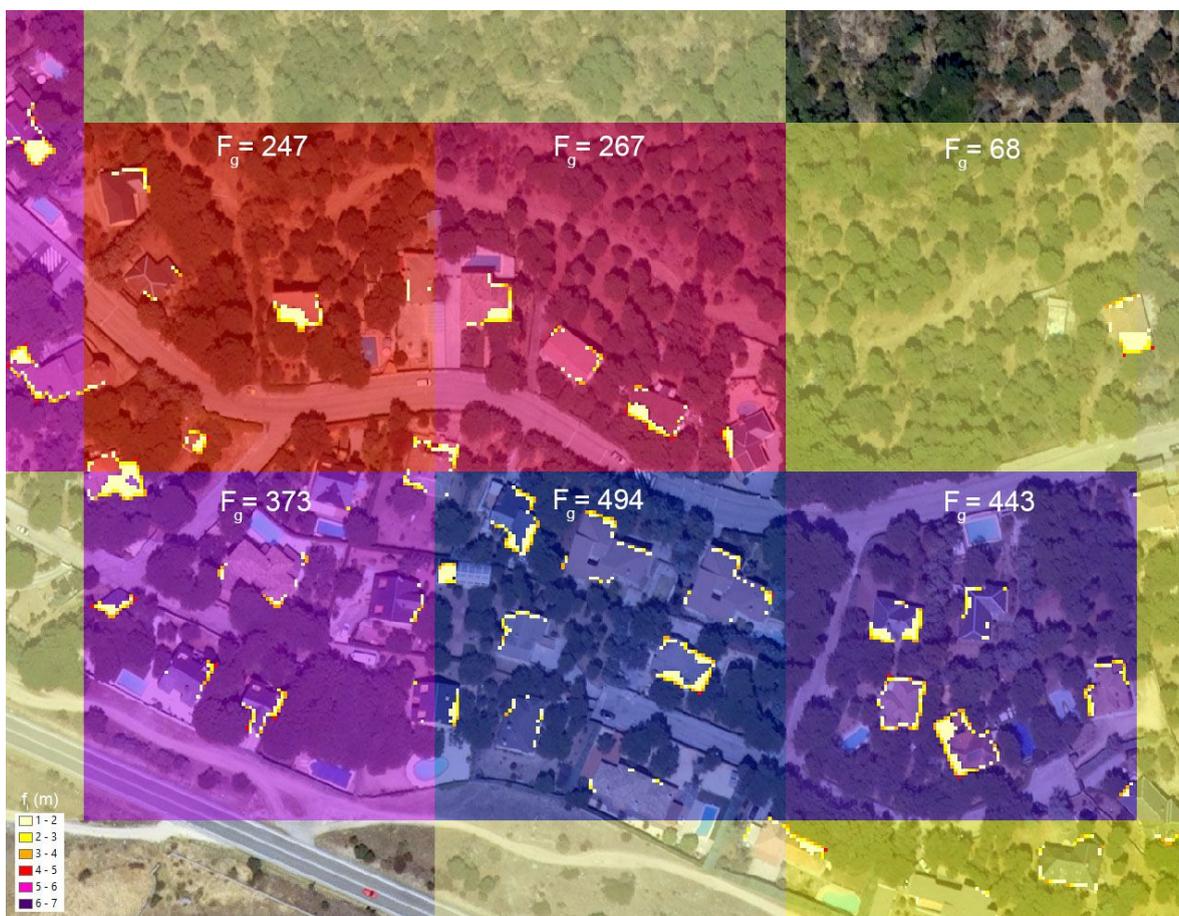


# Utilización, interpretación y limitaciones del índice de interfaz WUIX

David Caballero



Agosto 2019

# Utilización, interpretación y limitaciones del índice de interfaz WUIX<sup>1</sup>

David Caballero

## Introducción

El índice *WUIX* (de Wildland-Urban Interface indeX) tiene su origen en la idea propuesta en el proyecto WARM<sup>2</sup> (Caballero et al., 2003) de poder discriminar el territorio en función de dos aspectos del paisaje que están directamente relacionados con la exposición de las edificaciones al peligro de incendio en la interfaz urbano-forestal: la continuidad de la vegetación y la fricción de la misma con las viviendas. El desarrollo de la primera versión del índice se completó en enero de 2013 para su aplicación al estudio de vulnerabilidad frente a incendios forestales de la Comunidad de Madrid.

El índice *WUIX* tiene un carácter meramente topológico, es decir, de análisis de la posición relativa y relación entre objetos en el territorio (en este caso vegetación y edificios) en dos dimensiones y, dado que no se realizan cálculos del comportamiento del fuego, no se incorpora ni la topografía ni el viento. Tampoco se considera la carga y otros parámetros propios de los modelos de combustible.

## Algoritmo básico de análisis

Ambos componentes, la continuidad y la fricción, se estiman aplicando un autómata celular de cálculo, que opera sobre una malla de celdas cuadradas de paso fino, de resolución  $R_f$  (en m) y refiere los cálculos a una malla de celdas de paso grueso, cuya resolución  $R_g$  (en m) es múltiplo de la anterior. Este múltiplo se refiere en este documento como  $N$ , el número de celdas de paso fino en cada lado del paso grueso, con lo que

$$R_g = R_f \cdot N$$

El mecanismo de cálculo de continuidad es sencillo. Para cada celda de la malla fina que es vegetación, se computa el valor 1 si las celdas vecinas al N,E,S y W tienen vegetación. Se computa el valor 0,5 si las celdas vecinas en las esquinas NE, SE, SW y NW tienen vegetación. El valor obtenido  $c_i$  es la continuidad unitaria de la celda (no tiene en cuenta la resolución  $R_f$ ), y el valor máximo que se puede obtener es 6. Se repite el cálculo para todas las celdas de la malla de paso fino que caen dentro de cada celda de la malla de paso grueso, se suma el resultado, se multiplica por la resolución  $R_f$  y se asocia a dicha celda de paso grueso  $C_g$ :

$$C_g = R_f \cdot \sum_{i=1}^{N^2} c_i$$

---

<sup>1</sup> Caballero, D. (2019). *Utilización, interpretación y limitaciones del índice de interfaz WUIX*. Publicación propia. Serie: Cuadernos Técnicos. Madrid, agosto.

<sup>2</sup> Wildland-Urban Area Fire Risk Management, EVG1-CT-2001-00044.

Para el cálculo de la fricción de las viviendas con la vegetación se procede de manera parecida. En este caso, a partir de las celdas que son edificación, el autómata añade 1 para las celdas vecinas N,E,S y W que son vegetación y 0,5 para las celdas que forman esquina convexa del edificio siempre que las celdas de alrededor sean vegetación. El algoritmo también añade 1 para cada celda edificio que está cubierta por vegetación (ver apartado siguiente). El resultado obtenido  $f_i$  es la fricción unitaria y su valor máximo es 7. Igual que en el caso anterior, se repite el proceso para todas las celdas de paso fino dentro de cada celda de paso grueso, se suman y se multiplica por la resolución  $R_f$ , asignando el resultado  $F_g$  a la celda de paso grueso:

$$F_g = R_f \cdot \sum_{i=1}^{N^2} f_i$$

Finalmente, el valor de  $WUIX$ , que se expresa en  $m^2$ , se obtiene multiplicando<sup>3</sup> los valores totales de fricción y continuidad encontrados en cada celda de paso grueso:

$$W_g = C_g \cdot F_g$$

Dado que las esquinas no tienen dimensión en un espacio plano, es necesario acudir a un artificio que les asocie una longitud. Para ello se considera una línea perimetral (*buffer*) exterior y paralela a cada celda de la malla fina, situada a una distancia igual a un tercio de la resolución  $R_f$ . De esta manera, y con centro en cada esquina convexa, se traza y asocia un cuarto de circunferencia, cuya longitud para el valor unitario ( $R_f=1$ ) sería:

$$P_4 = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{3} = \pi / 6 = 0,52 \approx 0,5$$

Así pues, la longitud total máxima unitaria de esa línea perimetral de contacto sumará cuatro enteros para los lados y cuatro mitades para las esquinas:

$$P = 4 \cdot 1 + 4 \cdot 0,5 = 6$$

Esta aproximación de enteros y mitades simplifica mucho el procedimiento de cálculo y, además, permite una interpretación física (metros de continuidad o de fricción) que se aprovecha en la cuantificación y utilización del índice y sus componentes.

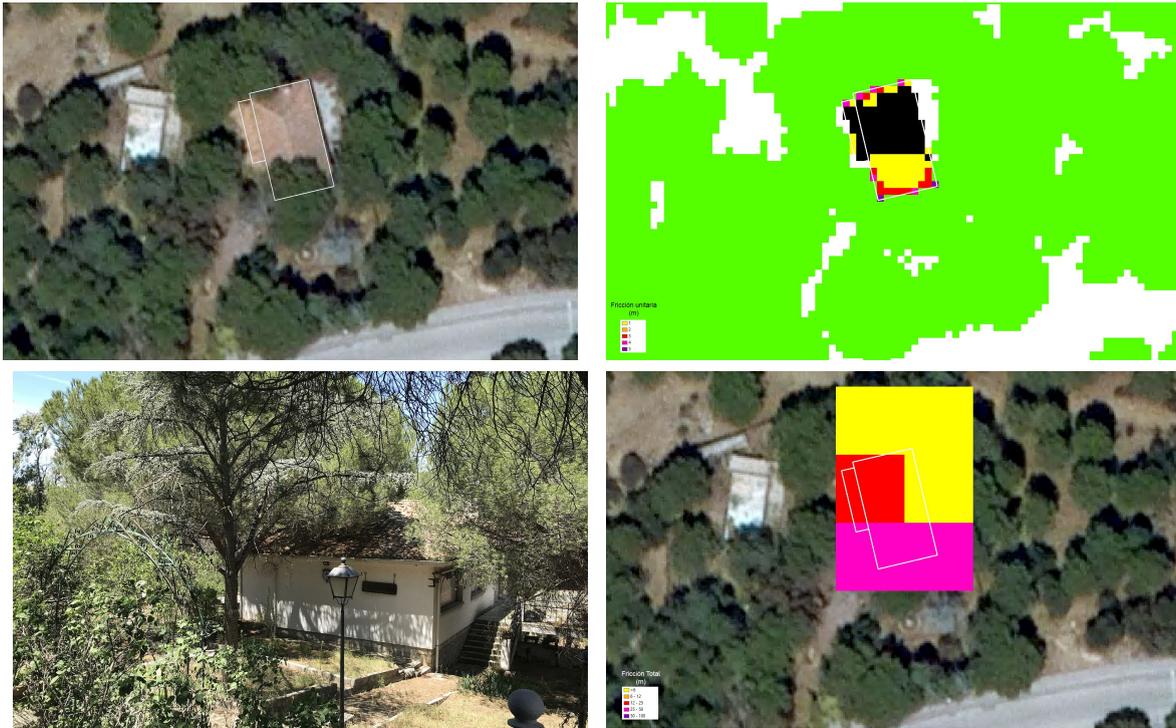
### **Solape casa-vegetación**

Es frecuente observar en nuestras interfaces que parte o la totalidad de las edificaciones queda cubierta por el dosel arbóreo. En estos casos cada celda tiene, consecuentemente, carácter simultáneo de vivienda y de vegetación. El índice  $WUIX$  no realiza análisis comparativos *per se* en el eje vertical Z (por ejemplo la distancia de la base de las copas a la cubierta del edificio) y asume que en estos casos de solape siempre hay fricción vertical.

---

<sup>3</sup> Ver «Aplicación y discusión del índice WUIX para la caracterización del riesgo por incendio en las tipologías de interfaz urbano-forestal» por Sergio Pascual Simón. Revista Montes Nº 125 año 2016.

Aunque hay otras alternativas para considerar el efecto de este solape<sup>4</sup>, para el desarrollo de los apartados siguientes, y en particular para el cálculo de valores máximos, el algoritmo de cálculo añade por tanto 1 a la fricción unitaria en los casos de vegetación por encima de las viviendas. Consecuentemente, el cómputo final añadirá  $R_f$  metros de fricción por cada celda de solape.



