ) y la cantidad total entregada ( $NR'$ ) en mm/día. Por tanto:

$$E_a = \frac{NH_n}{NR'}$$

Por tanto, se debe aplicar la lámina de agua necesaria en cada caso pero de manera que sea lo más uniforme posible la distribución de ésta. Para el cálculo se aplica la siguiente ecuación:

$$NH_t = \frac{NH_n}{E_a \cdot CU}$$

Por su parte, el CU se define para evaluar el grado de uniformidad en el riego por aspersión (Christiansen, 1942). Los sistemas de riego por aspersión requieren un valor mínimo de uniformidad para ser considerados aceptables. Keller y Bliesner (1990) consideran, en uno de sus estudios, la uniformidad de riego baja cuando es inferior al 84 %.

Sobre la uniformidad de riego pueden influir factores naturales como la velocidad del viento. El efecto del éste sobre la uniformidad en los sistemas de riego por aspersión ha sido objeto de estudio por distintos autores (Seginer et al., 1991; Faci y Bercero, 1991; Tarjuelo et al., 1994; Kincaid et al, 1996; Martínez – Cob, A. et al, 2010). En un estudio aplicado al maíz (*Zea mays*) se determinó que según aumentaba la velocidad del viento disminuía la uniformidad de riego. Los valores del estudio consideraban, un intervalo de 0,5 – 6,7 m/s de velocidad del viento con unos coeficientes de uniformidad que oscilaban entre 90% - 65%. Esta variación repercutió en el rendimiento en parcela, con valores que oscilaban entre 3768 – 10102 kg/ha (Dechmi, et al, 2001). Los resultados del estudio anterior se pueden extrapolar al mundo de la jardinería, es decir, la gran variabilidad que se produce en la producción acusada a la deficiencia de uniformidad de riego se puede traducir en jardinería como zonas del jardín que van a estar menos pobladas, con menos densidad de la especie concreta que se utilice. Por ejemplo, en el caso de hablar de cespitosas se verían zonas con una densidad muy buena y zonas totalmente opuestas, sin apenas densidad.

Por ello, además de aprovechar al máximo los recursos, el tener una uniformidad en la calidad de las especies allí expuestas, es decir, reducir la variabilidad de la calidad de las especies que componen el jardín (Dukes et al, 2006). Se calcula como uno menos la diferencia en valor absoluto entre la medida de cada pluviómetro ( $X_i$ ) y la media de todos ellos ( $X_m$ ) dividido por el sumatorio de todos (n) los pluviómetros:

$$CU (\%) = 100 \left( 1 - \frac{\sum_1^n |X_i - X_m|}{\sum_1^n X_i} \right)$$

Otra medida con la que evaluar la uniformidad de distribución del agua en parcela es la uniformidad de distribución (DU) definida por Merriam y Keller (1978) como la media de altura de agua del cuartil inferior, es decir, la altura de agua del 25% de los recipientes que menos agua han recibido ( $X_{1q}$ ) dividida por la media de altura de agua de la parcela ( $X_m$ ). Su cálculo es:

$$DU (\%) = 100 \left( \frac{X_{1q}}{X_m} \right)$$

## 2.2. DISPOSITIVOS PARA EL RIEGO UTILIZADOS EN JARDÍNERIA.

En el momento de adquirir material de riego para las instalaciones en jardines, el técnico debe considerar distintos aspectos de cara a optimizar la instalación, es decir, tendrá que valorar qué tipo de material es necesario para cubrir las necesidades hídricas en la parcela teniendo en cuenta los consumos energéticos que se producirán y el coste fijo propio de la instalación. En este sentido, son los emisores (dispositivos encargados de distribuir el agua en el suelo desde las conducciones a presión) los elementos fundamentales. Estos dispositivos de emisión de agua se dividen en dos grandes grupos: emisores de riego localizados y aspersores o difusores.

Según el tipo de especie vegetal a la que se pretende aplicar agua, se pueden usar distintos emisores. Normalmente para pequeños arbustos plantados en filas se utiliza riego localizado donde la aplicación de agua se hace justamente donde se encuentra la planta. En el caso de superficies extensas de cespitosas o combinaciones de éstas con grandes árboles, se recurre al riego por aspersión.

A la hora de la elección de un emisor de riego localizado se deben tener en cuenta como criterios más relevantes, la presión de trabajo ( $h$ ) y el caudal emitido ( $Q_u$ ). Estos factores determinan la uniformidad de riego y los consumos tanto hídricos como energéticos necesarios para abastecer la parcela de sus necesidades. Para una correcta elección del tipo de emisor se debe conocer la relación entre  $h$  en kPa y  $Q_u$  en L/h además de su exponente  $x$  y su coeficiente característico  $K$ . Esta relación es también conocida como curva característica del emisor la cual se define con la siguiente expresión (Documentación asignatura Ingeniería del Riego, 2014):

$$Q_u = K \cdot h^x$$

Con la curva característica del emisor se puede precisar qué caudal es aportado según la presión de trabajo. Se adjunta un ejemplo de curva característica de un emisor realizado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria (DIRA).

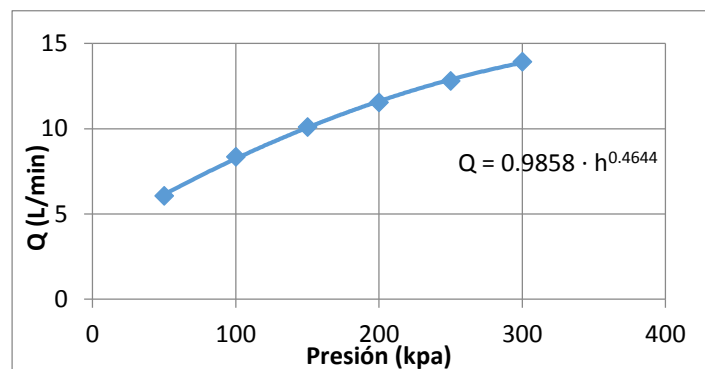


Figura 1: Curva característica de un aspersor emergente.

La ecuación que describe esta curva es válida tanto para emisores de riego por goteo como para aspersores o difusores.

### 2.2.1. Goteros.

Existen en el mercado distintos tipos de emisores de riego localizado, identificados también como "goteros". Normalmente se clasifican en dos grandes grupos: No compensantes y auto-compensantes. La diferencia principal entre estos dos grupos radica en el coeficiente de descarga " $x$ ". En emisores no compensantes, el coeficiente de descarga ronda valores de 0.5 mientras que los auto-compensantes tienen valores inferiores a 0.2. Esto lo que implica es que

en los no compensantes haya grandes fluctuaciones en el caudal emitido en función de la presión de trabajo, mientras que en los auto-compensantes, el emisor en un rango de presiones definido por el fabricante, no tiene variaciones en el caudal emitido.

Además, los emisores también se pueden clasificar por estar integrados en el lateral o por tener que ser pinchados sobre éste (goteros en derivación).



Figura 2: Emisor de riego pinchado (izquierda) y emisor de riego integrado (derecha).

### 2.2.2. Difusores.

Los difusores son dispositivos de riego que disponen de una tobera o boquilla, normalmente vertical, y un dispositivo fijo para la difusión del chorro de agua. Se caracterizan por requerir caudales bajos o medios y presiones bajas o medias, lo cual dará un alcance corto. La aplicación de éstos en jardinería se limita a zonas verdes de dimensiones escuetas.

Respecto a su mecanismo, estos dispositivos pueden ser de eje fijo o auto emergentes. Éstos últimos, habituales en jardinería, disponen de un mecanismo que eleva verticalmente el vástago con el difusor mientras que en su conexión a la red exista una presión mínima, que dependerá del tipo de difusor. Cuando se produce el paro del riego, la presión sufre un descenso bastante acentuado, el vástago que incorpora el difusor baja introduciéndose en el cuerpo principal. Para no obstaculizar el paso de la maquinaria de jardinería, éstos se disponen a ras de suelo cuando no están en funcionamiento.



Figura 3: Difusor de riego.

En estos dispositivos el caudal arrojado se puede obtener a partir de su curva característica. Se puede obtener tal y como se indica en la ecuación, conociendo coeficiente de descarga de la tobera ( $C_d$ ) que depende de su geometría, Sección del orificio de salida ( $S_o$ ) en  $m^2$ , aceleración de la gravedad. ( $g$ ) tomando un valor de  $9,81 m \cdot s^{-1}$  y la presión relativa en la tubería en la que se conecta el difusor ( $h$ ) en m.c.a. (Documentación asignatura Ingeniería Del Riego, 2014).



$$Q_u = C_d \cdot S_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

A diferencia de los emisores de riego localizado o goteros, en estos dispositivos el agua sale al exterior con cierta energía cinética. Disponen de un deflector fijo o móvil que rompe el chorro de agua y expande las gotas mojando una superficie circular. Respecto a la ubicación de estos en parcela, para asegurar una correcta distribución éstos se aconseja que sean colocados en cuadrado con una distancia igual a su radio máximo de alcance consiguiendo así un solape del 100%.

### 2.2.3. Aspersores.

Los aspersores también se encuentran dentro del grupo de dispositivos de riego en los que el agua sale al exterior con cierta energía cinética. En el caso de los aspersores, el dispositivo que produce la rotura del caño y la expansión es móvil. El orificio de la tobera tiene normalmente un eje horizontal o con cierto grado de inclinación. Dependiendo del mecanismo de giro y expansión de la gota, los aspersores pueden ser de turbina o de impacto. En el caso de su utilización en jardinería y paisajismo, ambos tipos son auto emergentes, para no crear impedimentos en las zonas de instalación.

Respecto a los de **turbina**, al tener complejos mecanismos para garantizar su correcto funcionamiento, deben ser sometidos a mantenimientos periódicos. Los principales problemas que se detecta está asociados a la falta de mantenimiento: pérdidas de agua por juntas, bloqueo de mecanismo de auto emergencia, etc. Los aspersores de turbina suelen tener un alcance medio, por lo que son adecuados cuando la superficie a regar no es de grandes dimensiones, o cuando la red se traza en varias filas de conducciones. La relación entre el caudal y la presión, al igual que en los casos anteriores, viene descrita por la curva característica, que puede tener una expresión similar a la de los difusores. Como mejora de los dispositivos, pueden llevar incorporado reguladores de presión que pueden ser tarados a presiones prefijadas para garantizar una mejor uniformidad de riego.



Figura 4: Aspersor de turbina (izq.) y aspersor de impacto (drcha.)

El otro tipo de aspersores existente en el mercado es el de **impacto**. En este tipo de dispositivos, tanto el mecanismo de giro como la posición de las toberas son similares. En instalaciones deportivas y parques presentan la particularidad de ser auto-emergentes. Por el mecanismo de giro, estos son más voluminosos, y con una tapa cenital más ancha que los aspersores de turbina.

Estos aspersores se emplean para regar grandes superficies como campos deportivos. Tienen un radio de giro ajustable normalmente con dos opciones de giro, de círculo completo o parcial. Normalmente constan de dos boquillas para mejorar la uniformidad de riego. Las presiones requeridas son altas al igual que los caudales. Los radios de alcance pueden llegar a 50 m aplicando unas presiones próximas a los 785 kPa en el caso más extremo que es el de los cañones de riego.

El radio mojado o alcance (R) en m, tanto para difusores como aspersores, puede ser calculado de la siguiente forma, teniendo que aportar el fabricante ciertos parámetros como son el coeficiente característico del aspersor o difusor ( $\beta$ ), la presión de trabajo (h) en kPa y el exponente para el alcance del aspersor o difusor ( $\alpha$ ). (Documentación asignatura Ingeniería Del Riego, 2014).

$$R = \beta \cdot h^\alpha$$

### 2.3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.

En las fases de diseño, y como paso previo a un buen diseño hidráulico se debe partir del cálculo de las necesidades hídricas totales que requiere el cultivo (apartado “Necesidades Hídricas”) donde se tendrá en cuenta el tipo de suelo, el cultivo concreto, el clima, etc. Estableciéndose así los volúmenes de agua a aportar. El siguiente paso es seleccionar el tipo de emisor que mejor se adapte a las necesidades del jardín. Conocido esto, en el caso de que el caudal requerido ( $Q_r$ ) por la parcela sea mayor al caudal disponible ( $Q_d$ ), se deberá sectorizar la parcela para poder abastecer las necesidades de todas las especies vegetales presentes en el jardín. Otros criterios para la sectorización de un jardín son la existencia de diferentes hidrozonas o tipos de emisores.

Otro punto importante una vez creados los sectores es la toma de decisiones en cuanto a la frecuencia de riegos y tiempo que durará cada uno de ellos. En este punto se debe tener en cuenta el tipo de especies que conviven en cada parcela y sus necesidades, además del tipo de suelo para evitar encharcamientos y percolación profunda que pueden perjudicar al correcto desarrollo de la especie vegetal.