Esta vivienda en la urbanización Puentelasierra (Madrid) presenta solape de la copa de los pinos con el tejado, que están en fricción directa. El algoritmo WUIX añade estos puntos de fricción unitaria en la malla fina de 1 m (arriba a la derecha) al cómputo total en la malla gruesa de 10 m (abajo a la derecha).

Hay que señalar que, aunque el cálculo da resultados aceptables, esta solución no es conceptualmente consistente, ya que se mezcla el análisis de longitudes (fricción, continuidad) con superficies (área del edificio cubierta por vegetación); no obstante se aplica el mismo principio que para el cálculo de fricciones que, en esencia, también tiene lugar sobre superficies (fachadas), eliminando dos de las dimensiones del elemento volumétrico o *voxel*<sup>5</sup> (cada *voxel* enfrentado a una fachada no tiene en cuenta la dimensión vertical ni la profundidad del mismo, solo la longitud de contacto). Esta es otra de las limitaciones a la hora de utilizar algoritmos bidimensionales sobre un fenómeno de naturaleza claramente tridimensional.

La cobertura de los tejados de las viviendas por copas de árboles tiene también un efecto mayorador en el cómputo de la continuidad de la vegetación, ya que considera que las edificaciones no suponen una discontinuidad en el estrato de vegetación. Esta hipótesis no

<sup>4</sup> El programa WUIX2 permite resolver estos solapes de otras dos maneras alternativas a petición del usuario con el modificador /OV: o bien dando prioridad a la edificación (donde hay vivienda se asume que no hay vegetación) o bien dando prioridad a la vegetación (donde hay vegetación no hay vivienda). En ambos casos sólo se tiene en cuenta la fricción de las celdas-vivienda que son adyacentes a la vegetación pero que no están cubiertas por la misma. Por defecto el cálculo del índice WUIX asume que el solape siempre implica una fricción vertical.

<sup>5</sup> El término *voxel* es un acrónimo usado en computación gráfica que proviene de las palabras *volumetric pixel* o elemento cúbico unitario indivisible que compone un objeto tridimensional. Aquí equivale a una celda ráster en tres dimensiones.

es del todo correcta, ya que puede haber continuidad horizontal (por ejemplo por las copas) pero no vertical (por ejemplo, árboles muy podados y con las copas separadas del sotobosque), o que exista continuidad por las copas pero no por el sotobosque (por ejemplo, el efecto disruptor de los viarios). Para estos casos se recomienda aplicar técnicas de apilado o *stacking* (acoplamiento del análisis de continuidad y de fricción para varios estratos de vegetación), como se explica más adelante. Por defecto, el algoritmo asume que todos los estratos están conectados verticalmente en las situaciones de solape.

### Valores máximos y normalización

Como se puede comprobar, los valores máximos y mínimos tanto de continuidad como de fricción dependen de la combinación de resoluciones de paso fino y paso grueso, en particular del número de celdas de paso fino  $N$  que se consideran dentro de cada celda de paso grueso. Con el fin de establecer unos valores máximos estándar, que se utilizan después para la normalización de los índices y en la definición de los rangos de cada magnitud calculada, se toma como referencia una trama de interfaz idealizada, correspondiente a un patrón en damero (alternando celdas-vegetación con celdas-vivienda), de un metro de lado y completamente cubierto por las copas de los árboles. Esta situación refleja teóricamente la peor combinación posible de continuidad y fricción en una interfaz.

Para este patrón, es sencillo deducir que el máximo valor para la continuidad  $C_x$  en cada celda de la malla gruesa será:

$$C_x = 6 \cdot N^2$$

El valor  $N^2$  es además el área de la celda de la malla gruesa para este damero de celdas unitarias de 1 m. El número de celdas-vivienda del damero, o número de «celdas negras»  $N_N$ , que se utiliza para el cálculo de la fricción, se obtiene mediante las expresiones:

Para el caso N par:  $N_N = N^2 / 2$

Para el caso N impar:  $N_N = (N^2 + 1) / 2$

Con estos valores, es fácil deducir el máximo valor de fricción  $F_x$ , que para el patrón en damero de 1 m será:

$$F_x = 5 \cdot N_N$$

Con estas consideraciones, el valor máximo que se puede obtener del índice WUIX (en m<sup>2</sup>) es, precisamente, la multiplicación de ambos valores máximos, es decir:

$$W_x = C_x \cdot F_x$$

Para el caso N par:  $W_x = 15 \cdot N^4$

Para el caso N impar:  $W_x = 15 \cdot (N^4 + N^2)$

Estos valores máximos permiten obtener cálculos normalizados de WUIX en el rango 0 a 100 (adimensional) mediante la expresión:

$$W_n = 100 \cdot W_g / W_x$$

con lo que el resultado será comparable cualquiera que sea el valor de  $N$  utilizado en el análisis<sup>6</sup>. Lo mismo es aplicable a los cálculos de continuidad y fricción (adimensional):

$$C_n = 100 \cdot C_g / C_x$$

$$F_n = 100 \cdot F_g / F_x$$

### La influencia de la resolución y la escala

El índice *WUIX* está diseñado para discriminar zonas de fricción de vegetación con viviendas en una urbanización. Por tanto su uso se refiere al análisis de la mesoescala<sup>7</sup>, tanto sea perimetral como interior. Estos análisis típicamente se refieren a una región de unos cuantos cientos de metros —por ejemplo, áreas de 1 a 4 km<sup>2</sup>— correspondientes a la zona edificada a estudiar. La aplicación permite, no obstante, introducir cualquier tamaño de región de análisis, con lo que en teoría se puede utilizar para el análisis del paisaje (macroescala) o incluso de una sola parcela (microescala).

Pero es necesario considerar el carácter topológico del autómata de análisis del índice *WUIX*, que se realiza sobre celdas cuadradas de un tamaño fijo (resolución de la malla fina  $R_f$ ). Dado que para este autómata el término «contacto» significa «celda contigua», los cálculos de la continuidad de la vegetación (celdas que son vegetación y tienen celdas vecinas que también son vegetación) y de la fricción (celdas que son vegetación y tienen celdas vecinas que son edificio), y por tanto del índice *WUIX*, tendrán resultados diferentes en función de la resolución seleccionada para la malla fina ( $R_f$ ).

Efectivamente, el autómata de cálculo sólo computa el contacto entre dos puntos cuando la distancia entre ellos es menor a dicha resolución  $R_f$ , lo cual condiciona los resultados y el tiempo invertido en el análisis. Cuando la resolución es alta —por ejemplo  $R_f$  igual o menor a 2 m— trae como consecuencia que el cómputo de la continuidad y de la fricción es muy restrictivo, dando resultados generalmente minorados. Además, para regiones de análisis de cierta extensión, el tiempo de cálculo puede ser bastante alto.

---

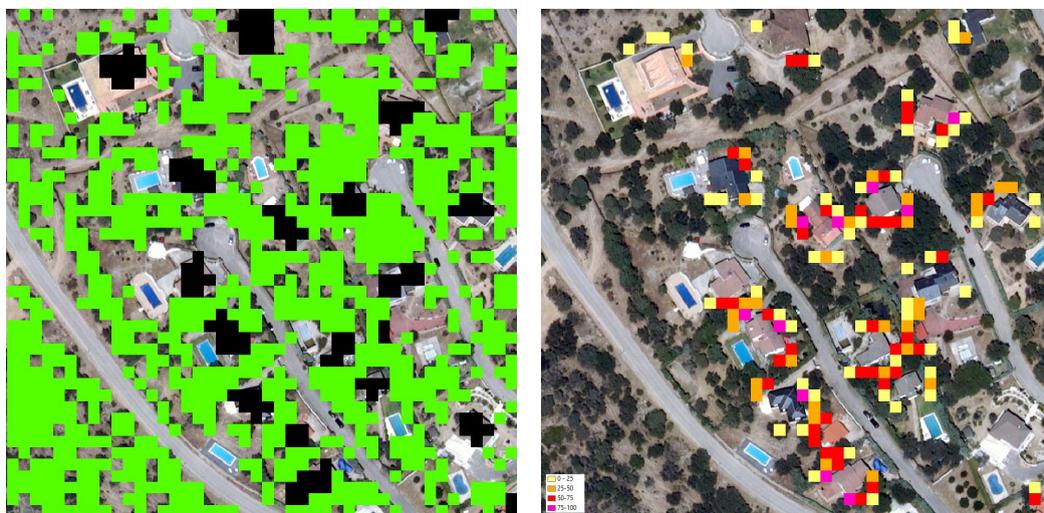
<sup>6</sup> Para normalizar los cálculos del índice *WUIX* realizados con versiones anteriores, el valor total obtenido se debe dividir por el máximo correspondiente al  $N$  y  $R_f$  utilizados en el cálculo (ver tabla en Anexo 2) y multiplicar el resultado por 100.

<sup>7</sup> La mesoescala es el ámbito espacial y escala de análisis referida a una urbanización, población o área de diseminado. La escala de trabajo de referencia para la mesoescala es de 1:10.000 a 1:5.000. En una urbanización se diferencian la mesoescala **exterior**, que son los terrenos circundantes, la mesoescala **perimetral**, que es el contorno inmediato al límite de la urbanización y el primer anillo de parcelas, y la mesoescala **interior**, que es el tejido mixto urbano-vegetación conformado por las parcelas, las viviendas y los viarios.



*Ejemplo de un análisis realizado en una mesoescala a resolución  $R$ , de 1 m. La vegetación (verde) y las viviendas (negro) entran en contacto en muy pocos puntos (izquierda), y esto se refleja en el cómputo de la fricción y la continuidad en la malla fina (derecha), y que generalmente resulta en una minoración del índice WUIX en la malla gruesa. No obstante, si los mapas son suficientemente precisos, los resultados son los más realistas.*

Por el contrario, resoluciones bajas (celdas grandes) no discriminan los espacios y las distancias existentes entre puntos con vegetación y entre viviendas y vegetación. Como resultado se generan algunos puntos de contacto que no existen, dando cómputos de fricción, continuidad y WUIX generalmente mayorados. Además, resoluciones gruesas pueden generar interpretaciones de las edificaciones muy diferentes de la realidad, creando artefactos e inconsistencias que desvirtúan la naturaleza del índice WUIX.



*El mismo análisis realizado ahora con una resolución  $R$ , de 5 m. Se aprecia que aparecen puntos de contacto (izquierda) donde en realidad no existen y que tienen efecto en el cálculo de la continuidad y fricción en la malla fina (derecha), dando un resultado del índice WUIX en la malla gruesa que por lo general es mayorado. Se observa que, a esta resolución, tanto la interpretación de las manchas de vegetación como del contorno de las viviendas quedan muy desdibujados de la realidad.*

La experiencia en el uso del índice WUIX en el análisis de la mesoescala (urbanizaciones) indica que una resolución de 2 m es un buen compromiso entre la identificación de puntos de contacto y la discriminación de discontinuidades, con lo que se recomienda tomarla

como referencia. Los análisis a 1 m de resolución requieren mapas muy precisos para obtener resultados realistas, pero si se cuenta con ellos son preferibles a los de 2 m.



Realizando el análisis con una resolución  $R_f$  de 2 m, un buen compromiso entre la discriminación de espacios y el cómputo de contacto, tanto la interpretación de las manchas de vegetación como de los edificios (izquierda), así como los resultados en la malla fina (derecha), se ajustan más a la realidad. Para esta resolución el cómputo del índice WUIX en la malla gruesa con  $N=3$  es el que mejor discrimina las situaciones de interfaz.