Para generar la lluvia artificial, en jardinería se utilizan los descritos aspersores. Para elegir cuál es el adecuado para las necesidades de cada jardín se tienen en cuenta distintos criterios técnicos:

- Presión nominal
- Angulo de emisión
- Curva característica del emisor
- Radio de alcance

Una vez seleccionado el tipo de emisor a utilizar, es el momento de distribuirlos en parcela con el fin de lograr una correcta uniformidad de riego. Entre el radio de alcance de cada uno de los emisores debe existir cierto solape para mantener todas las zonas lo más igualmente regadas como indica la siguiente imagen, donde se representa un ejemplo de dos aspersores con igual alcance solapándose un 50%. (Documentación asignatura Ingeniería Del Riego, 2014).

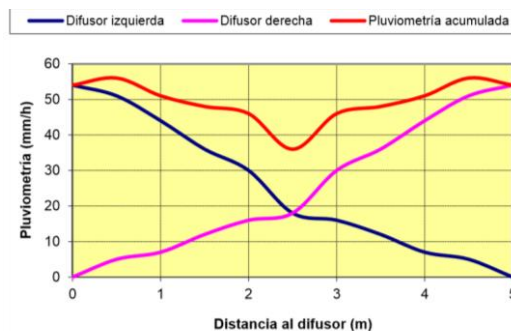


Figura 5: Pluviosidad acumulada para dos difusores con un solape del 50%.

En definitiva, conocido el caudal que aportará cada aspersor ( $Q_u$ ) en L/h y su radio de acción ( $R$ ) en m, se puede conocer la superficie mojada ( $S_a$ ) en  $m^2$ . Con esto, se calcula la pluviometría del aspersor ( $P_a$ ) en mm/h, aspecto de máximo interés en el caso de conocer la uniformidad de riego. Así,  $P_a$  se calcula de la siguiente manera para marcos cuadrados conociendo el  $R$ .

$$P_a = \frac{Q_u}{S_a} = \frac{Q_u}{R \cdot R}$$

Los sistemas de riego utilizados hoy día en jardinería son, mayoritariamente, sistemas a presión. El control de la presión en los sistemas en este caso es un parámetro fundamental, pues variando la presión se pueden conseguir diferentes combinaciones de caudales aplicados y pluviometrías.

Otro aspecto fundamental de cara a conseguir una buena uniformidad de riego es el diseño del sistema hidráulico de la subunidad correspondiente a la parcela. Se trata de dar dimensiones a todos los componentes necesarios para llevar a cabo el riego, principalmente tuberías y en menor medida, válvulas. Desde el punto de vista ingenieril, consiste en realizarlo de la forma más económica posible consiguiendo satisfacer las necesidades hídricas del jardín. Una vez ubicados los emisores en parcela y conociendo el punto de toma de agua del hidrante, se lleva a cabo un diseño de tuberías que optimice la longitud de las mismas para así reducir las pérdidas de energía por rozamiento y localizadas en la subunidad, lo que desencadenará en un ahorro posterior de energía. Respecto a los diámetros de las tuberías, por lo general se tenderá a usar diámetros algo más grandes de los requeridos para reducir así las pérdidas de carga.

Para lograr un diseño hidráulico correcto en la subunidad, se deberá tener una uniformidad en los caudales aplicados por los distintos emisores. Lo que provoca la variación de caudales en la subunidad es la variación de presiones que se produce en la red aguas arriba. Esta variación de caudales nunca debe ser superior al 10% (Montalvo, 2007). La máxima variación de caudales en la subunidad se define de la siguiente forma, tomando la ecuación característica de un emisor y aplicando logaritmos:

$$\frac{dQ_u}{Q_u} = x \frac{dh}{h}$$

Como  $dQ_u/Q_u < 0.1$ , la máxima variación absoluta de presiones es:

$$\Delta h = \frac{0.1}{x} h$$

Tomando esta referencia en el diseño hidráulico se consigue ajustar al mínimo posible los diámetros de las conducciones y por tanto un menor coste de instalación en subunidad.

Queda justificado que el control de la presión en los sistemas de riego a presión actuales es un parámetro fundamental, pues variándolo se pueden conseguir diferentes combinaciones de caudales aplicados y pluviometrías. Además, respecto a la uniformidad de riego, observando la ecuación que define el radio de alcance de un emisor, se observa como la única variable es la presión ( $h$ ), por tanto, consiguiendo la uniformidad de presiones arriba expuesta, ésta también tendrá repercusión finalmente en la aplicación del agua dando así un riego más uniforme.

Existen otros aspectos que pueden desencadenar en una deficiente uniformidad de riego en parcela pueden ser de distinta naturaleza: errores de cálculo en el diseño previo como altura del aspersor, presión de trabajo y un marco de riego incorrecto; factores de deterioro como obturación o rotura de alguno de los emisores; y factores naturales como una excesiva velocidad del viento durante el riego que puede desencadenar en una importante deriva. (Montero, 2000).

Al margen del diseño ingenieril que se le dé al sistema de riego planteado en el proyecto, existen ciertos factores que no se pueden controlar a la hora del diseño, pero sí se puede actuar de cierto modo sobre ellos una vez instalado el sistema, por ejemplo modificando el marco de aspersor. El más importante de ellos es el viento (Mateos, L. 1998), el cual puede ocasionar cierta deriva de la lluvia artificial y modificar así la uniformidad de riego.

No obstante, cualquier proyecto que se realiza y queda aprobado pudiendo cumplir todas las exigencias de diseño, pero el tiempo, el uso que se le da a las instalaciones, que muchas veces no es el adecuado; el deterioro de los materiales utilizados como aspersores, válvulas, tuberías... hacen que la uniformidad de riego se vaya aminorando con el paso del tiempo por lo que es necesario evaluarla periódicamente.

## **2.4. TERMOGRAFÍA.**

En agricultura, actualmente, se están comenzando a usar nuevas técnicas para el control de distintos factores que puedan afectar a los cultivos. El fin de estas técnicas es, por un lado facilitar el conocimiento sobre las condiciones de uso de los sistemas de riego y por otro, mejorar así las aplicaciones hídricas en las parcelas. (García-Tejero et al, 2014)

Hasta la fecha, en el sector de la agricultura, se está haciendo uso de la termografía con distintos fines. En diversos artículos de investigación se habla del uso de la termografía para el control del cierre de los estomas (Jones, et al, 2002). Se utilizan también combinaciones de imágenes térmicas y visibles para la medida del estrés de la planta (Leinonen, y Jones, 2004). En un estudio realizado con algodón (*Gossypium hirsutum*) se utilizó como herramienta potencial para la programación del riego (Cohen, et al. 2005). Por lo general, se utilizan las imágenes térmicas para medir ciertos factores que muestran el estrés hídrico de la vegetación. Puesto que el objetivo es medir el grado de estrés del cultivo, se debe hacer la toma de imágenes en el momento más desfavorable del día, es decir, al mediodía, donde más evapotranspiración se produce en la especie vegetal. (Moller, et al, 2006). Incluso, en estudios más antiguos se utilizó esta técnica en la detección de mutantes del genero *Arabidopsis* (Merlot, et al. 2002).

Otro estudio donde se empleó esta técnica fue en un campo de cítricos donde mediante fotografía térmica aérea se evaluaban las temperaturas de las copas de los árboles. Con ello, se pretendía detectar obturaciones en el riego localizado de la parcela, lo cual afectaría al estrés hídrico de la planta y por tanto a la temperatura de sus hojas. Este estudio concluye que la fotografía térmica sirve como herramienta para evaluar el rendimiento de la subunidad basándose en la temperatura de la copa de la especie vegetal, y así detectar fallos en las conducciones o dotación de goteros de la subunidad de manera mucho más rápida (Jiménez-Bello. et al. 2013).

En resumen, la mayoría de estudios que se han realizado en este ámbito se basan en un procedimiento similar: la toma de imágenes térmicas aéreas de la parte más alta del cultivo en distintos días. En general, en este tipo de estudios en el entorno de la hortofruticultura el objetivo es comparar el flujo de savia y la temperatura foliar de la especie vegetal para conocer el grado de estrés del cultivo (Ballester, et al, 2013). Las imágenes pueden ser tomadas por distintas vías: satélites, vuelos, vuelos no tripulados, drones o directamente a nivel del terreno.

En el caso concreto de este Trabajo Final de Grado, el uso que se le da a la termografía tiene un fin bien distinto a los anteriormente mencionados. Se trata de buscar un nuevo método con el cual se pueda llevar a cabo la medida de la uniformidad de riego en una parcela sin la necesidad de recurrir al sistema tradicional de pluviómetros. Aprovechando el espectro de temperaturas que ofrece la imagen térmica, comprobar, mediante métodos estadísticos, si existe correlación entre la temperatura del suelo antes, durante y después del riego, con la pluviometría de los aspersores de cada una de las parcelas que componen el estudio.

La ventaja que aporta el uso de la termografía en este ámbito es que se trata de un sistema de medida mucho más rápido en ejecución que el tradicional. No obstante, también requiere de un equipo especializado como es la cámara térmica y la adquisición de programas informáticos específicos para el procesado de los datos obtenidos.

### 3. OBJETIVOS.

El objetivo principal que persigue este Trabajo Final de Grado es el de buscar una alternativa válida al sistema tradicional de evaluación de la uniformidad de riego. A partir del uso de termografías y la evaluación clásica de la uniformidad de riego mediante pluviometría, se busca una relación entre la temperatura de la superficie regada, la uniformidad de riego y la pluviometría en parcela. Para llegar a conocer lo anteriormente mencionado, se pretende:

- Evaluar la pluviometría del sistema de riego de cada una de las parcelas objeto de estudio con el fin de obtener coeficientes de uniformidad.
- Obtener un espectro de temperaturas del suelo antes, durante y después del riego mediante una cámara térmica.
- Analizar, mediante una aplicación de cálculo estadístico, la posible relación de la temperatura del suelo regado con la uniformidad de riego.
- Detectar fugas en riego localizado bajo malla y bajo vegetación arbustiva mediante el uso de termografías.

Estos objetivos buscan abreviar la forma de evaluar la uniformidad del riego simplificando así el método clásico de evaluación, el cual conlleva sustituir un gasto considerable de tiempo, por una simple secuencia de imágenes térmicas, las cuales deberían proporcionar valores fiables sobre la uniformidad de riego.

Para poder llegar a unas conclusiones fiables sobre el estudio que se plantea, es preceptivo explicar las tres herramientas que permitirán llegar a una conclusión final. Se tratará por tanto, la uniformidad de riego y coeficientes de uniformidad, la aplicación de técnicas de termografía en jardinería y los métodos estadísticos aplicados para llegar a las conclusiones.

El objetivo último, en el que se enmarca este trabajo, es el de optimizar el uso de recursos asociados a la gestión de jardines urbanos. Una correcta uniformidad del riego, es el primer paso para alcanzar la eficiencia de los sistemas de riego, ya que al aplicarse los volúmenes necesarios distribuidos de forma correcta en las parcelas, se reduce el coste de gestión y mantenimiento del jardín y con ello, el impacto ambiental que conlleva un consumo excesivo de agua y energía asociada.

## 4. MATERIAL Y MÉTODOS.

### 4.1. INTRODUCCIÓN.

El estudio sobre la uniformidad de riego se ha llevado a cabo en los jardines de la UPV. El campus cuenta con una amplia extensión de zona ajardinada, aproximadamente 120227 m<sup>2</sup>, lo que hace muy laboriosa y lenta la toma de datos y obtención de conclusiones de toda esta superficie. Para abordar el estudio, se simplifica escogiendo tres parcelas de distintas zonas de la UPV de forma que quede correctamente representada la zona ajardinada con posibles problemas de uniformidad del Campus. El procedimiento de selección y estudio ha sido el siguiente:

1. Inspección visual: En primer lugar, recurriendo al análisis visual, se detectan problemas sobre la uniformidad de distribución, provocados por la mala disposición de los aspersores. La inspección fue realizada en momentos de ausencia de viento, para eliminar éste como causa de excesiva deriva de las gotas de agua.
2. Selección: De todas las parcelas observadas con problemas, se seleccionaron tres, siendo el criterio principal que en la parcela no existiese gran cantidad de árboles que interfiriesen en el empleo de otras técnicas de evaluación.
3. Ensayo de pluviometría y termografía: El trabajo de campo consistió en el estudio de pluviometrías de cada una de las tres parcelas. Además del análisis clásico de pluviometría, durante el riego, se tomaron imágenes termo gráficas para registrar la evolución de la temperatura en la superficie de cada parcela
4. Detección de fugas: Adicionalmente a la relación con la pluviometría, se pretendió testar el uso de la termografía para la detección de fugas en parcelas de riego localizado. Para ello se inspeccionaron y fotografiaron otras parcelas de riego urbano.
5. Procesado de fotografías: Los datos anteriormente recogidos se analizaron con programas informáticos de distinta naturaleza, como: Autocad, Excel, ArcGis 10.1, Statgraphics.