## La influencia de N

Como se ha mencionado, el algoritmo de cálculo estima el índice WUIX en cada celda de la malla gruesa a partir de la agregación de los valores de continuidad ( $c_i$ ) y de fricción ( $f_i$ ) unitarias para todas las celdas de malla fina (de resolución  $R_f$ ) que contiene (que son  $N^2$ ), mediante la expresión:

$$W_g = R_f \cdot \sum_{i=1}^{N^2} c_i \cdot R_f \cdot \sum_{i=1}^{N^2} f_i = C_g \cdot F_g$$

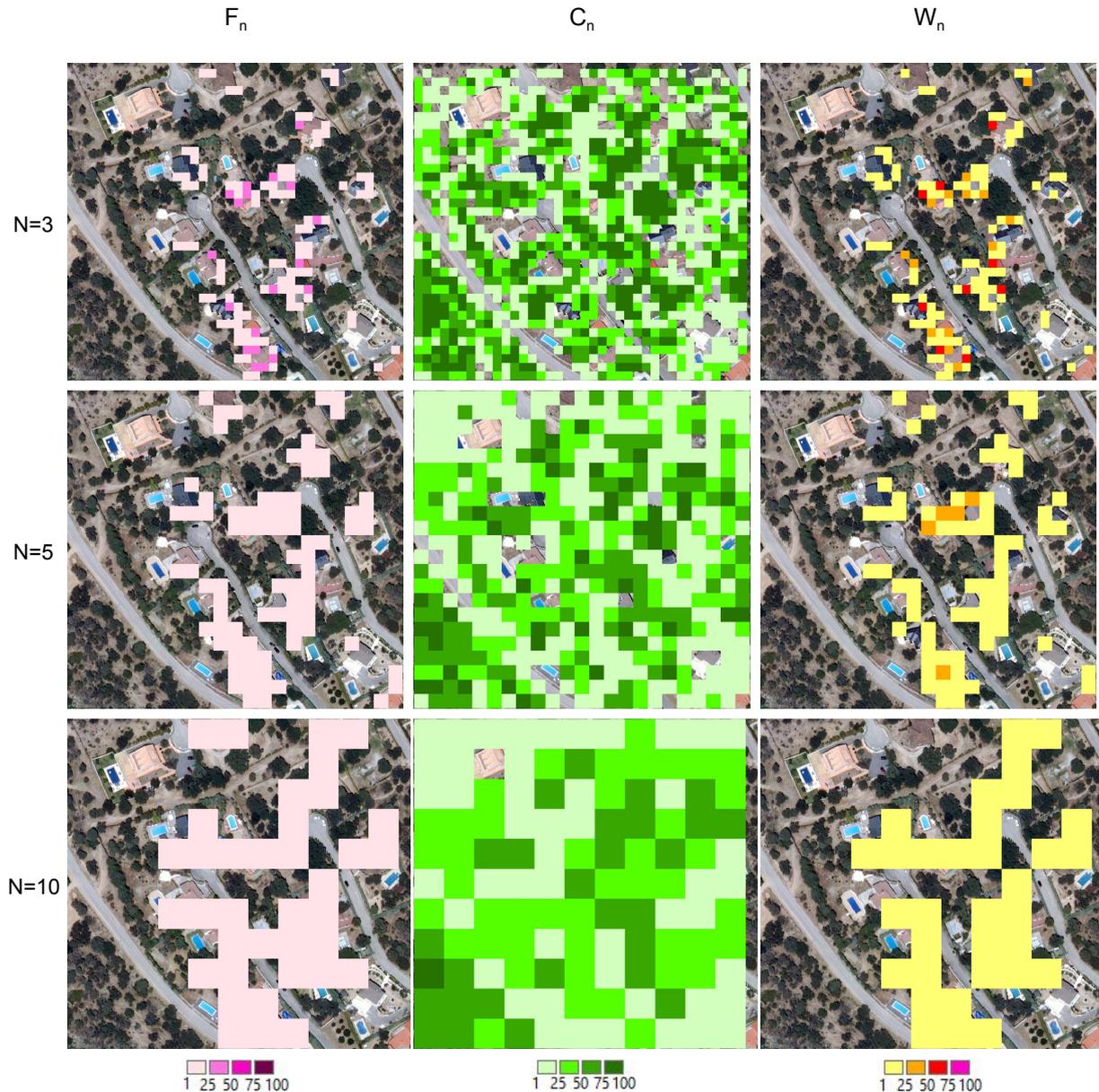
Es importante por tanto subrayar que el índice WUIX en la malla gruesa no se calcula mediante la agregación de índices WUIX en la malla fina, sino a partir del producto de las agregaciones de continuidad de la vegetación y de la fricción con las viviendas. Esto implica que, para un  $N$  dado, el valor máximo valor de WUIX corresponderá a aquellos patrones de celdas-vegetación y celdas-casa que resulten en la combinación de máxima continuidad con la máxima fricción posibles en el ámbito espacial de agregación (celda de malla gruesa).

Así, para una resolución dada de la malla fina  $R_f$ , el ámbito espacial (área) al que se refiere el resultado del cálculo de WUIX es  $R_g^2$ , donde

$$R_g = N \cdot R_f$$

La selección de  $N$  ha de realizarse en función de la dimensión que es significativa en el análisis y que sirve de criterio de referencia. Si, por ejemplo, se parte de una resolución de la malla fina de 2 m y lo que se pretende es interpretar las condiciones de fricción y continuidad en el entorno inmediato de las edificaciones (jardín), se seleccionará un  $N$  tal

que la resolución de la malla gruesa sea por ejemplo 8 o 10 m (es decir,  $N=4$  o  $N=5$ ); si por el contrario se pretende estudiar todo el área de ignición de viviendas (*Home Ignition Zone* o *HIZ* según Cohen, 2000), el valor de  $N$  subirá a 10 o 15 para ampliar el espacio de análisis a 20 o 30 m. Para los estudios más generales de identificación zonas con diferentes patrones de interfaz en una urbanización se utilizarán valores de  $N$  que den una malla gruesa de lado 50 o 100 m ( $N=25$  o  $N=50$ ). La ventaja de utilizar celdas de la malla gruesa de  $100 \times 100 \text{ m}^2$  es que los valores específicos se pueden referir a la hectárea, como se verá más adelante.



Análisis de la fricción (izquierda), continuidad (centro) e índice WUIX (derecha) normalizados con una resolución de malla fina de 2 m y para distintos valores crecientes de  $N$ . Para valores más pequeños de  $N$  (3) se obtienen resultados referidos a la interfaz inmediata a las viviendas, y quedan mejor reflejadas las discontinuidades (como las calles); para  $N$  mayores (10) se explica la interfaz en la zona de ignición de viviendas (HIZ) y las discontinuidades se difuminan. Se aprecia que el mapa de continuidad mantiene el patrón de la distribución de los mínimos y los máximos, pero dando dibujos cada vez menos detallados. El cálculo de fricción, por el contrario, va dejando un mapa con celdas con valores decrecientes, ya que generalmente incorpora más terreno sin puntos de fricción. Como consecuencia, el mapa final de WUIX refleja este mismo efecto de disolución progresiva.

Estas consideraciones son importantes a la hora de la interpretación de los resultados. Valores de  $N$  más pequeños discriminarán los efectos más locales de interfaz, los más inmediatos a las viviendas, y serán de utilidad para el análisis de secciones dentro de una urbanización; valores intermedios o grandes de  $N$  identificarán zonas donde existen efectos acoplados en regiones más grandes de nuestras urbanizaciones.

Dado que los resultados de  $WUIX$  son normalizados (de 0 a 100), los cálculos obtenidos para diferentes valores de  $N$  son comparables. No obstante su interpretación puede resultar algo confusa al principio, ya que en una zona de una urbanización pueden aparecer valores más altos de  $WUIX$  con  $N$  pequeños y valores notablemente más bajos de  $WUIX$  para valores de  $N$  más grandes en la misma zona. Esto es perfectamente posible si el ámbito espacial de agregación (el área de la celda gruesa), para un  $N$  mayor, incorpora más terreno sin continuidad o sin fricción. Aunque este análisis puede resultar contraintuitivo, es un método que ofrece valores objetivos y comparables de la interfaz cualquiera que sea el valor de  $N$ .

### Cálculo de valores específicos

Con el fin de mejorar la interpretación de los índices, y anular en cierto modo el efecto de  $N$ , el algoritmo de cálculo permite asimismo obtener la continuidad, la fricción y el índice  $WUIX$  referidos a la superficie de análisis (que por defecto es el área de la celda de la malla gruesa  $S_g$  en  $m^2$ ), dando así valores específicos<sup>8</sup> que permiten comparar la continuidad, la fricción y el índice de interfaz en cualquier punto del territorio independientemente de la resolución y tamaño de la celda de análisis. En efecto, si

$$S_g = R_f^2 \cdot N^2 = R_g^2$$

donde

- $S_g$  es la superficie de la celda de la malla gruesa, en  $m^2$
- $N$  es el número de celdas de la malla fina en cada lado de la malla gruesa ( $N > 1$ )
- $R_f$  es la resolución de la malla fina, en m
- $R_g$  es la resolución de la malla gruesa, en m

La continuidad específica de la vegetación  $C_o$  se calcula entonces según la expresión:

$$C_o = C_g / S_g$$

donde

- $C_g$  es la continuidad vegetal total en cada celda de la malla gruesa, en m
- $C_o$  es la continuidad vegetal específica de la malla gruesa, en  $m^{-1}$

De la misma manera, la fricción específica  $F_o$  se calcula de acuerdo a:

$$F_o = F_g / S_g$$

---

<sup>8</sup> Es especialmente interesante obtener valores específicos referidos a una hectárea de área de análisis ( $S_g = 10000$ ), en particular la fricción, que podrá expresarse entonces en  $m/ha$ .

donde

$F_g$  es la fricción total en cada celda de la malla gruesa, en m  
 $F_o$  es la fricción específica de la malla gruesa, en  $m^{-1}$

El cálculo del índice específico  $W_o$  se obtiene a partir de la multiplicación de los valores encontrados de la continuidad y la fricción específicos, es decir:

$$W_o = C_o \cdot F_o$$

donde

$W_o$  es el índice WUIX específico en cada celda de la malla gruesa, en  $m^{-2}$   
 $C_o$  es la continuidad vegetal específica de la malla gruesa, en  $m^{-1}$   
 $F_o$  es la fricción específica de la malla gruesa, en  $m^{-1}$

Como complemento a estos cálculos, y con el fin de proponer un método de clasificación de las estructuras de interfaz de acuerdo a los índices obtenidos, se incorpora además la continuidad de la trama urbana, en este caso calculada exclusivamente a partir de la superficie construida (no se incluyen viarios y otras instalaciones o edificaciones propias del entorno urbano). El mecanismo aplicado es igual que para la continuidad de la vegetación, y por tanto  $u_i$  será la continuidad urbana unitaria (por cada celda de la malla fina) y  $U_o$  la continuidad urbana específica, referida a la superficie de la celda de la malla gruesa, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$U_g = R_f \cdot \sum_{i=1}^{N^2} u_i$$

$$U_o = U_g / S_g$$

donde

$u_i$  es la continuidad urbana unitaria de cada celda fina en la malla gruesa  
 $U_g$  es la continuidad urbana total en la malla gruesa, en m  
 $U_o$  es la continuidad urbana específica de la malla gruesa, en  $m^{-1}$   
 $N$  es el número de celdas en cada lado de la malla gruesa  
 $R_f$  es la resolución de la malla fina, en m  
 $S_g$  es el área de la celda de la malla gruesa, en  $m^2$

Es además útil indicar los **valores máximos** de estas magnitudes específicas referidas al caso idealizado de interfaz en damero de 1 m cubierto por el dosel que, como se podrá observar, serán valores independientes de  $N$  y  $R_f$ . Este hecho facilita enormemente la comparación de diferentes porciones del territorio con respecto a estos máximos, cualquiera que sea la resolución y el tamaño de la celda de la malla gruesa. Se deduce por tanto que,

$$C'_{ox} = 6 \quad U'_{ox} = 6 \quad F'_{ox} = 2,5 \quad W'_{ox} = 15$$

donde

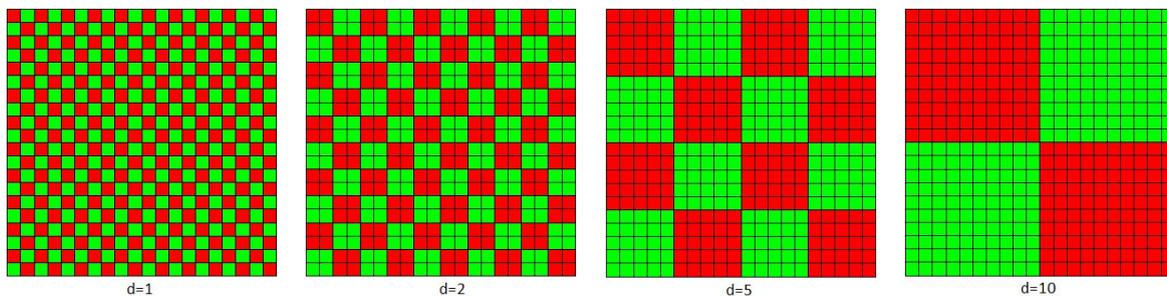
- $C'_{ox}$  es el máximo valor absoluto de continuidad específica de vegetación, en  $m^{-1}$   
 $U'_{ox}$  es el máximo valor absoluto de continuidad urbana específica, en  $m^{-1}$   
 $F'_{ox}$  es el máximo valor absoluto de fricción específica, en  $m^{-1}$   
 $W'_{ox}$  es el máximo valor absoluto del índice WUIX específico, en  $m^{-2}$

## Calibración

El planteamiento teórico del cálculo de los valores máximos de las magnitudes consideradas asume que la peor situación de interfaz es la de un patrón en damero de 1 m de lado, en la que se alternan edificaciones y vegetación y completamente cubierto por las copas de los árboles. No obstante, un damero de edificios de 1 m de lado, separados 1 m uno de otro, puede ser teóricamente correcto pero no obedece a ninguna realidad. Por tanto es altamente improbable que ninguna de las situaciones encontradas en el mundo real responda a estos valores máximos, o que ni tan siquiera se acerquen. Este hecho tiene consecuencias en la representación, interpretación y estudio comparativo de los mapas resultantes ya que, en general, los valores obtenidos serán una proporción muy pequeña de los máximos teóricos y por tanto no permitirán establecer cuáles son los umbrales de cada magnitud que pueden considerarse como los más altos. Por ello es necesario realizar una calibración tanto de los valores máximos como de los rangos considerados de acuerdo a hipótesis más realistas o, en último término, a los valores máximos medios observados en los patrones de interfaz en una zona.

### *Influencia del tamaño de las viviendas*

La primera aproximación para la calibración es considerar edificaciones de mayor tamaño. Para ello, en una malla de resolución 1 m es posible representar patrones teóricos en damero con edificaciones cuadradas alternas pero de lado  $d$  creciente y observar cómo influye en los valores obtenidos de continuidad de la vegetación, de la fricción y del índice de interfaz WUIX, así como sus valores específicos referidos a todo el área de estudio.



*Esquemas de damero (rojo=casa, verde=vegetación) para diferentes tamaños de edificación (d) en una malla fina de resolución  $R_f=1$  m y una malla gruesa de  $R_g=20$  m (es decir,  $N=20$ ). Se asume que por encima de este esquema hay además cobertura completa por las copas de los árboles, que no se representa.*

Considerando una malla fina de resolución 1 m, se pueden obtener estos valores teóricos en función del lado de la edificación ( $d$ ) y del lado de la malla gruesa ( $N$ ), calculando primero el número de celdas-damero  $N_d$  que habrá en cada lado de la celda de la malla gruesa:

$$N_U = N/d$$

Posteriormente se puede estimar el número de edificios que contendrá el damero resultante (número de «casillas negras»  $N_N$ ), mediante las expresiones:

$$\begin{aligned} \text{Caso } N_U \text{ par} & \quad N_N = N_U^2/2 \\ \text{Caso } N_U \text{ impar} & \quad N_N = (N_U^2 + 1) / 2 \end{aligned}$$

Con estos valores de  $N$ ,  $N_U$  y  $N_N$  es relativamente sencillo calcular la continuidad, fricción e índice  $WUIX$  que corresponden a la celda de la malla gruesa, mediante:

$$C_g = 6 \cdot N^2$$

$$F_g = (4d + d^2) \cdot N_N$$

$$W_g = C_g \cdot F_g$$

Dado que se asume que todo el área de cálculo está cubierta por la vegetación, la continuidad calculada ( $C_g$ ) será independiente del tamaño de las viviendas ( $d$ ). Por tanto, será la fricción ( $F_g$ ) la magnitud que caracterice esa variación. Y es el valor de la fricción el que indica que, a igualdad de otros factores, un patrón en damero con edificaciones más pequeñas ofrece más fricción que el mismo patrón con edificaciones mayores. Así pues, una zona con casetas o cabañas de 4 o 5 m de lado, densamente dispuestas pero separadas unas de otras, con cobertura total por las copas, es el peor caso teórico —pero más realista— de situación de interfaz. También se deduce que una zona de interfaz con viviendas más pequeñas presenta más fricción (y por tanto más índice  $WUIX$ ) que otra zona con exactamente la misma superficie construida pero con casas más grandes, lo que indica que el tamaño de las viviendas influye potencialmente en la defendibilidad de las zonas de interfaz y en su exigencia en cuanto a tratamientos preventivos.

A efectos ilustrativos de los razonamientos expuestos, se presentan los valores obtenidos de continuidad  $C_g$ , fricción  $F_g$  e índice de interfaz  $W_g$  para una malla gruesa de lado  $R_g=20$  m y tamaño  $d$  de las viviendas crecientes desde 1 (peor caso teórico absoluto) hasta 2, 4, 5 y 10 m de lado:

d (m)	$F_g$ (m)	$C_g$ (m)	$W_g$ (m <sup>2</sup> )	$N_U$	$N_N$
1	1000	2400	2400000	20	200
2	600	2400	1440000	10	50
4	416	2400	998400	5	13
5	360	2400	864000	4	8
10	140	2400	336000	2	2

**Valores normalizados máximos realistas**

Es relativamente inmediato obtener entonces los valores normalizados referidos al máximo absoluto (damero de 1 m), tal y como se presenta en la siguiente tabla:

d (m)	F <sub>g</sub> (m)	C <sub>g</sub> (m)	W <sub>g</sub> (m <sup>2</sup> )	N <sub>N</sub>	F <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	W <sub>n</sub>
1	1000	2400	2400000	200	100	100	100
2	600	2400	1440000	50	60	100	60
4	416	2400	998400	13	41,6	100	41,6
5	360	2400	864000	8	36	100	36
10	140	2400	336000	2	14	100	14

Dado que la continuidad, como se ha mencionado, no depende del tamaño de las edificaciones, se comprueba que el máximo se mantiene en 100% del máximo teórico absoluto (damero de 1 m); no obstante, la fricción para tamaños de vivienda de 4 o 5 m oscila entre el 36% y el 41% del máximo teórico absoluto. Con esto, es posible establecer un valor máximo nominal de 40 para la fricción e índice de interfaz normalizados, con lo que:

$$C_{nx} = 100 \quad U_{nx} = 100 \quad F_{nx} = 40 \quad W_{nx} = 40$$

donde

$C_{nx}$  es el máximo valor realista de continuidad normalizada de vegetación

$U_{nx}$  es el máximo valor realista de continuidad urbana normalizada

$F_{nx}$  es el máximo valor realista de fricción normalizada

$W_{nx}$  es el máximo valor realista del índice WUIX normalizado

De acuerdo a estos valores máximos nominales, se establecen asimismo los siguientes rangos de valores para la continuidad, la fricción y el índice de interfaz normalizados:

	C <sub>n</sub>	F <sub>n</sub>	W <sub>n</sub>
BAJO	<25	<10	<10
MEDIO	25 - 50	10 - 20	10 - 20
ALTO	50 - 75	20 - 30	20 - 30
MUY ALTO	75 - 100	>30	>30

**Valores específicos máximos realistas**

De la misma manera se procede con el cálculo de los valores máximos referidos al área de análisis (superficie de la celda de la malla gruesa), que para el caso de ejemplo  $N=20$  y  $S_g=400 \text{ m}^2$ , con lo que resulta para los valores específicos:

d (m)	$F_g$ (m)	$C_g$ (m)	$W_g$ (m <sup>2</sup> )	$N_N$	$F_o$ (m <sup>-1</sup> )	$C_o$ (m <sup>-1</sup> )	$W_o$ (m <sup>-2</sup> )
1	1000	2400	2400000	200	2,5	6	15
2	600	2400	1440000	50	1,5	6	9
4	416	2400	998400	13	1,04	6	6,2
5	360	2400	864000	8	0,9	6	5,4
10	140	2400	336000	2	0,35	6	2,1

Igualmente se observa que el valor máximo de la continuidad específica no depende del tamaño de la vivienda, siendo igual al valor máximo teórico absoluto (damero de 1 m); sin embargo la fricción específica máxima para edificios de 4 o 5 m de lado apenas llega a la mitad de este máximo teórico absoluto, estableciendo un valor nominal de  $1 \text{ m}^{-1}$  como valor máximo realista. Con ello, los límites de los valores específicos quedarían así:

$$C_{ox} = 6 \quad U_{ox} = 6 \quad F_{ox} = 1 \quad W_{ox} = 6$$

donde

- $C_{ox}$  es el máximo valor realista de continuidad específica de vegetación, en  $\text{m}^{-1}$
- $U_{ox}$  es el máximo valor realista de continuidad urbana específica, en  $\text{m}^{-1}$
- $F_{ox}$  es el máximo valor realista de fricción específica, en  $\text{m}^{-1}$
- $W_{ox}$  es el máximo valor realista del índice WUIX específico, en  $\text{m}^{-2}$

A partir de estos valores es posible establecer rangos para los valores específicos de la continuidad, la fricción y el índice WUIX, de acuerdo a la siguiente tabla:

	$C_o$	$F_o$	$W_o$
BAJO	<1,5	<0,25	<1,5
MEDIO	1,5 - 3,0	0,25 - 0,50	1,5 - 3,0
ALTO	3,0 - 4,5	0,50 - 0,75	3,0 - 4,5
MUY ALTO	>4,5	>0,75	>4,5

Estos rangos pueden ser utilizados como referencia, teniendo en cuenta que el análisis teórico que los soporta es el relativo a un damero de edificios de 4 o 5 m de lado, rodeados de vegetación y completamente cubiertos por las copas de los árboles.

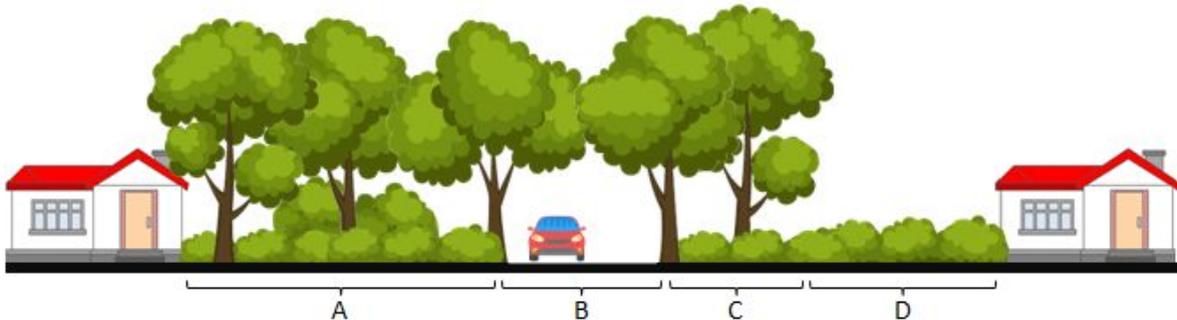
### Valores relativos máximos realistas

A pesar de incorporar el tamaño de las viviendas en el proceso de calibración hacia situaciones más realistas, los valores de la continuidad, fricción e índice *WUIX* que se observan en los casos reales siguen apartándose mucho de esa idealización del peor caso de interfaz. Por ello es recomendable fijar los máximos, en particular de los valores específicos, de acuerdo a lo observado en una región y establecer los rangos de acuerdo a la experiencia en grados de afectación en incendios ocurridos. Esta calibración, a pesar de ser relativa a la zona o región de aplicación, tiene efectos sobre todo en la representación, ya que los valores obtenidos en los cálculos son perfectamente comparables entre distintas regiones del territorio.