### 4.2. JARDÍN DEL CAMPUS DE VERA DE LA UPV.

Las parcelas ajardinadas objeto de estudio están situadas en el Campus de Vera de la UPV. Ésta se encuentra situada en la ciudad de Valencia al Noreste de la ciudad. Se puede acceder a este recinto por la autovía V-21 por el norte y por la Av. de los Naranjos por el Sur. El Campus de Vera tiene una superficie total de 620000 m<sup>2</sup>.



*Figura 6: Localización y situación del Campus de Vera de la UPV.*

Dentro de la zona ajardinada objeto de estudio se encuentran distintos tipos de especies vegetales. Según el Mapa Botánico de la UPV (Esteras et al, 2012) existen 79 especies de

arbustos y trepadoras, 66 especies caducifolias, 31 especies perennifolias, 16 de coníferas y 13 tipos de palmeras. Respecto a las cespitosas, las más representativas son: *Stenotaphrum secundatum*, *Festuca arundinacea*, *Pennisetum clandestinum*, *Poa annua* y *Cynodon dactylon*.

La distribución de las distintas especies en la superficie ajardinada del Campus es bastante diversa. Existen zonas simplemente con especies cespitosas, calles con palmeras y zonas donde se mezclan muchos de las especies de árboles mencionadas con cespitosas.

Esto implica que se disponen sobre el mismo suelo especies con necesidades hídricas muy distintas, hecho bastante ordinario en el sector de la jardinería, lo que puede comprender problemas de déficit o abundancia de agua para alguna o varias de las especies que componen el jardín. Las parcelas de los ensayos están diseñadas a nivel de subunidad, controladas cada una de estas por una electroválvula. Cada una de las tres áreas de estudio está compuesta por dos subunidades. Los emisores instalados en las parcelas para el riego por aspersión son emisores de turbina emergentes contando cada una de ellas con un número distinto según la superficie.

### **4.3. PARCELAS DEL ESTUDIO.**

Las parcelas destinadas al estudio son seleccionadas por las siguientes características: zonas con exceso de riego y zonas muy secas; parcelas en las que no existen gran número de árboles, arbustos o elementos escultóricos que puedan obstaculizar el riego y obtenerse así resultados fuera de la realidad. Al margen de la naturaleza de cada una de las parcelas, es importante que próximo a ellas exista un edificio de fácil acceso para poder realizar la toma de imágenes térmicas desde suficiente altura y lograr una perspectiva adecuada.

#### **4.3.1. Parcela 1. Pradera Central.**

Se trata de una parcela ubicada en la pradera central que separa los edificios Nexus 6G y 7A. Parcela denominada V.J6.0.009. Su superficie es de 809 m<sup>2</sup>. En la parcela los aspersores se disponen en un marco de riego aproximadamente de 8x8 m.

En la parcela no existe ningún obstáculo ajeno al jardín que pueda impedir la buena dispersión de la lluvia artificial sobre la superficie, no obstante, si existen, en las orillas de la parte Norte, algunas palmeras muy cercanas a la zona donde emerge el aspersor donde se observa con claridad que el tronco de la palmera obstaculizada la correcta dispersión del agua sobre la superficie de la parcela. En la figura 34 del apartado Anejos 1, se adjunta la imagen de la ubicación de la parcela.

#### **4.3.2. Parcela 2. Rotonda.**

Se trata de una de las rotondas del Campus de Vera de la UPV. Los edificios que tiene en su periferia son: por el Norte el 5Q, por el Sur el 7C, por el Oeste el 5N y por el Este el 7H. Parcela denominada V.J5.0.005. La parcela tiene un diámetro de 43 m y un área de 1452 m<sup>2</sup>. Los aspersores están colocados formando una circunferencia y de radio 15 m. En total se encuentran 11 aspersores. Debido a un obstáculo decorativo del jardín, se decidió dividir la parcela en cuatro partes iguales y dedicar al estudio a tres de ellas, despreciando el obstáculo ya que hubiera dificultado la medida de la pluviometría y por tanto se hubieran obtenido datos erróneos sobre la uniformidad de riego. El resto de la parcela no presenta obstáculos que puedan influir en la medida de la pluviometría. En el figura 35 del Anejo 1 se adjunta la imagen de la ubicación de la parcela.



### 4.3.3. Parcela 3. Nexus.

Ésta está situada junto al edificio 6D del Campus de Vera de la UPV. Parcela denominada V.J6.0.038. La parcela tiene un área de 830 m<sup>2</sup>. Se trata de una parcela con forma poligonal con 16 aspersores, los cuales están distribuidos con un marco aproximado de 8x8 m. En la zona Sur de la parcela existe una escalera de acceso a uno de los parkings de la UPV, que en principio podría interferir en el riego, pero se observa que los dos aspersores que tiene junto a ella están bien calibrados para que el agua no impacte contra el muro. Dentro de la parcela existe algún árbol que puede dificultar la medida de la pluviometría, pero no es una parcela que se caracterice por una gran cantidad de árboles, por tanto los resultados obtenidos no deberían estar afectados por esto. La parcela fue elegida porque visualmente se detectaron grandes charcos en la zona más cercana al edificio y algún aspersor que emergía de la superficie pero no regaba. Añadir que la mitad de esta parcela está sobre una losa de hormigón a unos 50 cm (techo del aparcamiento) y el resto sobre un suelo más profundo, cosa que podría influir en los resultados. En el figura 33 del Anejo 1 se adjunta la imagen de la ubicación de la parcela.

### 4.3.4. Especies predominantes.

Mediante reconocimiento visual se ha buscado, en las tres parcelas, las especies predominantes de cespitosas (Comunicación personal, 2015). La especie más predominante encontrada en las tres parcelas son *Stenotaphrum secundatum* conocida como “Grama Americana” la cual es la más predominante en las tres parcelas, posiblemente siendo la especie originaria en el jardín. Esta especie solamente consume agua durante la época de primavera y verano, en invierno presenta un aspecto pajizo. Es una especie fácilmente identificable por el aspecto plano de su tallo. En segundo lugar, por densidad en parcela, se encuentra *Festuca arundinacea*, la cual se suele usar en jardinería porque se mantiene verde durante todo el año en el clima Mediterráneo, por tanto, es la que aporta el verdor característico de un jardín durante las estaciones más frías. En las parcelas, las zonas más encharcadas durante el riego coinciden con la presencia únicamente de la especie *Festuca arundinacea*. Esto es debido a que esta especie soporta muy bien la humedad acumulada en el suelo. También se encontró la especie *Pennisetum clandestinum* más conocida como “Kikuyu” por su lugar de origen y reconocible por la presencia de hendiduras en sus hojas en forma de rayas y los estambres en su época de floración. Esta especie es mucho más invasiva que *Stenotaphrum secundatum*, y por ello probablemente en un tiempo sea la predominante en el jardín. También se encontraron *Poa annua* y *Cynodon dactylon* pero en mucha menos densidad que las anteriores. En Anejos 2 se adjuntan imágenes sobre las especies encontradas en las parcelas de los ensayos.

## 4.4. EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO.

### 4.4.1. Ensayo de pluviometría.

Para la correcta evaluación de la uniformidad de riego en las parcelas anteriormente descritas se ha utilizado el procedimiento descrito en la norma UNE 68-072-86, adaptándolo a las características del jardín. El procedimiento a seguir es el: (Calleja, F. 2014):

1. Se limita la superficie utilizada en la parcela para el ensayo.
2. Se coloca una malla de pluviómetros con un marco adecuado a la separación entre ellos. La separación de los pluviómetros elegida es de 2.5 m. Cada pluviómetro recoge la altura de agua representativa del área del cuadrado de dimensiones iguales al marco de la red de pluviómetros.
3. Puesta en marcha de los emisores de riego durante un tiempo de 20 minutos. Tiempo similar al riego ordinario de las parcelas.

4. Pesada del agua recogida en cada uno de los pluviómetros mediante una balanza, una vez terminado el ensayo. Se toma nota de cada uno de los pesos en la libreta de campo, con el croquis de la parcela como ayuda.
5. Se cuentan los aspersores y se colocan en el espacio para posteriormente poder hacer un estudio correcto de las alturas de agua en función de donde estén situados los aspersores.

Es conveniente no efectuar ni evaluaciones (ni prácticas de riego) en situaciones de excesivo viento ya que supone la obtención de valores de uniformidad incorrectos y un importante gasto de agua y energía, ya que una alta velocidad del viento puede desencadenar en una pérdida de uniformidad de riego y por tanto, modificar los datos recogidos dando así unos resultados erróneos

#### **4.4.2. Procesado de datos obtenidos en la pluviometría.**

Una vez recogidas en campo las masas de agua que ha recibido cada uno de los pluviómetros dispuestos en la parcela, se transforman éstos en alturas de agua teniendo en cuenta la densidad del fluido y el diámetro interior del pluviómetro para calcular su área, y obtener así finalmente la altura de agua por unidad de tiempo en mm/min o L/h. Para todo el proceso anterior se emplea la el programa informático Microsoft Excel.

#### **4.4.3. Coordenadas de pluviómetros y aspersores.**

Con el fin de colocar en el espacio los pluviómetros utilizados en el ensayo, se procede, mediante el programa AutoCAD, a dibujarlos sobre un plano de la UPV. El plano de la UPV está proyectado empleando el sistema de coordenadas *European Datum 1950 UTM zonne 30*. Es importante conocer el dato anterior de cara a utilizar los datos que se extraigan posteriormente en otros programas informáticos.

Una vez dibujados todos los pluviómetros utilizados en el ensayo sobre el plano de AutoCAD se procede a hacer pasar por todos ellos una polilínea para posteriormente extraer sus coordenadas X, Y y Z. Para ello, se utiliza la función "List" de AutoCAD. En este caso, la coordenada Z serán los datos de pluviometría en mm/h del ensayo. Finalmente, mediante una nueva hoja Excel, se introducen los datos de las coordenadas de los puntos X e Y y de las pluviometrías en Z en software ArcGis 10.1 al que previamente se le ha introducido una ortofoto de la zona de estudio.

Dicha ortofoto utilizada que servirá de referencia para colocar en el espacio todos los datos de este Trabajo Final de Grado utiliza un sistema de referencia distinto al utilizado en el plano de AuroCad, concretamente el *ETRS 1989 UTM zone 30*. Es por ello que, sabiendo que los dos tipos de imágenes con los que se trabaja tienen distintos tipos de sistemas de referencia, cuando las coordenadas extraídas del AutoCad se introduzcan en el ArcGis 10.1, los puntos introducidos se representan desplazados y se deben reubicar cambiando el sistema de referencia al mismo que utiliza la ortofoto. Para trasladar los puntos se ha utilizado la función del programa informático denominada "Project".

Adicionalmente, también se han de colocar en la ortofoto los aspersores utilizados durante el ensayo. Para ello se lleva a cabo el mismo procedimiento que anteriormente se ha utilizado para ubicar los pluviómetros. Con esto se obtiene un campo de puntos ubicados correctamente mediante sus coordenadas en el espacio real tanto de los pluviómetros como de los aspersores. De esta manera, cuando se obtengan los estudios de uniformidad de riego, que se explicaran posteriormente, se tendrá una imagen donde se verán las zonas con sus

correspondientes pluviometrías interpoladas y los aspersores ubicados en parcela, para así, simplemente de forma visual poder hacerse una idea de si la ubicación de éstos es la correcta o no.

#### **4.4.4. Interpolación de datos con ArcGis 10.1.**

Una vez introducidos los datos de las coordenadas y pluviometría de cada una de las parcelas, es el momento de realizar el estudio de la uniformidad de riego de cada una de las parcelas. Para el estudio se utiliza la interpolación. El software proporciona una herramienta de interpolación denominada IDW (Interpolación por distancia inversa ponderada). Lo que hace esta herramienta es determinar los valores de cada una de las celdas mediante una combinación de puntos (Villatoro, M. et al. 2008).

El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias (Johnston et al. 2001, Burrough y McDonnell, 1998). El método IDW es más rápido en los cálculos que otros métodos que usa ArcGis 10.1 como el Kriging. En contraposición, el método IDW crea cerca de los puntos de muestreo patrones poco reales conocidos como “ojos de buey” en el ámbito estadístico (Gotway, C.A. et al. 1996). El método IDW es similar al Kriging ordinario, ya que da más peso a los valores cercanos a un punto, pero posee una menor complejidad del cálculo.

Una vez terminada la interpolación se obtiene un mapa pluviométrico de colores donde cada color indica un valor de pluviometría referenciado en la leyenda del mapa. Es importante ajustar en cada una de las parcelas que se lleven a estudio, un rango correcto de colores para que visualmente se puedan sacar conclusiones sobre la uniformidad de riego en esa parcela.

En el momento de llevar a cabo la interpolación por el método IDW, la ventana de opciones de la aplicación permite elegir el tamaño de pixel que se quiere obtener finalmente en la interpolación para así, obtener unos resultados de mayor o menor precisión. Además, también existe la opción de seleccionar la cantidad de puntos con la que se desea que un mismo punto interpole con los de su periferia consiguiéndose así también unos resultados de distinta precisión según el valor del parámetro. Posteriormente, en el apartado correspondiente, se explicará el tamaño de pixel que se debe seleccionar para el estudio estadístico con el cual se dará por finalizado el Trabajo final de Grado.