Conviene por tanto estudiar varias mesoescalas que son representativas de una región y obtener los valores medios y máximos de los índices asociados a ellas con el fin de establecer los rangos propios de la zona y de los patrones de interfaz que allí se dan.

### Apilado

Es relativamente común que una zona de interfaz tenga varios estratos de vegetación bien marcados (por ejemplo sotobosque y copas) y que cada uno presente diferentes patrones de continuidad y fricción con las edificaciones. En estos casos es recomendable realizar el análisis del índice *WUIX* y sus componentes para cada uno de los estratos por separado y combinar los resultados mediante técnicas de apilado (*stacking*).



*Visión esquemática de un perfil en el que se comprueban varias situaciones en las que la continuidad y fricción de dos estratos (sotobosque y copas) siguen patrones diferentes. En la sección A existe sotobosque en continuidad vertical con las copas y ambos dan fricción en la vivienda; en la sección B el viario supone una discontinuidad en el combustible de superficie pero no así en las copas; en el sector C hay continuidad tanto en el sotobosque como en las copas, pero no continuidad vertical; en el sector D solo aparece combustible de superficie, que da fricción en la vivienda. Estos análisis pseudo-3D pueden ser resueltos con técnicas de apilado, dando prioridad a uno, otro o a ambos estratos de vegetación en el cómputo final del índice *WUIX* y sus componentes.*

El apilado es un análisis pseudo-tridimensional que se realiza para recalcar, entre otras cosas, que puede no haber continuidad en la vegetación de superficie aunque haya continuidad por las copas; y que la fricción debida a las copas sobre el tejado no implica la fricción de las fachadas por el combustible de superficie. En cierto modo este tipo de asesoría tiene dos fases:

1. Análisis de cuánto contribuye a la continuidad, fricción e índice WUIX cada uno de los estratos.
2. Análisis conjunto de todos los estratos (apilado), teniendo en cuenta la fase anterior.

Estas dos fases permiten discriminar aquellas partes del territorio en las que hay algún tipo de relación tridimensional entre los componentes, ya sea vegetación-vegetación (continuidad) o vegetación-viviendas (fricción).

Para realizar un apilado es necesario ejecutar el programa WUIX tantas veces como estratos se consideren, cada uno con su mapa de vegetación. En un análisis simplificado se considerarán dos estratos: la vegetación de superficie y las copas de los árboles. Con estos dos estratos hay cuatro situaciones posibles que deben ser analizadas por separado:

	<p><u>Caso 1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuidad de superficie</li> <li>• Fricción de superficie</li> </ul> <p>No es necesario el apilado. Un único análisis con la capa de superficie.</p>
	<p><u>Caso 2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuidad de copas</li> <li>• Fricción de copas</li> </ul> <p>No es necesario el apilado. Un único análisis con la capa del arbolado.</p>
	<p><u>Caso 3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuidad de copas</li> <li>• Fricción de copas</li> <li>• Continuidad de superficie</li> <li>• Fricción de superficie</li> </ul> <p>Se realiza apilado, computando el <u>máximo</u> de fricción y continuidad de ambos estratos.</p>
	<p><u>Caso 4</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuidad de copas</li> <li>• Fricción de copas</li> <li>• Continuidad de superficie</li> <li>• Fricción de superficie</li> <li>• Continuidad vertical</li> </ul> <p>Se realiza apilado, computando la <u>suma</u> de fricción y continuidad de ambos estratos.</p>

A partir de los mapas de los valores unitarios generados por el programa WUIX para cada estrato, y haciendo uso de las funcionalidades de cálculo en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el procedimiento de apilado es como sigue:

1. Cálculo de la continuidad unitaria conjunta  $c_i$ :
  - Zonas de solo vegetación de superficie:  $c_i$ =continuidad de superficie.
  - Zonas de solo dosel arbóreo:  $c_i$ =continuidad de las copas.
  - Zonas de arbolado y sotobosque:
    - Si no hay continuidad vertical:  $c_i$ = valor máximo entre las continuidades de superficie y de copas.
    - Si hay continuidad vertical:  $c_i$ = suma de las continuidades de superficie y de copas.
2. Cálculo de la fricción unitaria conjunta  $f_i$ :
  - Zonas de solo vegetación de superficie:  $f_i$ =fricción de superficie
  - Zonas de solo dosel arbóreo:  $f_i$ =fricción de las copas con la vivienda
  - Zonas con arbolado y sotobosque:
    - Sin continuidad vertical:  $f_i$ =valor máximo de fricción entre la generada por las copas y la generada por el sotobosque.
    - Con continuidad vertical:  $f_i$ =suma de los valores de fricción debida a las copas y la generada por la vegetación de superficie
3. Cálculo del índice WUIX unitario conjunto  $w_i$ :
  - Producto de los valores encontrados de continuidad  $c_i$  y fricción  $f_i$  unitarias conjuntas.
4. Cálculo de los valores totales conjuntos en la malla gruesa  $C_g, F_g, W_g$ :
  - Suma de los valores unitarios conjuntos de continuidad, fricción e índice WUIX para cada celda de la malla gruesa.
5. Cálculo de los valores normalizados conjuntos en la malla gruesa  $C_n, F_n, W_n$ :
  - Cálculo de los valores máximos absolutos en función del número de celdas finas en cada lado de la malla gruesa ( $N$ ) y la resolución de la malla fina ( $R_f$ ).
  - División de los valores totales conjuntos por el máximo valor absoluto de cada uno de ellos y multiplicación por 100.
6. Cálculo de los valores específicos conjuntos en la malla gruesa  $C_o, F_o, W_o$ :
  - División de los valores totales conjuntos por el área de la celda de la malla gruesa.

Es importante recordar que en el caso de que se sumen las continuidades y las fricciones, los valores máximos pueden cambiar, incluso duplicarse o triplicarse (por ejemplo, el valor unitario máximo de continuidad pasaría de 6 a 12, y el de fricción de 5 a 10 en el caso de dos estratos). Es necesario tener esto en cuenta para obtener valores normalizados que sean consistentes con los calculados sin apilado.

Como se puede comprobar, el proceso de apilado requiere la asesoría previa de los puntos del territorio en los que la base de las copas tocan (o están cerca) del estrato de superficie para determinar si existe o no continuidad vertical y derivar consecuentemente el procedimiento hacia el cálculo de máximos o hacia el cálculo de sumas. Lo presentado aquí es igualmente aplicable a estructuras de vegetación con más de dos estratos.

## Interpretación de los índices

Como se ha visto, los resultados del programa *WUIX* son los cálculos de la continuidad, la fricción y el índice de interfaz expresados en cuatro formas diferentes: los valores unitarios de cada celdilla ráster de la malla fina, los valores totales relativos a la malla gruesa de análisis, los valores normalizados referidos a los máximos encontrados y los valores específicos relativos a la superficie de referencia (malla gruesa). Estos cuatro modos de agregación permiten interpretar el territorio a través de los dos componentes tratados, la continuidad y la fricción, y comparar los resultados con los obtenidos en otras zonas.

### *Continuidad vegetal*

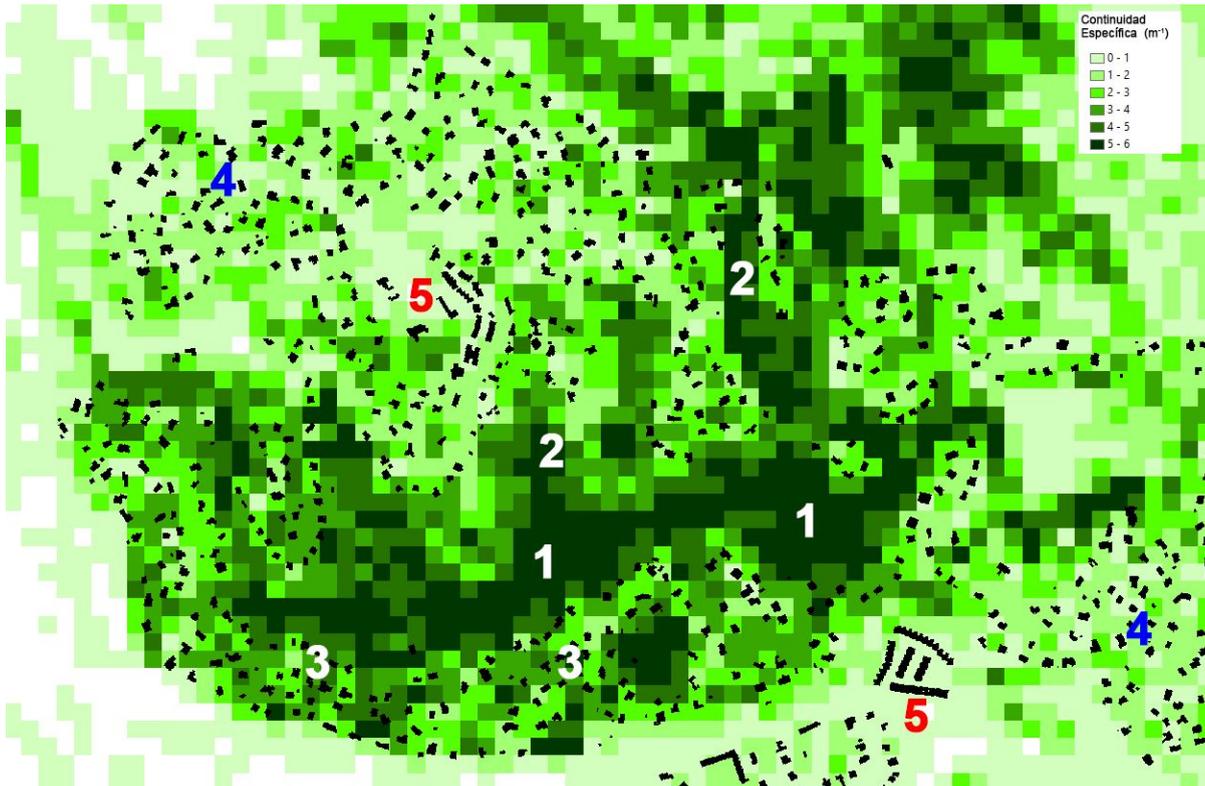
La continuidad refleja de manera simplificada la capacidad del territorio para propagar los incendios, en particular indica el grado de penetrabilidad del fuego dentro de la mesoescala de una zona poblada. Una alta continuidad se interpreta entonces como una alta capacidad del territorio para desarrollar y sostener frentes consolidados y dar carreras de cierta entidad. Una baja continuidad puede ser asociada a terrenos en los que el fuego encuentra dificultad para su tránsito como frente de llama. No obstante, una baja continuidad puede ser todavía vulnerable a la recepción de pavesas y generación de focos secundarios, provocando así igniciones que, aunque no progresen como carreras de frentes consolidados, pueden desarrollar localmente combustión y llamas muy intensas.

El análisis de los patrones de continuidad es especialmente útil para la identificación de corredores o calles de combustible que puedan facilitar la penetración de frentes dentro de las zonas pobladas, especialmente si su eje principal queda alineado con los vientos dominantes más adversos. Es interesante comparar además la continuidad en el exterior, en el perímetro y en el interior de las urbanizaciones y ver en qué proporción estas aumentan, se mantienen o disminuyen a lo largo de los potenciales trayectos de un frente de incendio que se aproxime.