Dado que la aplicación informática realiza una interpolación entre todos los puntos que tiene a su alrededor, de los puntos que están en la periferia de la parcela se obtienen datos erróneos, es decir, los puntos situados por fuera, los cuales no tiene puntos con los que hacer la interpolación, el programa les asigna un valor el cual no es real, solamente son correctos los valores que se obtienen dentro de la malla de puntos, es decir, en la zona de estudio de los pluviómetros. Para eliminar estos resultados anómalos será necesario “recortar” la malla de colores obtenida. Se realiza para ello, lo que se denomina una “Máscara”, que simplemente es una línea de puntos que delimita un área determinada. La máscara se realiza a mano delimitando sus esquinas a la zona donde se desean obtener los resultados finales.

#### **4.4.5. Evaluación de la uniformidad del riego: coeficiente de uniformidad y uniformidad de distribución.**

Con los resultados del ensayo de pluviometría, al margen de la interpolación anteriormente descrita, se obtendrán los indicadores de calidad de la uniformidad DU y CU, para tener poder evaluar objetivamente de qué manera se está distribuyendo el agua en cada una de las parcelas donde se han realizado ensayos.

Posteriormente, en el apartado correspondiente a resultados, se usará la siguiente clasificación donde Merriam y Keller (1978) determinan la bondad de un riego en función de los resultados obtenidos.

Calidad del sistema	DU	CU
	%	%
Excepcional	-	-
Excelente	80	-
Muy bueno	70	-
<b>Bueno</b>	<b>65</b>	<b>84</b>
Razonable	60	-
Malo	50	-
Fallo	-	-

Figura 7: Valores de referencia para los indicadores empleados en la evaluación.

#### 4.5. TOMA DE TERMOGRAFÍAS.

El siguiente aspecto de la parte experimental trata de la toma de fotografías utilizando una cámara térmica, es decir, de termografías. Con esto se pretende obtener un espectro de temperaturas del suelo del jardín antes, durante y después del riego utilizando los mismos tiempos de riego de los ensayos de pluviometría. Las imágenes térmicas se toman desde edificios anexos a cada una de las parcelas desde una altura que permita capturar completamente la parcela a través del objetivo de la cámara.

Se toman para ello dos imágenes antes de accionar el riego y dos una vez finalizado éste. Durante el riego, se van tomando imágenes cada dos minutos. Por tanto, se toman catorce imágenes por ensayo.

Para este ensayo, se utilizó una cámara térmica TH9100 WR (NEC San-ei Instruments, Tokyo, Japan). La cámara tiene un visible de 752 x 480 pixels y un sensor microbolométrico de 320 x 240 pixel que actúa en un rango de 8 a 14  $\mu\text{m}$ . La lente tiene un campo de visión de 42,0° x 32,1° (Ballester et al. 2013).

En Anejos 2 se adjunta una imagen de cada parcela con el esquema de visuales de la realización de las fotografías.

##### 4.5.1. Procesado de imágenes mediante ArgGis 10.1.

Una vez tomadas las termografías en campo se deben procesar para extraer la información de las temperaturas del suelo de ellas, para ello se utilizó el programa ArcGis 10.1.

De la cámara se obtienen las imágenes en formato .SIT. Para su procesado se debe crear una carpeta de trabajo en el ordenador, que debe contener:

- La imagen tomada en formato .SIT.
- Una copia del archivo anterior con el mismo nombre en formato .BSQ. En este archivo se almacena la información referida a las temperaturas pixel a pixel, dentro de cada una de las termografías.
- Un archivo con el mismo nombre y formato .HDR.

Para el procesado de las imágenes térmicas se hizo uso del programa ArcGis 10.1 el cual contiene una aplicación denominada Geoprocessado que se utiliza para la construcción de modelos de secuencias de tareas. Esos modelos son construidos mediante programación y se denominan *Model Builders*. Las características básicas que un *Model Builder* debe contener son las siguientes:

En primer lugar, se encuentran herramientas que son los flujos de trabajo del modelo. En segundo lugar se dispone de variables como elementos del modelo que contienen referencias a información almacenada en disco, pueden ser datos o valores. Por último, los Conectores son los que enlazan las herramientas con las variables dando así un sentido al flujo de trabajo del modelo.

En este caso en concreto, se utilizó un Model Builder, ya implementado en ArcGis, el cual a partir del archivo .SIT, se le asignó a cada uno de los píxeles que formaban la imagen, un dato de temperatura del archivo .BSQ. Para ello, el Model Builder contenía la siguiente ecuación (Jiménez-Bello et al, 2011) donde DN son los valores de 14 bits, 40 es la temperatura de referencia para DN = 0, 180 es el rango de temperaturas para la que es válida la ecuación y 16384 son los posibles valores de un píxel de 14 bits.

$$T (^{\circ}C) = \frac{40 + (DN \cdot 180)}{16384}$$

Una vez procesada cada una de las imágenes con el Model Builder descrito, se procedió a usar la herramienta de ArcGis 10.1 llamada Georreferenciar. La barra de herramientas Georreferenciación le permite georreferenciar archivos tipo raster, servicios de imágenes y productos de raster (ARCGIS RESOURCES, 2015). En este caso, permitió modificar sobre un plano cada una de las termografías para vincularlas espacialmente sobre la ortofoto de trabajo, y así tener ubicadas cada una de las ellas en el espacio real. Esto se hace porque las imágenes térmicas fueron tomadas desde distintos edificios del propio Campus de Vera y el hacer las fotografías desde el edificio implica tener cierto ángulo respecto al suelo. En cambio, la ortofoto utilizada como referencia está tomada desde un satélite y por tanto, e obtiene de forma perpendicular al suelo. Así, con esta herramienta, se georreferencia cada una de las imágenes sobre la ortofoto.

La georreferenciación se lleva a cabo para, posteriormente, poder extraer datos de cada uno de los píxeles de la imagen térmica y poder correlacionarlos con los datos de pluviometría. En el caso de no realizar la georreferenciación, el posterior estudio sería inviable ya que, los datos de pluviometrías que se tiene están tomados sobre la superficie de la parcela. Al tomar la imagen térmica cierto ángulo con el suelo, las coordenadas de cada uno de los puntos no serían las mismas que en el caso de la pluviometría. Así, con esta técnica, se consigue tener una aproximación bastante real de las coordenadas de la imagen georreferenciada y así poder realizar el estudio de correlación.

Para una correcta georreferenciación de las imágenes térmicas sobre la ortofoto se escogieron 8 puntos de referencia distribuidos por toda la imagen ya que la termografía debe ir ubicándose en su nuevo emplazamiento por todas sus partes sino se hace así, se cometerá mucho error respecto a la posición real. De no hacer esto, la fotografía se deforma solamente por uno de sus lados y no se puede referenciar adecuadamente (ARCGIS RESOURCES, 2015). Después del proceso anterior, el propio programa ArcGis 10.1 muestra el error cometido para que, antes de guardar las dos imágenes solapadas, éste pueda ser corregido. En este caso, se trabaja con un tamaño de píxel de 0.5 m. Teniendo en cuenta este tamaño de píxel, se puede ser bastante exacto a la hora de marcar los puntos y corregir posteriormente el error.

#### 4.5.2. Propuesta de índices de uniformidad térmica.

Al igual como se usan y clasifican los coeficientes de uniformidad de riego, se ve oportuno utilizar unos coeficientes de uniformidad térmica. Se propone en este trabajo la adaptación de los mismos índices CU y DU que se emplean para uniformidad de riego. Para ello, a partir de la temperatura de cada pixel de la imagen térmica al final del riego se pueden calcular del mismo modo unos índices de uniformidad de temperaturas. Donde  $T_i$  es la temperatura de cada pixel en °C,  $T_m$  es la temperatura media de todos ellos en °C y  $T_{1q}$  es la temperatura media del primer cuartil en °C.

$$CUT (\%) = 100 \left( 1 - \frac{\sum_1^n |T_i - T_m|}{\sum_1^n T_i} \right) \qquad DUT (\%) = 100 \left( \frac{T_{1q}}{T_m} \right)$$

Este índice aporta un valor numérico global para toda la parcela con el que poder establecer rangos o escalas térmicas. No se dispone en este caso de una clasificación con la que poder realizar una comparación respecto al estado hídrico de las plantas, al no existir experiencia suficiente y tratarse de una técnica incipiente.

#### 4.5.3. Datos de imágenes e interpolación.

Después de haber georreferenciado cada una de las imágenes térmicas y realizadas las interpolaciones en cada parcela sobre la pluviometría es el momento de obtener datos numéricos.

Las imágenes térmicas y las interpolaciones son archivos raster los cuales están formados por una matriz donde cada una de ellas recibe un valor, es decir, se trata de un archivo donde se representa una imagen la cual contiene información con valores de posición referidas a un sistema de referencia concreto que ha sido predeterminado al introducir la imagen y medidas, en este caso, temperaturas y pluviometrías (mm/h). Para obtener la información que contiene el archivo raster es necesario utilizar la aplicación de ArcGis 10.1 *Raster to point* donde creará un *shapefile* idéntico al archivo raster pero del cual se podrán extraer los valores de las coordenadas, temperatura y pluviometría en una tabla numérica.

#### 4.5.4. Análisis estadístico.

Para cada una de las parcelas, una vez se tienen los datos tanto de temperatura como de pluviometría, se busca una relación entre los dos parámetros. Para ello, utilizando una el programa informático Microsoft Excel, se enfrentan las dos variables colocando la temperatura en el eje de ordenadas y la pluviometría en eje de abscisas. Para las pruebas se toman valores de temperatura en instante e incrementos de temperatura respecto al momento previo al riego. Se realizan pruebas con todos los instantes de riego recogidos en las secuencias de imágenes térmicas.

Además, se realiza un segundo estudio estadístico donde se compara una zona de alta pluviometría y una zona de baja en una misma parcela con el fin de encontrar una relación entre la temperatura y la precipitación recibida en ese punto. En este caso, se utilizan datos de la secuencia de riego completa y se ve la evolución de la temperatura según se va acumulando agua durante el ensayo. Las relaciones planteadas se analizan empleando las siguientes técnicas estadísticas. Las zonas seleccionadas se pueden ver en Anejos 2.

Las herramientas básicas empleadas fueron el análisis de la varianza (ANOVA) y los modelos de regresión. Mediante el análisis de la varianza se determina si una variable es significativa o no. Para ello comparamos la Suma de Cuadrados (SC) asociada a cada variable con la  $SC_{residual}$ . Para llevar a cabo dicha comparación cada Suma de Cuadrados se divide por sus

grados de libertad, obteniéndose unos estadísticos a los que se denomina Cuadrados Medios (El  $CM_{total}$  no es más que la varianza de los datos). El  $CM_{residual}$  es una estimación de la varianza  $\sigma^2$  existente en las poblaciones muestreadas. El programa Statgraphics proporciona directamente los datos de  $CM_{efecto}$  y  $CM_{residual}$ . Para ver si el CM de una variable es significativamente mayor que el  $CM_{residual}$ , lo que implicaría la existencia de un efecto real a nivel poblacional, se comprueba si el cociente  $CM_{efecto}/CM_{residual}$  (al que se denomina F-ratio) es demasiado elevado para ser una F de Fisher con los grados de libertad correspondientes. La variable tendrá un efecto significativo si dicha probabilidad es menor que 0,05 si se opera con un riesgo de 1ª especie del 5%, o menor que 0,01 si se trabaja con un riesgo del 1%.

Por otra parte, los Modelos de Regresión Lineal permiten analizar la posible relación existente entre la pauta de variabilidad de una variable aleatoria y los valores de una o más variables (aleatorias o no) de las que la primera depende, o puede depender. En este trabajo se han utilizado los modelos de regresión lineal simple y de regresión no lineal.

En el modelo de regresión lineal simple se dispone de una variable aleatoria Y, que en este caso es la pluviometría, cuya distribución puede depender de otra variable X, la temperatura. Dicho modelo asume que la distribución condicional de Y ( $x_i$ ) es una variable aleatoria cuya varianza  $\sigma^2$  no depende de x, pero cuya media es una función lineal  $\alpha + \beta x_i$ , de dicho valor.

$$E(Y/X = x_i) = \alpha + \beta x$$

$$\sigma^2(Y/X = x_i) = \sigma^2(\text{constante})$$

Los modelos de regresión no lineal se utilizan para poder considerar en el modelo efectos más generales, ya que en muchos casos relaciones de tipo más general pueden aproximarse satisfactoriamente a partir de funciones de tipo polinómico en las que además de  $x_i$  aparezcan sus cuadrados (o incluso, aunque no suele ser necesario, potencias de orden más elevado).