Como se ha explicado, una estructura de vegetación con varios estratos (por ejemplo, matorral en el sotobosque y copas del arbolado) pueden tener patrones de continuidad diferentes; en estos casos es necesario realizar un análisis por apilado de las distintas continuidades, destacando el peso que tiene en particular la continuidad del dosel arbóreo, en la hipótesis de que se desarrolle fuego de copas. Para las situaciones en las que exista continuidad vertical, los procedimientos de apilado pueden llegar a duplicar el valor máximo unitario (originalmente es 6, en apilado de dos estratos es 12), recalcando así la importancia de esta doble continuidad (horizontal y vertical). Estos valores máximos mayorados deben tenerse en cuenta en el cálculo de las magnitudes normalizadas y para el establecimiento de rangos, siguiendo el procedimiento similar al que se ha expuesto anteriormente.

Dado que la continuidad es una magnitud topológicamente consistente (se analizan puntos-vegetación con puntos-vegetación) hay una perfecta sintonía, por ejemplo, con la fracción de cabida cubierta en el territorio (considerando todos los estratos de vegetación) u otras medidas de cobertura vegetal, y por tanto los rangos de continuidad pueden seguir

una regla lineal en cualquiera de los cuatro modos de agregación. Se sugiere considerar cuatro clases de rangos equidistantes en cualquiera de los modos (por ejemplo: 1-25, 25-50, 50-75 y 75-100 para los valores normalizados). La continuidad obtenida permite evaluar la zona de ignición de estructuras (HIZ) a media y larga distancia (radio de influencia de 10 m o 30 m), subrayando la importancia de la vegetación forestal cercana (en parcelas que están en el borde de las urbanizaciones) y de las parcelas y jardines vecinos.



En la urbanización Puentelasierra (Madrid) se aprecian varios patrones de continuidad vegetal (malla gruesa de 30 m): las zonas con más cobertura forestal (1) dentro del núcleo urbanizado, los corredores forestales correspondiente a las diferentes barrancas (2), las zonas de intermix con valores intermedios de continuidad (3), las partes en las que los abundantes setos se entremezclan con las viviendas (4) y las áreas de tejido más urbano con mucha menos vegetación (5). La continuidad específica  $C_o$  (expresada en  $m^2$ ) ayuda a segmentar el territorio y a identificar la posible permeabilidad de la urbanización a la propagación del fuego.

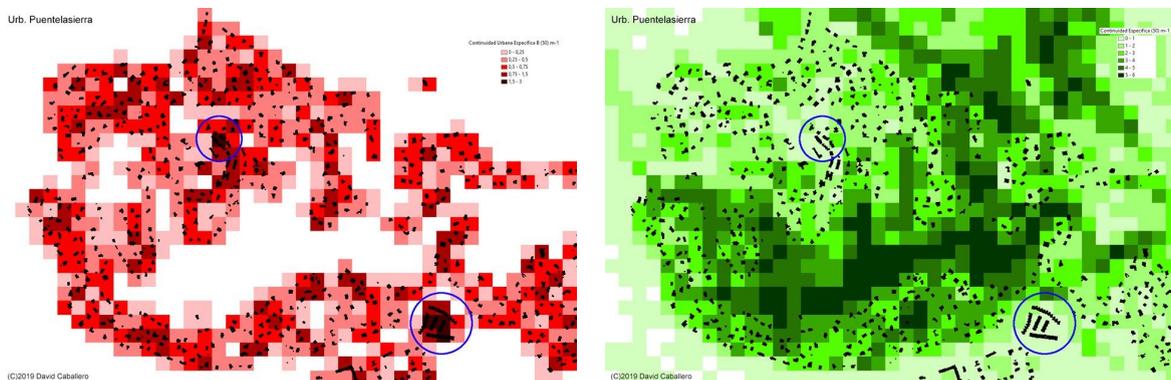
La continuidad también se puede utilizar para identificar las zonas en la que ésta es baja o muy baja, es decir áreas de discontinuidad parcial o total. Es especialmente interesante interpretar el papel de la trama urbana en la distribución de las discontinuidades (edificios, viarios), en cada uno de los estratos y de manera conjunta, así como otras construcciones e instalaciones que supongan áreas desprovistas o separadas del continuo de vegetación (entre ellas, las fajas perimetrales y otras infraestructuras y tratamientos preventivos contra incendios). En agrupaciones de viviendas o *clusters* esta continuidad se verá normalmente reducida, dando más oportunidades para su defensa e incluso para plantear confinamientos siempre y cuando se prepare el entorno para ello.

Si así lo recoge el mapa de vegetación utilizado para el análisis, es muy interesante comprobar hasta qué grado los elementos de jardinería contribuyen a la continuidad de la vegetación dentro de las urbanizaciones, en particular los setos. Como se ha indicado, resulta muy útil identificar las alineaciones más largas de setos con los vientos dominantes

más adversos. El cómputo de la continuidad depende de la calidad y contenido del mapa de vegetación (combustible) que se utiliza en origen. En los ejemplos que se adjuntan en este texto no se han considerado los pastos, la pinocha, los restos u otros elementos combustibles que en el mundo real podrían dar continuidad a la propagación. Queda al criterio del analista el incluir estos componentes en el cálculo si, a su juicio, sean relevantes para el análisis<sup>9</sup>.

### Continuidad urbana

Al igual que la continuidad vegetal, la continuidad urbana específica recoge el grado de agrupamiento de las viviendas en una superficie dada, en este caso el área de la celda de la malla gruesa. De manera rigurosa se debería considerar también el espacio ocupado por otros elementos propios de la trama urbana, como patios, plazas, calles, instalaciones etc. que en general son considerados incombustibles. En este caso el programa *WUIX* solo incorpora el perímetro de las edificaciones y por tanto la superficie ocupada por estos. En este sentido la continuidad urbana específica no explica el sellado del suelo urbano, tan solo parte de él. La continuidad urbana específica ( $U_o$ ) ayuda a encontrar las agrupaciones o *clusters* de viviendas que podrían ser posibles candidatos para un confinamiento en caso de que la evacuación esté comprometida en una zona de interfaz urbano-forestal. No obstante es necesario asimismo comprobar la fricción específica ( $F_o$ ) y la continuidad específica de vegetación ( $C_o$ ), con el fin de estimar si las viviendas pudieran estar expuestas al combustible. El índice *WUIX* específico así lo corrobora (valores bajos) ya que incluye ambas magnitudes (continuidad y fricción).



*En este ejemplo se muestran los cálculos de continuidad urbana (izquierda) y continuidad de vegetación (derecha) de una porción de la urbanización Puentelesierra (Madrid) referidos a una malla gruesa de análisis de 50m y con datos ráster de origen de 1m. Se observa (en círculo) la presencia de zonas de trama más urbana que eventualmente podrían servir como lugares de confinamiento. En el borde inferior se aprecia una zona de continuidad urbana medio-alta y de continuidad de vegetación medio-alta; son estas situaciones de intermix, con alta fricción, las que más expuestas están tal y como refleja el índice WUIX.*

Se podría esperar que el dibujo que hace el mapa de continuidad urbana específica fuera exactamente el opuesto al de continuidad vegetal específica, pero no es así. En los lugares dominados por la vegetación en general la continuidad vegetal será mayor; en los espacios

<sup>9</sup> En todo el texto se supone de que las edificaciones no son combustibles. En algunas regiones esto no es así. Por el contrario, las viviendas pueden añadir continuidad a la propagación, aunque ocurra a un ratio y en un tiempo diferente al frente principal de llama. Para estos casos, se sugiere considerar incorporar las viviendas también al cálculo de continuidad.

ocupados por núcleos más urbanos la continuidad urbana será mayor; pero existe una gama de combinaciones intermedias que reflejan precisamente los espacios de más fricción y, por tanto, de mayor exposición de las edificaciones. Para estos lugares, en los que la continuidad vegetal es moderada y lo mismo para la continuidad urbana, es donde aparecen los mayores valores del índice WUIX, con lo que el análisis por separado de ambas continuidades ofrece poca información si no se tiene en cuenta la fricción.

Es asimismo interesante subrayar que si se utiliza una resolución  $R_g$  de la malla gruesa relativamente pequeña (digamos 5 o 10 m) la continuidad urbana en la zona de casas será alta y, consecuentemente, la continuidad de vegetación en los mismos puntos será baja, ya que este cálculo sólo incorporaría la vegetación circundante más cercana que, en general, es relativamente escasa en zonas más urbanas. Es por ello que se recomienda realizar análisis de continuidad tanto urbana como de vegetación con valores de  $R_g$  más altos, digamos 30, 50 o incluso 100 m, de manera que se incorpore más información sobre la vegetación circundante a las edificaciones.

Conviene recordar que una zona eminentemente urbana puede estar cubierta por un dosel arbóreo por encima, con lo que la continuidad sería diferente en el estrato de superficie y en el estrato aéreo. Para estos casos es recomendable realizar análisis con técnicas de apilado, tal y como se ha explicado.

### *Fricción*

Como se ha mencionado, la fricción se interpreta como el contacto físico entre las celdas-vegetación con las celdas-casa (contigüidad). Esta consideración es muy limitante en cuanto a la caracterización real del efecto del combustible alrededor de un edificio, ya que exige que la vegetación esté a una distancia igual o inferior a la resolución de la malla fina utilizada como para que se considere contacto. En el mundo real no es la vegetación pegada a la vivienda, sino el efecto térmico de la combustión cercana (contacto de llama, radiación, movimientos convectivos) —y que no necesariamente tiene que ocurrir pegado a las fachadas o los tejados— el que causa algún grado de afectación. En este sentido la fricción puede interpretarse como el efecto potencial de las fuentes de calor más inmediatas a las edificaciones que, con casi total seguridad, puedan dar al menos contacto de llama<sup>10</sup>. Según se ha observado, no es necesaria una gran extensión de la fricción con la vivienda para que haya una gran afectación, pero grandes fricciones aumentan las posibilidades de que esto ocurra en cualquiera de las direcciones en la que se aproxime la amenaza.

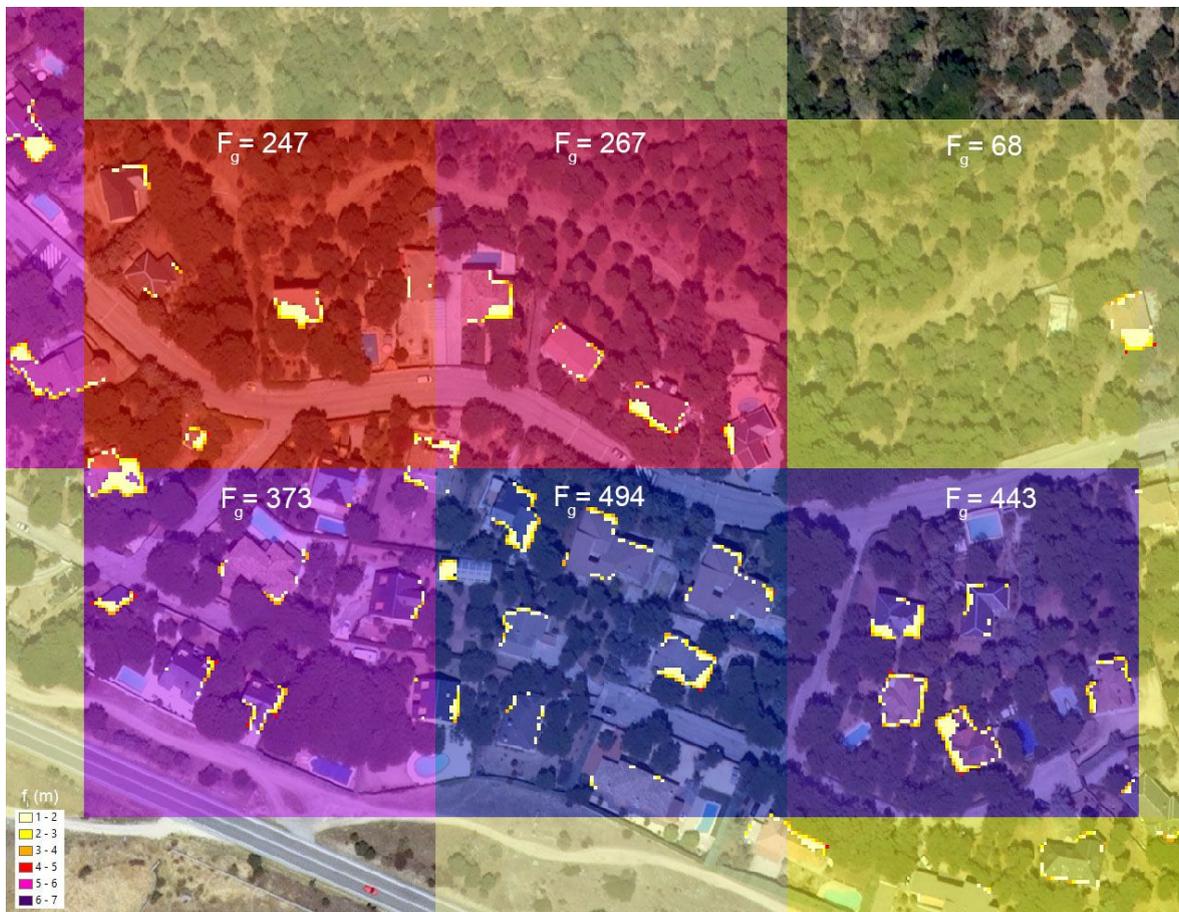
A diferencia de la continuidad, los valores máximos de fricción se refieren a una situación idealizada que se supone la peor: una distribución en damero de estructuras de 1 m de lado alterna con celdas-vegetación también de 1 m. Dado que es una hipótesis teórica, no hay una relación con ninguna magnitud en el mundo real (a diferencia de la continuidad, que se sí relaciona perfectamente con la cubierta cubierta), con lo que es más difícil establecer valores extremos y rangos de manera categórica. Por el contrario, es la observación y el

---

<sup>10</sup> No se puede asegurar que siempre haya contacto de llama, ya que la geometría de la misma depende mucho del viento y de la topografía que exista puntualmente en esa localización. El recíproco también es cierto: las condiciones de circulación local de aire pueden hacer que un combustible relativamente alejado genere una llama que entre en contacto con la fachada o con el tejado.

estudio de las diferentes realidades de patrones de interfaz la que descubre estos valores máximos y los rangos significativos (calibración por valores relativos realistas). La fricción obtenida permite hacer análisis de la zona de ignición de estructuras (*HIZ*) a corta distancia (radio de influencia de 0 a 10 m), poniendo de relieve el papel de la vegetación más inmediata en la afectación potencial a las viviendas así como en la adecuación del área defendible (*Defensible Space* o *DS*).

En una urbanización típica (zona residencial con arbolado en los jardines) no es raro encontrar valores entre 300 y 1000 m/ha de fricción específica, pudiendo superar los 2000 m/ha en los casos en los que hay más densidad de viviendas y cobertura total de los tejados por las copas de los árboles. Este último detalle incrementa notablemente las fricciones de una zona, al igual que lo hace el tamaño medio de las edificaciones. Desde punto de vista de la fricción, una de las peores situaciones de interfaz puede ser un área de cabañas pequeñas (típicas construcciones que se utilizan en periodo vacacional), completamente cubierta por el dosel arbóreo e insertas en la estructura de vegetación de superficie<sup>11</sup>.



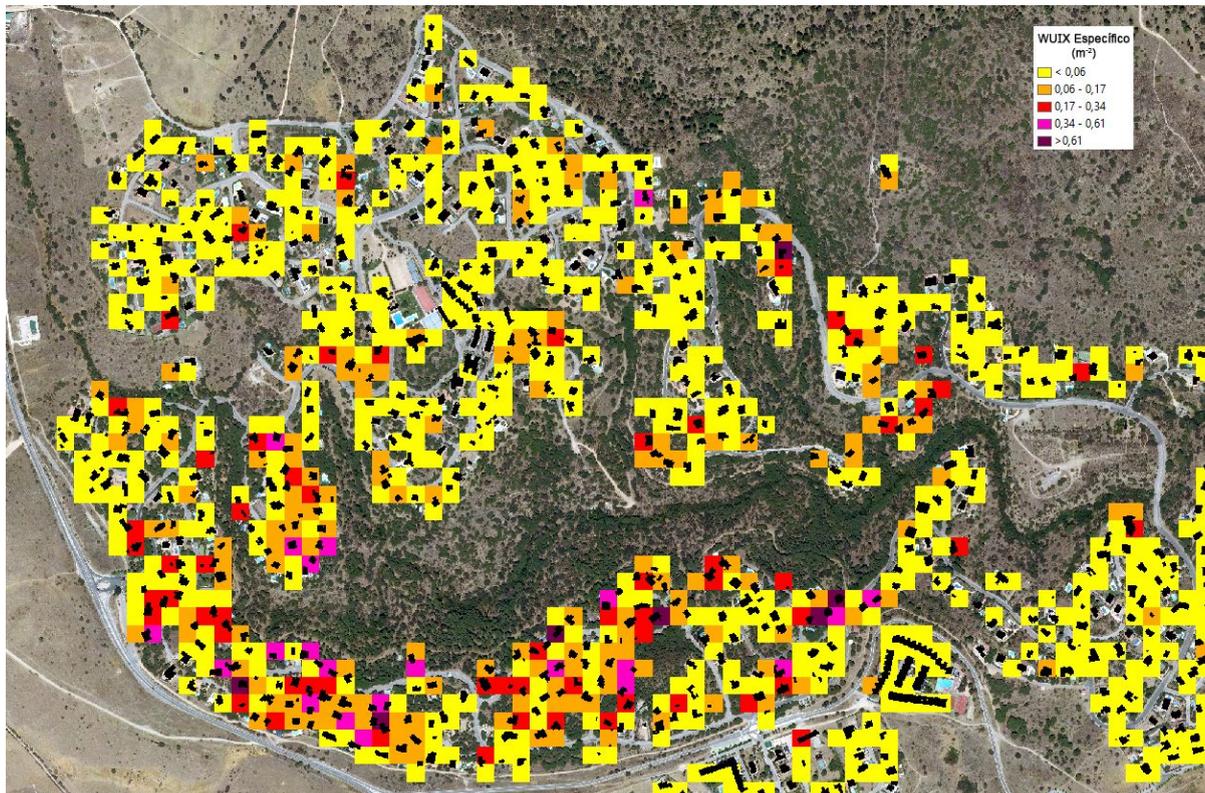
En la figura se representa la fricción total  $F_g$  (en metros) de una porción de la urbanización Puentelasierra (Madrid), para seis celdas de una hectárea cada una, y las fricciones unitarias (en metros) calculadas a 1 m de resolución. Mientras que la celda superior derecha con una casa en borde de terreno forestal tiene apenas 68 m/ha de fricción específica, la parcela inferior central acumula 494 m/ha, debida en su práctica totalidad al arbolado del jardín en 8 las edificaciones presentes.

<sup>11</sup> Patrones adversos similares al que se menciona aquí han sido observados en Chile, en las zonas residenciales entre Pucón y Villarrica, a pies del volcán del mismo nombre. Además, en esa zona, las edificaciones están hechas de madera.

De manera genérica se considera fricción baja (L) si  $F_o < 0,25 \text{ m}^{-1}$ , media (M) si  $0,25 < F_o < 0,5 \text{ m}^{-1}$  y fricción alta (H) si  $F_o > 0,5 \text{ m}^{-1}$ . Los valores de fricción específica  $F_o$  se expresan de manera indistinta en  $\text{m}^{-1}$  o en su equivalente en  $\text{m/ha}$  sin más que multiplicar por 10.000. Es necesario recordar que el cálculo de los valores unitarios y totales de la fricción están afectados por artefactos taxigeométricos (ver más adelante) que exageran la longitud total de fachadas y tejados expuestas a la vegetación, lo cual puede requerir el cálculo y posterior aplicación de un factor de corrección en función de la precisión necesaria.

### Índice WUIX

El índice de interfaz WUIX es una modulación de la fricción encontrada de acuerdo a la continuidad local de la vegetación. En cierto modo el índice WUIX indica no sólo que hay fricción, sino que además esta fricción se inserta en una estructura de vegetación que es más o menos proclive a transmitir el frente de llama de un incendio.



Índice WUIX de la urbanización Puentelasierra (Madrid), expresada en  $\text{m}^2$ . El mapa pone de manifiesto los valores bajos correspondientes a las zonas más urbanas rodeadas de setos (parte superior) así como los valores moderados encontrados en las zonas de intermix y mezcla de vegetación forestal con elementos ornamentales de jardinería (parte inferior). Algunos núcleos más densos de viviendas tienen el índice nulo.

La obtención del mapa del índice WUIX permite matizar por tanto el posible riesgo que se asocia de manera genérica a las tipologías o patrones de interfaz (ver Anexo 3), a través de la incorporación de la fricción de las viviendas con las estructuras de vegetación. Así el índice WUIX puede entenderse como un complemento que afina y mejora el análisis de este riesgo potencial, sirviendo tanto en la planificación y priorización de acciones preventivas (que reduzcan la fricción, la continuidad o ambas) como en la posible protocolización de operaciones de defensa en zonas de interfaz urbano-forestal.

El índice *WUIX* discrimina, por tanto, cuatro posibles situaciones dentro de cada tipología:

- I. **Baja fricción, baja continuidad.** Situación de vegetación dispersa y con poca cercanía a las viviendas. Puede ocurrir en el caso de trama urbana densa (ciudades, núcleos urbanos) o en zonas rurales con poca presencia de vegetación y casas dispersas.
- II. **Baja fricción, alta continuidad.** Situación de vegetación densa y continua que puede desarrollar frentes consolidados y carreras de fuego, pero que presenta separación con las viviendas, ya sean fajas perimetrales con trama urbana (ciudades) o separación de las edificaciones aisladas con la vegetación forestal (por ejemplo, el «modelo gallego», con praderas menos combustibles rodeando a casas individuales).
- III. **Alta fricción, baja continuidad.** Escenario en el que las viviendas están rodeadas por vegetación en contacto directo, pero formando islas que impiden la continuidad. Aunque no se puede esperar propagación de los frentes, este patrón de interfaz puede ser todavía vulnerable a las pavesas. Es esperable que estos patrones sean más relevantes en zonas de influencia de incendios forestales que en las cercanías o dentro de los perímetros de la propagación principal del frente.
- IV. **Alta fricción, alta continuidad.** Zona de arbolado denso y continuo en el que se insertan casas aisladas o urbanizaciones en *intermix*, en contacto directo con la vegetación. Conceptualmente es el peor de los patrones de interfaz.

#### *Valores unitarios*

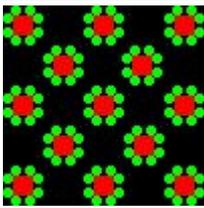
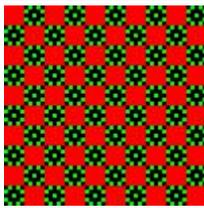
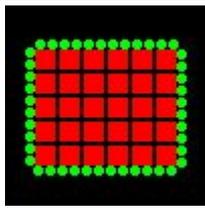
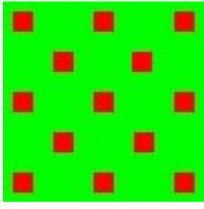
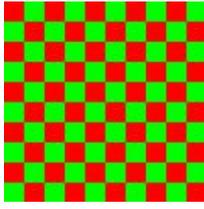
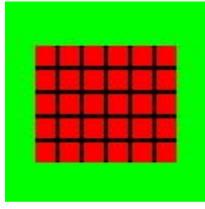
Los valores unitarios representan el cálculo de los componentes y del índice *WUIX* en su máxima resolución, y se refieren a cada una de las celdas de la malla fina. Todos los otros valores se obtienen a partir de estos valores unitarios, por lo que se pueden reutilizar para hacer cálculos correspondientes a otros espacios de agregación (*buffer* alrededor de las viviendas, total de urbanizaciones, total por zonas etc.) en una plataforma SIG. Dado que los valores unitarios de fricción se expresan en metros, pueden dar una idea de la extensión de los tratamientos preventivos a realizar en cada punto del territorio. Además, los valores unitarios sirven para hacer asesorías de la microescala (vivienda a vivienda), en particular sobre la fricción, ya que la continuidad se refiere a una extensión muy pequeña y no es significativa. Igualmente, y por lo mismo, el índice *WUIX* unitario no ofrece mucha información para altas resoluciones.