La variabilidad total de la variable dependiente Y en el conjunto de las N observaciones viene medida por:

$$SC_{Total} = \sum_{j=1}^{j=N} (y_j - \bar{y})^2$$

y tiene N-1 grados de libertad.

Parte de esta variabilidad es debida a las variables explicativas  $X_1, \dots, X_l$ . Esta parte explicada por dichas variables tiene l grados de libertad.

El resto será recogido en los residuos  $e_j$ , viniendo medida su magnitud por la Suma de Cuadrados Residual:

$$SC_{Residual} = \sum_{j=1}^{j=N} e_j^2$$

que tendrá (N-1) – l grados de libertad.

La diferencia:  $SC_{Explicada} = SC_{Total} - SC_{Residual}$ , es la parte de la variabilidad Y asociada a las variables explicativas. El Coeficiente de Determinación  $R^2$  se define como el cociente:

$$R^2 = \frac{SC_{Explicada}}{SC_{Total}}$$

que lógicamente estará comprendido entre 0 y 1. Cuanto más cercano a 1 sea este coeficiente, mayor parte de la variabilidad constatada de Y estará asociada a las variables explicativas incluidas en el modelo.

Cuando las variables explicativas  $X_i$  son todas aleatorias, la raíz cuadrada positiva R de  $R^2$  es el coeficiente de correlación múltiple entre Y y el conjunto de las  $X_i$ .

#### **4.6. IDENTIFICACIÓN DE FUGAS EN RIEGO LOCALIZADO MEDIANTE TERMOGRAFÍA.**

Como estudio complementario y para explorar otras aplicaciones de la termografía en relación con la instalación hidráulica en riego de jardines, se probó otra posible utilidad de la técnica. El principal sistema de riego en parcelas con arbusto bajo en alta densidad o en aquellas con malla antihierbas, es el localizado, existiendo mucha dificultad en el mantenimiento de las instalaciones. La principal razón es que las conducciones se encuentran ocultas, y las pérdidas de agua pueden pasar desapercibidas a los gestores del jardín. Para ello se pretende, mediante el uso de termografías, la detección de fugas en laterales de sistemas de riego de jardines urbanos de esta tipología.

Para ello, se estudió un jardín localizado en la C/ Almazora (Valencia) junto a la parada de tranvía Pont de Fusta donde se encuentra distintos tipos de riego por goteo. En el caso que nos atañe, se utilizaron dos pequeñas parcelas: una con riego localizado bajo malla y otra con gran densidad de vegetación. Se realizaron sendas simulaciones de fugas siguiendo el siguiente procedimiento en los dos tipos de jardín del ensayo:

Con el riego apagado, se levantó la malla y se identificó la posición del lateral, en ese momento se tomó una imagen térmica con el suelo seco. Después, en ese mismo punto se simuló una fuga en el lateral añadiendo un volumen de agua bajo la malla, con el fin de en la siguiente imagen térmica realizada, se pudieran identificar diferencias de temperatura. Se empleó un procedimiento análogo en el segundo caso teniendo la precaución de no mojar la vegetación adyacente al punto de simulación de fuga.

Con las imágenes ya tomadas, antes y después de la fuga, mediante el programa NS9205 ViewerProgram, se identificaron las temperaturas del punto de la fuga observando las posibles diferencias.



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

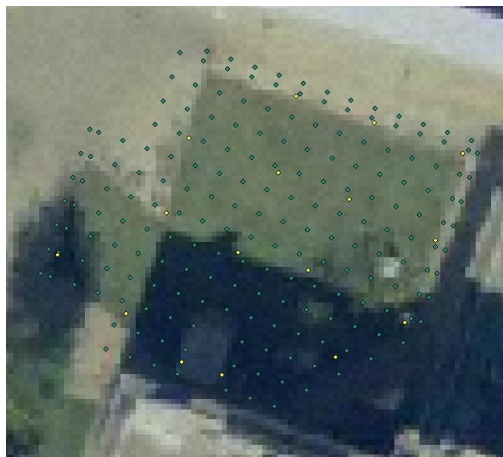
### 5.1. ENSAYOS DE PLUVIOMETRÍA.

En este apartado se exponen los resultados de las pluviometrías realizadas en cada una de las parcelas de estudio: Nexus, Pradera Central y Rotonda. Así mismo, se presentan las imágenes acompañadas de los pluviómetros colocados y la disposición de los aspersores en parcela. Además se expone la interpolación de los datos llevada a cabo con el software ArcGis 10.1. De esta forma, teniendo en cuenta la disposición de los aspersores y los resultados de las interpolaciones de la pluviometría se pudieron obtener unas primeras impresiones visuales sobre la uniformidad de riego.

También se aportan los resultados de los coeficientes de uniformidad de cada una de las parcelas, donde numéricamente se puede obtener una información más certera sobre la uniformidad de riego en cada una de las parcelas.

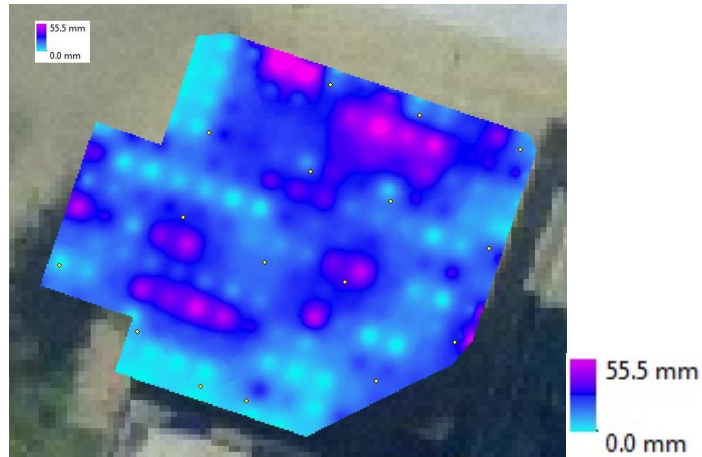
#### 5.1.1. Parcela Nexus.

En la **parcela Nexus**, el CU es de 39.55 % y el DU es de 36.71 % por tanto, se puede decir que la uniformidad de riego es bastante pobre. La parcela es bastante llana, ya que no tiene grandes fluctuaciones en las cotas de los distintos puntos. Probablemente la falta de uniformidad pueda ser debida a la errónea disposición de los aspersores o al mal funcionamiento o ausencia de los mismos.



*Figura 8: Distribución de pluviómetros (azul) y aspersores (amarillo) en parcela Nexus.*

Además, observando la interpolación de la imagen siguiente, se observa claramente zonas mucho más regadas que otras, e incluso zonas donde tan siquiera se supera 1 mm de agua, lo que implica áreas secas y otras con grandes encharcamientos.



*Figura 9: Interpolación de la pluviometría (mm/h) en parcela Nexus.*

Esta falta de uniformidad se puede justificar con imágenes tomadas a pie de parcela simultáneamente al ensayo que se realizó de pluviometría donde se ven claramente unas zonas con charcos que se forman a los pocos minutos de poner en funcionamiento el riego.



*Figura 10: Encharcamiento producido por exceso de riego. Parcela Nexus.*

Adicionalmente, al margen de que en la parcela en si el riego no es uniforme, la disposición de los aspersores y el ángulo de giro que tienen asignado provoca que el agua sobrepase varios metros los límites de la parcela regando así la zona peatonal como se ve en las siguientes imágenes.



*Figura 11: Zonas externas a la parcela con abundante agua.*



Figura 12: Detalle del agua aportada fuera de la parcela por la incorrecta dotación del ángulo de giro del aspersor.

### 5.1.2. Parcela Rotonda.

En la parcela Rotonda el CU obtenido es de 43.10 % y el DU es 41.01 %, valor bastante bajo también como en el anterior caso. En este caso cabe decir que la parcela si consta de cierta pendiente negativa desde el centro de la rotonda hacia el extremo, lo que puede provocar cierta escorrentía cuando cae sobre la superficie. Aun así, durante el ensayo de pluviometría, se pudo observar que no se producían grandes acumulaciones de agua en los extremos de la parcela, seguramente debido al buen drenaje de ésta.



Figura 13: Distribución de pluviómetros (azul) y aspersores (amarillo) en Parcela Rotonda.

En la siguiente imagen se expone el resultado de la interpolación de los datos del ensayo de pluviometría de esta parcela. Se observa con claridad que la zona más regada cae en un arco a mitad de parcela, justamente donde están ubicados los aspersores formando un anillo. La zona más alejada del centro apenas recibe agua. Esto seguramente sea debido a que los aspersores están más alejados de la zona del extremo de la circunferencia de la rotonda que del propio centro de ésta. Se debería reconsiderar la ubicación de los aspersores.

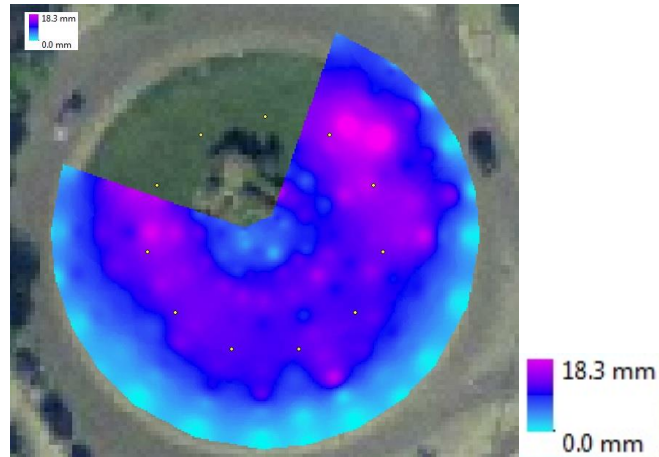


Figura 14: Interpolación de la pluviosidad (mm/h) en Parcela Rotonda.

Además, en esta parcela, como se observa en la imagen siguiente, en el centro hay un conjunto de arbustos de más o menos 1 metro de altura que interfieren con varios aspersores, obstáculo que afecta también a la correcta distribución del agua.



Figura 15: Arbusto obstaculizando el riego en Parcela Rotonda.

### 5.1.3. Parcela Pradera Central.

En la parcela Pradera Central el CU obtenido ha sido de 56.19 % y el DU es de 56.91 %, los más altos de los tres ensayos realizados pero aun así, demasiado bajo como para considerarlo como un valor aceptable.



Figura 16: Distribución de pluviómetros (azul) y aspersores (amarillo) en parcela Pradera Central.

En este caso la disposición de los aspersores parece la más correcta de los tres ensayos realizados, pero aun así existen zonas donde la pluviometría es bastante baja. En la siguiente imagen se muestra el resultado de la interpolación de los datos del ensayo de pluviometría, donde se puede observar que existen zonas donde no llega apenas agua y áreas donde la pluviometría es excesiva.

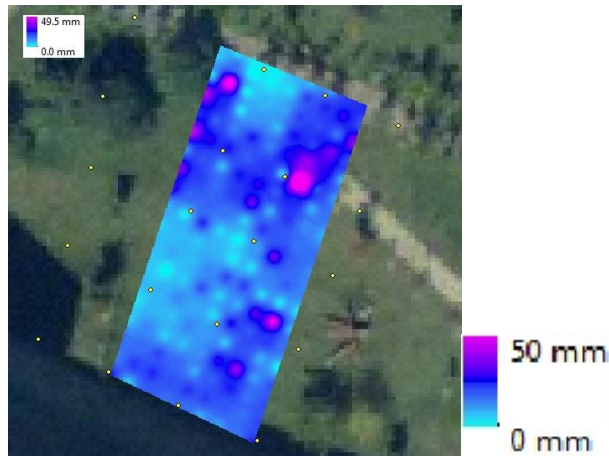


Figura 17: Interpolación de la pluviometría (mm/h) en parcela Pradera Central.

Esta baja uniformidad de riego, viendo que la distribución de los aspersores es bastante correcta, es debida a que en la parcela existen aspersores defectuosos. Algunos de ellos no llegan a emerger totalmente del suelo y el chorro, que impacta con la superficie del suelo y con el césped, no distribuye correctamente el agua; y otros directamente no llegan a emerger y por tanto, no aportan agua. Además, algunos elementos del jardín como árboles y arbustos obstaculizan la correcta difusión del agua en la parcela, provocando así charcos que rodean los árboles y zonas donde no llega el agua. En las siguientes imágenes se muestran los problemas anteriormente descritos que se detectaron el día que se llevó a cabo el ensayo de pluviometría. Observando, se ve claramente que, aunque el marco de los aspersores está seleccionado correctamente, se debería haber tenido en cuenta la ubicación de los elementos del jardín como árboles y farolas para evitar dicha problemática. En este caso sigue existiendo una zona mojada externa a la parcela pero de mucho menor tamaño que en los casos anteriores. Derivas de este tamaño pueden ser debidas simplemente a una velocidad media del aire durante el riego.



Figura 18: Detalle de la intercepción del chorro de agua con un árbol y una farola en parcela Pradera Central.



Figura 19: Detalle de la deriva producida y aspersion que no emerge correctamente.

Además, elementos como los de las imágenes anteriores donde el agua impacta contra elementos del jardín, desencadena en grandes masas de agua acumuladas en torno a dichos elementos, lo que provoca en ocasiones, como en la imagen siguiente, que por asfixia radicular y proliferaciones de hongos las cespitosas mueran.



Figura 20: Detalle de charco producido por el impacto del agua con un elemento del jardín.

#### 5.1.4. Coeficientes de uniformidad y uniformidad de distribución.

A continuación se muestran los mencionados índices de uniformidad obtenidos en las tres parcelas del ensayo.

Parcela	CU (%)	UD (%)
Nexus	39.55	36.71
Rotonda	43.10	41.01
Pradera Central	56.19	56.91

Figura 21: Valores obtenidos de CU de los ensayos de pluviometría.

Respecto a ellos, remitiendo a la tabla patrón dada en Material y Métodos sobre los indicadores de uniformidad recomendados por Merriam y Keller (1978), se observa con claridad que los resultados obtenidos de los ensayos de pluviometría son bastante pobres en cuanto a uniformidad de riego se refiere.

Un estudio reciente realizado por Gómez de Barreda, (2015) en greens de un campo de golf donde se midió la uniformidad de riego en varios de ellos, concluye que la uniformidad media de todos los ensayos es pobre. Sabiendo la cantidad de cuidados y mantenimiento que se realizan en un Green, y viendo los resultados de uniformidad que se obtienen en este estudio, cabe pensar que los jardines del Campus de Vera, que no son de uso deportivo, no tienen un CU muy distinto a ellos aun recibiendo muchos menos cuidados que en un campo de golf.

Por otro lado, en el trabajo previo de Calleja (2014) se demostró mediante simulaciones matemáticas realizadas con los programas Sirias y SORA (Tarjuelo y Valiente, 1992), que para los modelos de aspersores que se usan en el Campus de Vera y a presiones de trabajo similares, se podrían conseguir valores de CU y DU superiores al 90%. Por tanto, se tiene un margen de mejora considerable ya que en el Jardín del Campus de Vera queda en evidencia el deficiente mantenimiento que recibe, la no existencia de un marco de aspersión regular además de una incorrecta adecuación de la presión.

## 5.2. TERMOGRAFÍA.

Se presentan a continuación las imágenes termográficas para las parcelas evaluadas. Tal y como se describe en el apartado 4, se buscó un emplazamiento elevado para la cámara tomando imágenes cada 2 minutos durante el riego, 2 previas y 2 posteriores.

Con la cámara dispuesta en el edificio anexo a la parcela, se tomaban imágenes cada 2 minutos antes, durante y después del riego con el fin de evaluar la fluctuación de la temperatura en el transcurso del riego completo. Una vez tomadas las imágenes fueron procesadas con ArcGis 10.1 para referenciarlas geográficamente sobre una ortofoto del Campus de Vera de la UPV y poder obtener análisis estadísticos posteriormente con las interpolaciones anteriores de los ensayos de pluviometría. Añadir que el cotejo fotográfico completo de los tres ensayos se puede consultar en el Anejo 2.

### 5.2.1. Parcela Nexus.

En las imágenes que se exponen a continuación se muestra la evolución de la temperatura según transcurre el riego. La primera imagen corresponde al momento previo al riego, las dos imágenes siguientes a los minutos 5 y 15 de riego, y la cuarta imagen, al momento en el que se desactiva. El ensayo fue realizado el 30/04/2015.

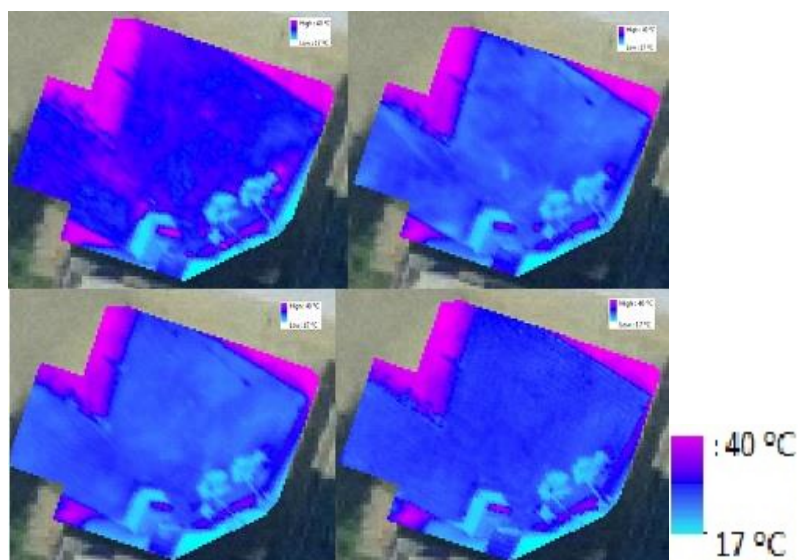


Figura 22: Evolución de la temperatura durante el riego. Parcela Nexus.

La evolución de la temperatura a lo largo del ensayo se observa con claridad en esta parcela. En primer lugar, en el momento previo al riego se tienen en la mayoría de puntos temperaturas que rondan los 30 °C. Desde que se comienza a aportar agua, la temperatura del suelo va descendiendo de forma gradual según se aporta más cantidad. En la última imagen, tomada al finalizar el ensayo, se ve como hay un pequeño ascenso de la temperatura, probablemente debido a la radiación solar.

Decir también que durante el ensayo de pluviometría se detectaron zonas con importantes charcos que la pluviometría no refleja debido a que seguramente se produzca por escorrentía y mal drenaje y no por un aporte excesivo de los aspersores.

En búsqueda de la relación entre la temperatura del suelo al final del riego y la pluviometría, en este caso no existe relación ya que las zonas con más masa de agua no son las más frías. De hecho, en la imagen térmica se ve con claridad una uniformidad de temperaturas, en cambio, la pluviometría no tiene dicha uniformidad.

### 5.2.2. Parcela Rotonda.

A continuación se muestran las imágenes térmicas tomadas en el ensayo de termografía en la parcela Rotonda. La primera imagen corresponde al momento previo al riego, las dos imágenes siguientes a los minutos 5 y 15, y la cuarta imagen al momento en el que se desactiva. El ensayo fue realizado el 28/01/2015.

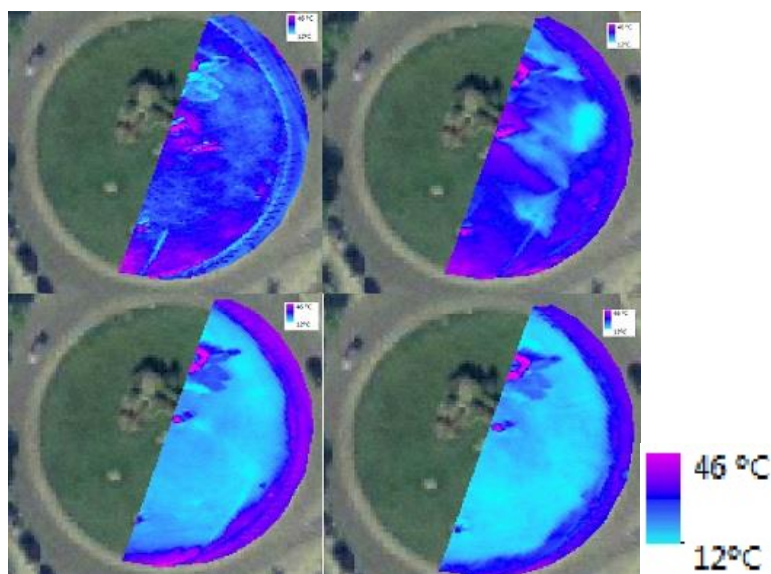


Figura 23: Evolución de la temperatura durante el riego. Parcela Rotonda.

En este caso las temperaturas tanto iniciales como finales son considerablemente más bajas que las del ensayo anterior debido a la época del año en que se realizó. Y como en el caso anterior, se observa un descenso de la temperatura a lo largo del ensayo. En cambio aquí, visualmente si se aprecia en la zona de la periferia de la rotonda una zona con mayor temperatura que, si se compara con la pluviometría, coincide con ésta en la zona menos regada.

### 5.2.3. Parcela Pradera Central.

En las siguientes imágenes se expone la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo de riego. La primera imagen corresponde al momento previo al riego, las dos imágenes siguientes a los minutos 5 y 15 de riego, y la cuarta imagen al momento en el que se desactiva. El ensayo fue realizado el 27/04/2015. En esta parcela solamente se pudo utilizar para la comparación temperatura vs pluviometría la mitad inferior de la parcela ya que se tuvieron problemas en la georeferenciación de las imágenes. Concretamente no se disponía de puntos de referencia como esquinas, elementos del jardín, etc, por ello se dispusieron bolsas de hielo como referencias externas. Cómo únicamente eran visibles las más cercanas al punto de adquisición de imágenes queda totalmente inservible.



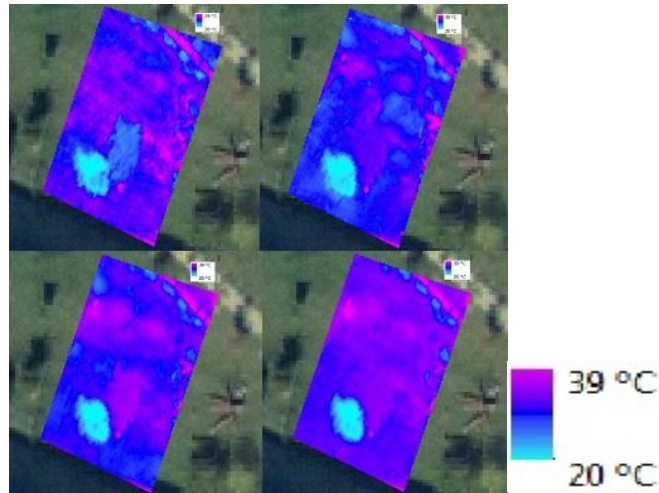


Figura 24: Evolución de la temperatura durante el riego. Parcela Pradera Central.

En el transcurso del riego se observa cómo va descendiendo la temperatura del suelo debido a la masa de agua que se está aplicando. En la imagen final se observa como sube la temperatura rápidamente respecto a la imagen anterior debido a la climatología del día del ensayo.

Aquí nuevamente, como en el caso de la parcela Nexus, no se aprecian aparentemente relaciones entre la temperatura y la pluviometría, aunque visualmente sí se detectan promontorios y depresiones muy leves donde se acumula agua y debería verse reflejado en las imágenes.

#### 5.2.4. Análisis estadísticos relación temperatura vs pluviometría.

A continuación se presentan seis ejemplos gráficos de los análisis estadísticos realizados en cada una de las parcelas buscando la relación temperatura – pluviometría e  $\Delta T$  – pluviometría. Los gráficos pertenecen al momento final del riego que es en el instante en el que se ha aplicado totalmente el agua del riego:

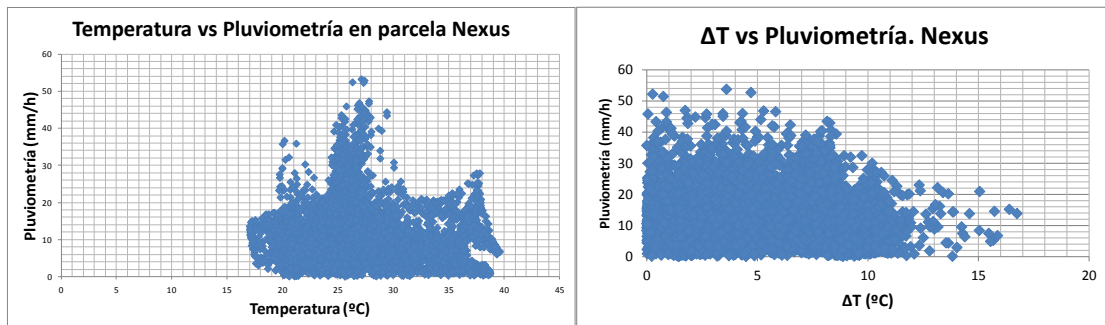


Figura 25: Relación Temperatura - Pluviometría e  $\Delta T$  – pluviometría en parcela Nexus al finalizar el riego.

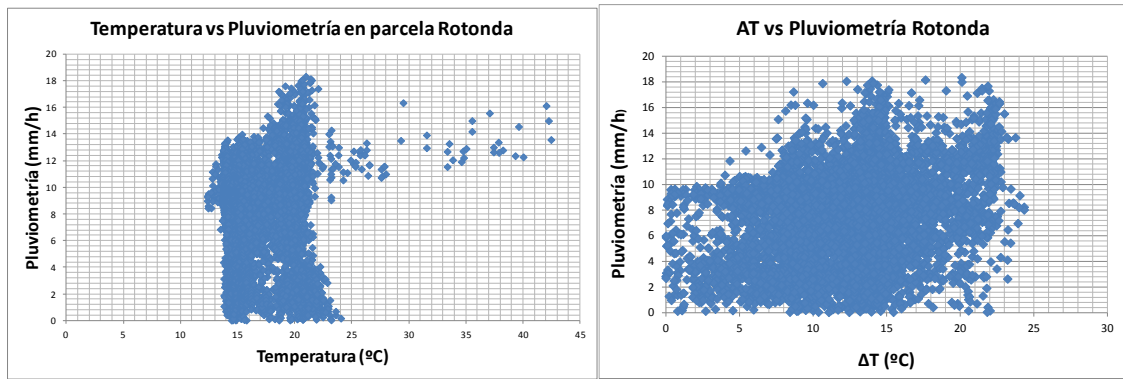


Figura 26: Relación Temperatura - Pluviometría e  $\Delta T$  - pluviometría en parcela Rotonda al finalizar el riego.

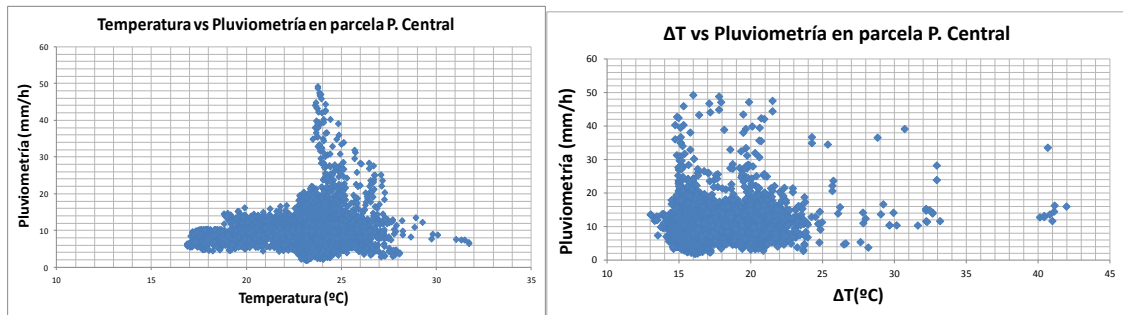


Figura 27: Relación Temperatura - Pluviometría e  $\Delta T$  - pluviometría en parcela Pradera Central al finalizar el riego.

Aunque se presenta sólo la relación en el momento final del riego en cada parcela, obteniéndose siempre resultados similares. Se ha seleccionado este instante puesto que se asumía, a priori, que el efecto de la temperatura sobre la altura de agua aplicada se vería con más claridad al final del riego. Como se puede comprobar en los gráficos, se observa con claridad que el propósito de relacionar la temperatura o el incremento de ésta con la pluviometría no se da en ninguno de los tres ensayos. Con estos resultados, se intentó ajustar a diversos tipos de ecuación, no obteniéndose ningún estadístico de importancia. Ninguno de los valores de  $R^2$  obtenidos en los estudios superaba el valor 0.01.

Probablemente, la técnica utilizada de toma de imágenes tenga numerosas mejoras a realizar de cara a futuros estudios. Se recuerda que las imágenes térmicas fueron tomadas desde edificios anexos a cada una de las parcelas, lo que conlleva tener imágenes con cierto ángulo respecto al suelo. En cambio, la interpolación de la pluviometría realizada con ArcGIS 10.1 otorga datos tomados perpendicularmente al suelo. Por tanto, para poder comparar los datos pixel a pixel se debía deformar la imagen. Esta deformación que sufre la imagen no es totalmente real, ya que hay partes de la imagen que es imposible hacerlas solapar con exactitud sobre el plano que contiene los datos de pluviometría. También añadir que la referenciación geográfica de las imágenes térmicas sobre el plano se realizó de forma manual, lo que conlleva arrastrar en todos los casos un error de cierta magnitud. Además, ArcGIS 10.1 solamente desplaza o gira la imagen en un plano X e Y, en ningún momento puede hacerlo en el eje Z, lo cual está aportando errores al análisis estadístico final ya que no se está comparando el pixel de pluviometría con el pixel de temperatura de la misma coordenada. Además, los ensayos y análisis realizados no se han tenido en cuenta variables que puedan afectar como: días de fuerte contraste térmico, pendiente de la parcela, tipo de suelo, microtopografía, homogeneidad del césped, etc.

Como propuesta de mejora en este aspecto, la utilización de algún equipo, que proporcionase una imagen cenital, simplificaría mucho el análisis estadístico final, ya que las imágenes serían tomadas exactamente de forma perpendicular al suelo y se tendrían de ellas

las coordenadas exactas de cada uno de sus puntos. Por tanto, se compararía así el pixel de cada una de las variables, de una forma más exacta. Aun no habiéndose obtenido los resultados esperados, se confía que en futuros estudios, tomando las medidas de mejora oportunas la técnica de buen resultado ya que este ha supuesto el inicio de una técnica con gran potencial para la evaluación del riego

### 5.2.5. Análisis de temperatura con pluviometría alta y pluviometría baja.

Si bien no se obtienen resultados de fiabilidad en los tres casos anteriores sobre la relación entre la temperatura y la pluviometría, sí se observa una respuesta sobre la temperatura con el tiempo de riego. En la siguiente gráfica, realizada sobre la parcela Rotonda, se muestra esta evolución para un punto con pluviometría alta y otro con pluviometría baja. Se puede observar como existe una clara tendencia, por otro lado esperable, entre tiempo y temperatura, puesto que tanto el  $R^2$  de la polinómica de baja pluviometría como la de alta pluviometría, son cercanos a la unidad.

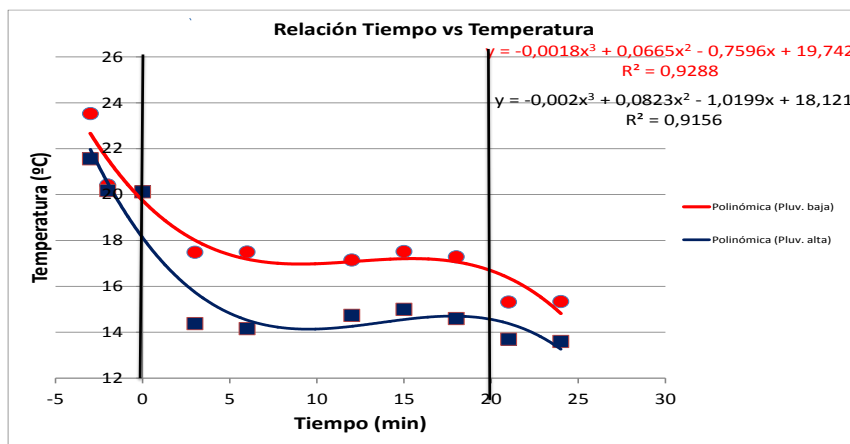


Figura 28: Relación Temperatura tiempo en zona de baja pluviometría (rojo) y alta pluviometría (azul).

Otro rasgo distintivo entre ambas curvas, es la velocidad con la que disminuye la temperatura. Se observa en el gráfico como en la zona con pluviometría más baja, la velocidad de descenso de la temperatura es mucho menor que en el caso de la zona con pluviometría alta, donde la pendiente de la ecuación entre el minuto 0 y 5 de riego es mucho más acusada.

### 5.2.6. Resultados obtenidos de índices de uniformidad de temperaturas.

A continuación se aportan los resultados obtenidos de los CUT y DUT al finalizar el riego. Estos valores son altos, por lo cual, la temperatura al final el riego es bastante uniforme en toda la parcela. En estos momentos no se puede decir si estos valores corresponden a uniformidades aceptables o no, dado que no hay bibliografía que lo ratifique. De todos modos, se espera que para posteriores estudios, ayuden en la obtención de un modelo para la relación de temperatura y pluviometría.

Parcela	CUT (%)	DUT (%)
Nexus	86	85
Rotonda	90	90
Pradera Central	87	89

Figura 29: Valores obtenidos de coeficiente de uniformidad de temperaturas.

### 5.3. DETECCIÓN DE FUGAS MEDIANTE EL USO DE TERMOGRAFÍA.

Como ya se explicó en Material y Métodos, se pretendía detectar, mediante una simulación, fugas en riego localizado bajo malla con arbustos diseminados y en parcelas con alta densidad con lateral descubierto. Las siguientes imágenes corresponden a los momentos “pre-fuga” y “post-fuga” respectivamente del jardín con arbustos diseminados. Nótese que la escala varía entre 24 °C y 64 °C.

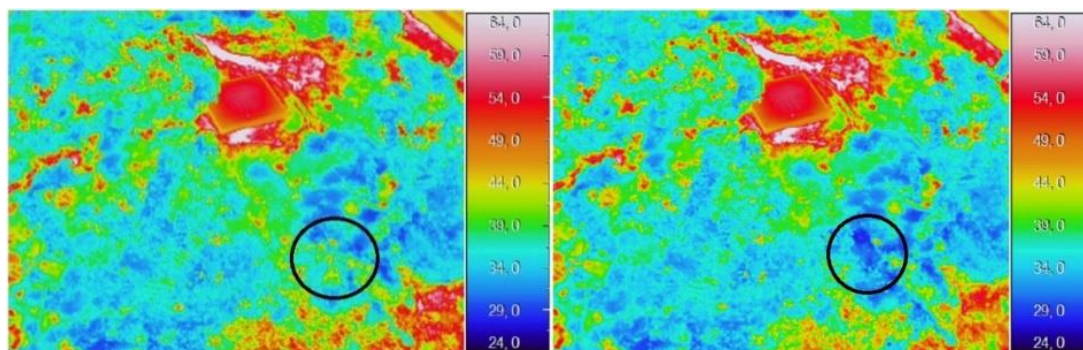


Figura 30: Momentos pre (izquierda) y post (derecha) fuga en parcela con baja densidad de vegetación.

En este primer caso donde la malla queda al descubierto, sí se observan evidencias del cambio de temperatura que sufre la superficie debido a la fuga. El agua de la fuga filtra hacia la superficie de la malla por capilaridad, de este modo, la superficie comienza a enfriarse observándose un área húmeda que se ve con claridad en la imagen.

Esta metodología podría ser válida para detectar fugas en laterales bajo malla. También decir, que en el caso de que el ensayo se llevara a cabo con el riego accionado, el bulbo formado por la fuga sería más grande que los formados por los goteros. Las siguientes dos imágenes describen el mismo ensayo pero esta vez en el jardín con alta densidad de arbusto bajo. Nótese que la escala varía entre 24 °C y 40 °C.

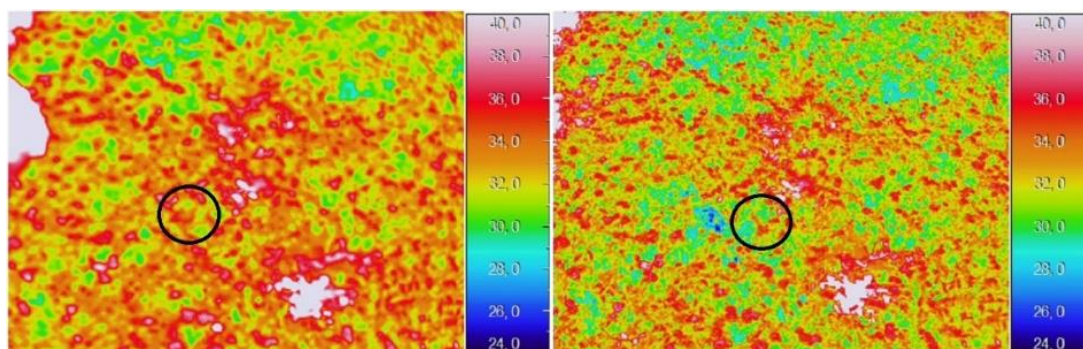


Figura 31: Momentos pre (izquierda) y post (derecha) fuga en parcela con alta densidad de vegetación.

En este caso en el que la densidad de vegetación del jardín no permite ver el suelo, no se aprecian evidencias de que se pueda detectar con una imagen térmica la fuga en el lateral. Esto seguramente sea debido a que la cámara recibe la radiación infrarroja emitida por las hojas de los arbustos y no puede recibir la del suelo, lugar donde se encuentra el lateral, que se está por debajo del manto vegetal.

## 6. CONCLUSIONES.

Con todo lo expuesto anteriormente se pretende responder a los objetivos planteados para este Trabajo Final de Grado. A continuación, se detallará la respuesta a cada uno de ellos y las conclusiones que se extraen de los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Se ha evaluado la uniformidad de riego en tres parcelas del Jardín del Campus de Vera de la UPV, seleccionadas por tratarse de casos con problemas detectables visualmente. Los índices de evaluación utilizados han sido el Coeficiente de Uniformidad (CU) y la Uniformidad de Distribución (UD)

Tanto el CU como la UD obtenidos en las tres parcelas han revelado que la uniformidad de riego no es la adecuada, pudiéndose calificar en las tres parcelas como mala o deficiente. Este hecho determina un importante margen para el ahorro de agua si se mejora la uniformidad.

Se han obtenido para cada parcela, mapas de pluviometría por interpolación de los datos de campo obtenidos, pudiéndose determinar de forma visual aquellos puntos con pluviometría excesivamente alta o insuficiente.

Existen deficiencias en el riego de los jardines, que condicionan la uniformidad y que pueden ser fácilmente subsanables, como la ubicación de aspersores frente a obstáculos o la mala selección de boquillas o sectorización del choro.

Han sido realizada una secuencia termográfica completa de la superficie de las parcelas durante el riego, comprobándose como se produce un cambio térmico significativo conforme avanza el riego. Se constatan descensos térmicos de más de 10 grados para los ensayos realizados como se puede ver en el coteo fotográfico completo en Anejos 2.

Tras el tratamiento y georreferenciación de las imágenes térmicas y su comparación con el mapa de pluviometría de cada parcela, no se ha obtenido ninguna relación válida y estadísticamente significativa que ligue temperatura (o diferencia térmica) y pluviometría.

Se ha constatado que sí existe una respuesta diferente a la variación térmica en aquellas zonas de una parcela donde la precipitación es alta frente a aquellas otras donde la precipitación es inferior.

La termografía no es aún una técnica que se pueda utilizar de forma complementaria a los ensayos clásicos para determinar la pluviometría y la uniformidad de riego en una parcela. Existen diversos aspectos que deben ser estudiados y mejorados, algunos de ellos se detallan en el siguiente punto. La existencia de charcos y escorrentía también interfiere en la correlación buscada.

La termografía es una técnica que puede ser empleada para detectar fugas en riego localizado en jardinería. Al igual que para la uniformidad, debe perfeccionarse y acotar los casos de validez. Sin embargo se han obtenido resultados prometedores para fugas simuladas en parcelas con baja densidad de vegetación y tuberías de riego bajo malla. Los resultados preliminares en parcelas de alta densidad de vegetación no han sido concluyentes.

## 6.1 PROPUESTAS DE MEJORA.

En vista a los resultados obtenidos en los ensayos se pretende hacer una propuesta de mejora con el fin de, en futuros estudios, y dado que si hay ciertas evidencias que hacen creer en la técnica utilizada, lograr resultados mejores y más fiables.

Respecto a la interpolación realizada por el método IDW decir que se podría intentar ajustar más los valores intermedios variando el número de puntos que el software toma para realizar la interpolación obteniéndose así resultados más precisos.

En el apartado de la termografía, existen diferentes aspectos a mejorar. El factor crítico es la toma de imágenes; lo deseable en este caso sería la toma de imágenes con una visual totalmente perpendicular al suelo y sin necesidad de adaptar, deformando, las imágenes posteriormente. En este sentido sería muy oportuno el empleo de un dron adaptado con cámara térmica. Por otro lado, el dron permite obtener coordenadas de los puntos de la imagen mediante GPS, lo que ayudaría a la referenciación de las éstas. Se eliminaría la elevada incertidumbre asociada a la referenciación "manual".

Como alternativa al empleo de drones, sería interesante la búsqueda o desarrollo de software de tratamiento de imágenes térmicas que permitiese la adaptación y georreferenciación exacta de la imagen tomada con cámara térmica de mano.

Si los aspectos anteriores se cumplieran, el análisis estadístico final se realizaría pixel a pixel exactamente, ya que se solaparían mediante coordenadas los valores de pluviometría y de temperatura obtenidos en cada uno de los puntos.

En próximos estudios cabe considerar el empleo de otras variables en los estudios estadísticos, asociadas a la uniformidad de riego para explicar la temperatura o diferencia térmica. Algunas variables consideradas podrían ser: temperatura ambiente, pendiente de la parcela, microtopografía, profundidad del suelo, tipo de suelo, tipo y homogeneidad del césped, altura del césped, etc.

Respecto al ensayo que se realizó para detectar fugas en riego localizado bajo malla, los resultados obtenidos son bastante buenos para ser una simulación. Aun siendo así, una técnica de mejora sería la toma con el riego accionado al suelo con el fin de observar si el bulbo provocado por la fuga se distingue con claridad de los provocados por los propios emisores. Esta técnica de detección de fugas sería útil en el caso de funcionar ya que se podrían detectar fugas en parcelas grandes donde en numerosas ocasiones existen y al estar enterrados no se detectan. Con ello se detectarían las fugas exactamente en su localización sin necesidades de levantar la malla.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Arviza, J. (1996) *Riego localizado*. Servicio de Publicaciones UPV.
- Ballester, C., Castel, J., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S., Jiménez-Bello, M.A. (2013): *Thermography measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees. Agricultural water management, 122, 1-6.*
- Ballester, C. Jiménez-Bello, M.A., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S. (2013). *Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. Agricultural and Forest Meteorology, 168, 120-129.*
- Burrough, P.A., McDonnell. (1998). *Principles of geographical information systems. Oxford University Press. 333 p.*
- Calleja Lapeña, F. (2015): *Evaluación de instalaciones de riego por aspersión en parcela y propuestas de mejora en el jardín del Campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia (Valencia).*
- Centro nacional de tecnología de regadíos (Madrid). *Experiencia de ensayos en el laboratorio.*
- Chambouleyron J., Rearte E., Mármol P., Salatino S., Maffei J., Del Toro S., y Castellanos S. (1998). *Desempeño del riego presurizado en la evolución de la salinidad y los nemátodos del suelo. XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur, Tomo 3, pp. 287-289. Santa Fe, Argentina.*
- Christiansen, J. E. (1942): *Irrigation by sprinkling*. Univ. Calif. Agr. Exp. Sta. Bull. 670.
- Cohen, Y., Alchantis, V., Meron, M., Saranga, Y., Tsipris, J. (2005). *Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. J. Exp. Bot. 56, 1843 – 1852.*
- Costello, L. R. and Jones, K. S. (2000). *Water use classification of landscape species. A guide to the water needs of landscape plants*. California Department of Water Resources. University of California Cooperative Extension. 150 pp.
- Dastane, N.G. (1974). *Effective rainfall in irrigated agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 25. Rome. 62 pp.
- Dechmi, F., Playán Jubillar, E., Caverro Campo, J., Martínez-Cob, A., & Faci González, J. M. (2001). *Evaluación del riego por aspersión en cobertura total en una parcela de maíz.*
- Documentación asignatura Ingeniería Del Riego, (2014).
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1986). *Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje no 24. FAO. Roma.*
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1975). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Estudio de Riego y Drenaje No. 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 179 pp.
- Dukes MD, Haley MB, Hanks SA (2006) *Sprinkler irrigation and soil moisture uniformity. Paper presented at the 27th annual international irrigation show, San Antonio, TX, pp 446–460.*
- Esteras, F. J., Sanchis, E. (2012) *Campus Botànic UPV. Vera. Universidad Politécnica de Valencia.*

Fontela C., J. Morábito, J. Maffei, S. Salatino, C. Mirábito y L. Mastrantonio: *Desempeño del riego por goteo en Mendoza. Análisis de los coeficientes de uniformidad y de la salinidad del suelo.*

Faci, J., Bercero, A. (1991): *Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión.* Investigación agraria. Producción y protección vegetales – INIA (España).

García - Tejero, I. F., Costa, J. M., Lima, R. S. N., Zuazo, V. H. D., Fernández, J. L. M., & Chaves, M. M. (2014). *Aplicaciones de la termografía de infrarrojos en la agricultura moderna.* Vida rural, (376), 60-66.

Gómez de Barreda Ferraz, D. y Bellón Echeverría, J. (2015): *Calculo de la uniformidad de riego en la zona del green de un campo de golf.* XXXIII Congreso Nacional de Riego. UPV.

Gotway, C.A., Ferguson, R.B., Hergert, G.W., Peterson, T.A. (1996). *Comparison of Kriging and Inverse Distance Methods for mapping soil parameters.* *Soil Science Society of American Journal* 60:1237-1247.

Jensen, M.E. (1967): *Evaluating irrigation efficiency.* American Society of Civil Engineering. Eng Proc. 93: 83-99.

Jensen, M.E.; Burman, R.D. and Allen, R.G. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements.* ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, American Society of Civil Engineers. New York, Estados Unidos de América. 360 pp.

Jiménez-Bello, M. A., Ballester, C., Castel, J. R., & Intrigliolo, D. S. (2011). *Development and validation of an automatic thermal imaging process for assessing plant water status.* *Agricultural Water Management*, 98(10), 1497-1504.

Jiménez-Bello M.A., Royuela A., Manzano, J., Zarco-Tejada P.J., Intrigliolo D. S. (2013): *Assessment of drip irrigation subunits using airborne thermal imagery acquired with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV).* In Precision agriculture'13 (pp. 705-711). Wageningen Academic Publishers.

Jones, H.G., Stoll, M. Santos, T. de Sousa, C. Chaves, M.M., Grant, O.M. (2002). *Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine.* *J. Exp. Bot* 53, 2249 – 2260.

Jonhston, K., Verhoef, J.M., Krivoruchkok., Lucas, N. (2001). *Using ArcGis Geostatistical Analyst.* ESRI. 300 p.

Keller J, Bliesner RB, (1990): *Sprinkler and Trickle Irrigation.* Chapman & Hall, New York, 625.

Keller, J. y Karmeli, D. (1974). *Trickle irrigation design.* Rainbird Sprinkler Manufacturing Corporation. Glendora, CA. Glendor Calfi, 91740, 24-26.

Kincaid, C; Schilling, J G; Gable, C. (1996). *The dynamics of off-axis plume-ridge interaction in the uppermost mantle: Earth Planet. Sci. Lett.,* 137, 29-43.

Leinonen, I., Jones, H.G. (2004). *Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress.* *Journal of Experimental Botany*, 55(401), 1423-1431.



- Martínez – Cob, A., Zapata Ruiz, N., Sánchez Marcos, I. (2010): *Viento y riego: la variabilidad del viento en Aragón y su influencia en el riego por aspersión*. Institución Fernando el Católico.
- Martínez Gimeno, M.A., Manzano, J., Balbastre Peralta, I., Garcia-Serra, J. (2013). *Evaluación hídrica y energética en jardinería. Aplicación a los Jardines de la UPV. III Jornadas de Ingeniería del Agua. Valencia*.
- Mateos, L. (1998). *Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems*. Irrigation Science, 18(2), 73-81.
- Mateos, L.; Orgaz, F.; Villalobos, Francisco J.; Ferreres, E. (2009). *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola*. 2ª edición, Ediciones Mundi Prensa.
- Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Farm irrigation system evaluation: a guide for management.
- Merlot, S., Mustilli, A.C., Genty, B., North, H., Lefebvre, V., Sotta, B., Vavasseur, A., Giraudat, J., (2002). *Use of infrared thermal imaging to isolate Arabidopsis mutants defective in stomatal regulation*. Plant J. 30, 601 – 609.
- Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M. and Cohen, S. (2006). *Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine*. Journal of experimental botany, 58(4), 827-838.
- Montalvo López, T. (2007). *Riego localizado. Diseño de instalaciones*. Servicio de publicaciones UPV.
- Montero, J. (2000): *Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS)*. Colección Tesis Doctorales Nº103. Ediciones Universidad de Castilla La Mancha, España.
- Noguera García, V. (2005). *Fitotecnia general*. Servicio de Publicaciones UPV.
- Pascual España. B. (2008). *Riegos de gravedad y a presión*. Servicio de Publicaciones UPV.
- Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia. Goteo Microaspersión y exudación*. Ediciones Mundi Prensa.
- Pintado, M.J. 2001. *Problemática de los jardines de bajo consumo de agua en las grandes urbes. Jornadas internacionales de Xerojardinería mediterránea*. Madrid.
- Seginer, I., Nir, D., & Bernuth, R. V. (1991). *Simulation of wind-distorted sprinkler patterns*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(2), 285-306.
- Tarjuelo. J. M. (1995). *El riego por aspersión y su tecnología*. Servicio de Publicaciones UPV.
- Tarjuelo, J.M. (1994). *Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento*. Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales. 9 (2) 255-272.
- Tarjuelo, J.M., Valiente, M., Lozoya, J. (1992) Working condition of sprinkler to optimize application of water. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 118(6):895–913

Valín, M.I, Castro, R; Pedras C. y Pereira L. (2011): *Uso del agua en espacios verdes: Cálculo y evaluación de estrategias de riego*. VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua.(Fevereiro, 2011, Talavera de la Reina, Espanha).

Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F. (2008): *Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la evaluación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo*. Agronomía Costarricense 32(1): 95-105. ISSN: 0377-9424 / 2008

#### **Direcciones Web**

ArcGis Resources: Manual ArcGis 10.1: (25/05/2015).

<http://resources.arcgis.com/en/home/>

Agència Catalana de l'Aigua: (09/06/2015).

<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/>

Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural. Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha: (09/06/2015).

<http://www.revistamedioambienteiccm.es/articulo.php?id=16&idn=29>