#### *Índices normalizados*

Los índices normalizados sitúan los componentes y el índice *WUIX* en proporción al peor caso teórico posible (*intermix* en damero). Dado que cuanto mayor sea el tamaño de la malla gruesa mayor será el máximo más desfavorable, los valores normalizados diluyen su valor a medida que aumenta el valor de N, limitando así su capacidad descriptiva del territorio. Es por eso que se recomienda utilizar los resultados normalizados para valores de N pequeños (por ejemplo, menor que 5) que sí estarán más cerca del peor caso posible. Para evitar este efecto se sugiere, no obstante, utilizar los valores específicos en su lugar.

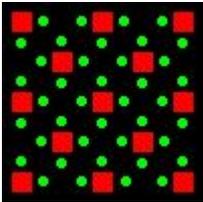
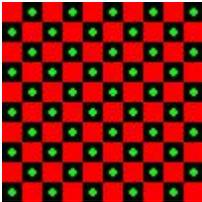
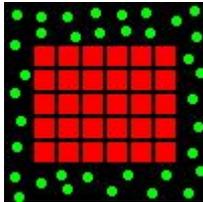
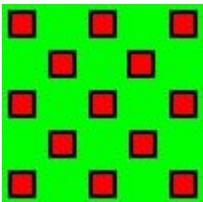
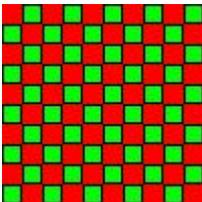
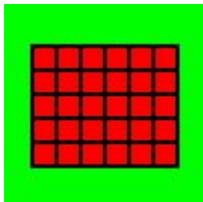
### Índices específicos

Los valores específicos representan la mejor manera de interpretar los componentes del índice WUIX para estudios comparativos. Son valores referidos a una superficie de referencia, que por defecto es el área de la celda de la malla gruesa. Estas magnitudes son las que se preferirán para un análisis de mesoescala ya que, en función de la continuidad vegetal  $C_o$  y de la continuidad urbana  $U_o$ , se pueden caracterizar hasta 25 tipologías de interfaz (ver Anexo 3) a las que se les asocia un riesgo genérico. Posteriormente este riesgo se puede matizar de acuerdo a la fricción específica  $F_o$ , según sea esta alta (H) o baja (L), obteniendo así algunos de los patrones idealizados más frecuentes:

ALTA FRICCIÓN	$U_o$ Bajo	$U_o$ Medio	$U_o$ Alto
$C_o$ Bajo	 <b>H1</b> (IIA, IIB, IIIA, IIIB)	 <b>H2</b> (IVA, IVB)	 <b>H3</b> (VA, VB)
$C_o$ Alto	 <b>H4</b> (IID, IIE, IIID, IIIE)	 <b>H5</b> (IVD, IVE)	 <b>H6</b> (VD, VE)
Verde = vegetación. Rojo = edificaciones. Negro = incombustible. Entre paréntesis las clases de interfaz			

Todos los casos de **alta fricción** (H) suponen una amenaza potencial a las edificaciones, por tener combustible en contacto. Por tanto, son casos a transformar para reducir o eliminar esa exposición. Los casos de continuidad de vegetación  $C_o$  baja no darán carreras de propagación de un frente, pero serán proclives a dar focos secundarios por pavesas y crear igniciones locales cerca de las viviendas. Por tanto, todos estos casos pueden estar amenazados en las zonas de influencia de incendios forestales cercanos. Los casos de continuidad vegetal  $C_o$  media o alta son las interfaces más peligrosas ya que pueden desarrollar carreras de frentes de llama que pueden impactar directamente con las viviendas. El caso H4 corresponde a un diseminado en terreno forestal; el caso H5 a un *intermix* en damero (el peor caso) y el H6 a una ciudad con trama urbana bien definida rodeada por terreno forestal. La protección en los tres casos exige una separación de las viviendas de la vegetación circundante, de manera que se conviertan en sus homólogos de baja fricción (es decir, L4, L5 y L6). Aunque WUIX entenderá como «separación» una franja sin combustible de ancho igual a la resolución  $R_f$  de la malla fina, en realidad debería ser al menos dos veces la longitud de llama prevista en la dirección de máxima propagación<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Aquí queda patente la principal limitación de un índice de continuidad-fricción que no tiene en cuenta la geometría local del frente de llama que llega a las viviendas, la cual condiciona totalmente el cálculo de la separación de seguridad necesaria.

BAJA FRICCIÓN	$U_o$ Bajo	$U_o$ Medio	$U_o$ Alto
$C_o$ Bajo	 <p style="text-align: center;"><b>L1</b> (IIA, IIB, IIIA, IIIB)</p>	 <p style="text-align: center;"><b>L2</b> (IVA, IVB)</p>	 <p style="text-align: center;"><b>L3</b> (VA, VB)</p>
$C_o$ Alto	 <p style="text-align: center;"><b>L4</b> (IID, IIE, IIID, IIIE)</p>	 <p style="text-align: center;"><b>L5</b> (IVD, IVE)</p>	 <p style="text-align: center;"><b>L6</b> (VD, VE)</p>
Verde = vegetación. Rojo = edificaciones. Negro = incombustible. Entre paréntesis las clases de interfaz			

Los casos de **baja fricción** (L) son una representación simplificada de estructuras de protección para cada patrón de trama urbana. Los casos de baja continuidad de vegetación  $C_o$  se refieren a las situaciones de interfaz menos expuestas a los efectos de incendio forestal, ya que ni propagan frente de llama ni dan focos secundarios de entidad que afecten a las viviendas. Los casos de alta continuidad de vegetación  $C_o$  son situaciones en las que las viviendas pueden estar rodeadas por una propagación de un frente de llama o dar focos secundarios que progresan, pero que al llegar a las viviendas encuentran una separación que reduce su impacto sobre las mismas. Es necesario recalcar, una vez más, que esta distancia real de seguridad no equivale por lo general a la resolución  $R_f$  de la malla fina —que es lo que considera *WUIX*—, sino por ejemplo a un mínimo de dos veces la longitud de llama en la dirección de máxima propagación. La situación L4 nos indica que en un diseminado es necesario crear una separación alrededor de cada vivienda; la L5 indica que es necesario tratar las parcelas sin construir en un intermix, creando franjas auxiliares en los lindes de las mismas; la L6 indica la necesidad de crear una faja perimetral que englobe a toda la trama urbana. Estas son, teóricamente, las estructuras a las que es necesario evolucionar las tipologías de alta fricción (H) equivalentes. La medida de la fricción unitaria  $f_i$  de cada punto da una métrica del tratamiento lineal que es necesario realizar (que habría que multiplicar por el ancho necesario para obtener la superficie final de tratamiento). Si se refiere a la superficie del contorno de cada edificación, la fricción específica propia  $F_{op}$  (ver más adelante) indica la longitud de tratamiento necesaria alrededor de cada vivienda, valores útiles para el caso de protección casas aisladas y diseminados, ya que en estas situaciones no se cuenta con estructuras comunitarias de defensa.

En el mundo real rara vez aparecerán grandes extensiones con una tipología pura de interfaz, serán más bien mezclas sin solución de continuidad de las clases descritas, cada una con sus características asociadas.

## Otros ámbitos espaciales de agregación

Una de las ventajas de calcular los valores unitarios de continuidad y fricción en la malla fina es que se pueden referir los resultados a otros ámbitos de agregación que no sea la malla gruesa. Es común que la utilización de una malla gruesa de celdas cuadradas no sea capaz de detectar las particularidades de los patrones locales de fricción y continuidad asociadas a las edificaciones y sus alrededores, ya que segmenta el territorio de una manera sistemática pero poco natural (es raro, por no decir imposible, que cada vivienda de una zona de estudio se sitúe exactamente dentro de una celda de la malla gruesa).

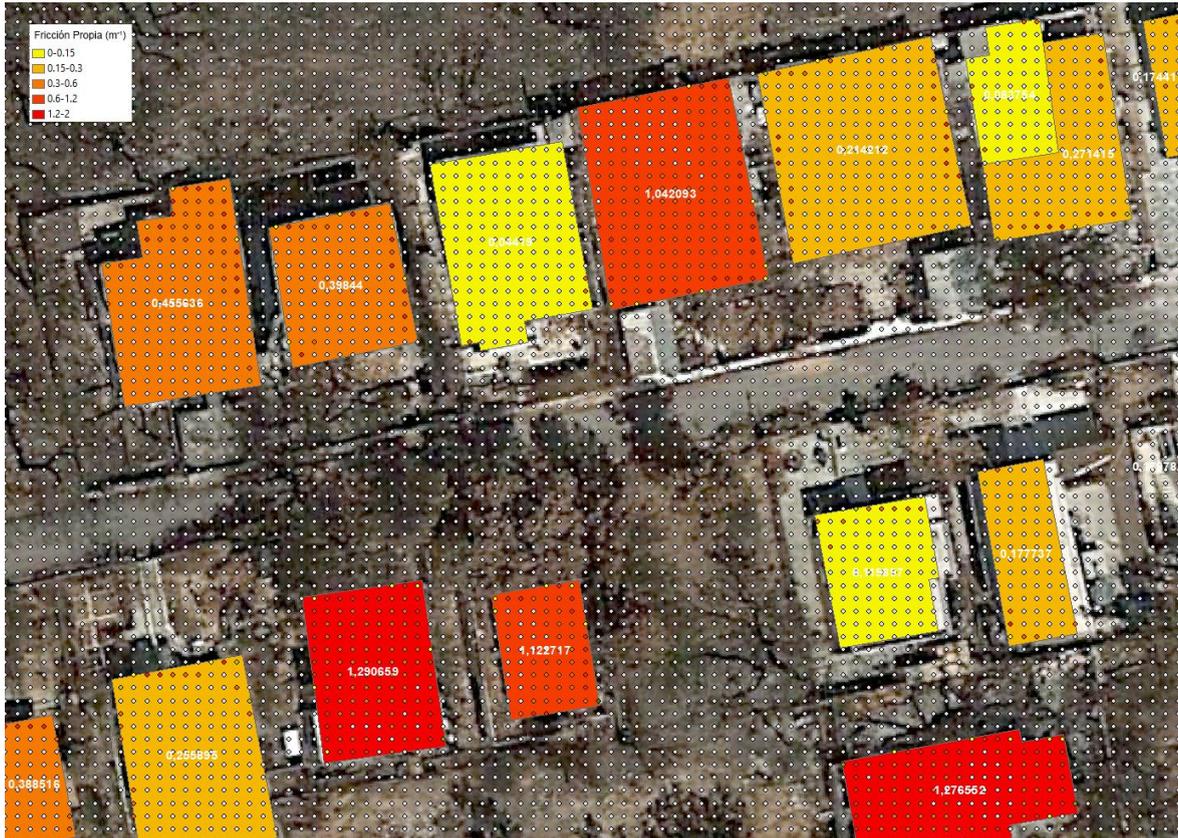
### Agregación orientada a la vivienda

En estos casos, una de las técnicas más útiles que se pueden aplicar a los resultados de cálculo *WUIX* es precisamente la estimación de estadísticas de continuidad y fricción asociadas a las edificaciones, obteniéndose las magnitudes propias que los caracterizan. Para ello es necesario realizar primero la suma de las continuidades de vegetación de la malla fina que se incluyen dentro de una zona *buffer* alrededor de la vivienda. Si el *buffer* es de 10 m la continuidad se referirá al combustible más inmediato (jardín); si el *buffer* es de 30 m este explicará la continuidad de la vegetación en la zona de ignición de la vivienda (*HIZ*).



En el sector 08 de Mati, se calcula la continuidad propia de cada vivienda agregando la continuidad unitaria de todos los puntos que son vegetación en un *buffer* de 30 m alrededor del edificio (*HIZ*). El valor obtenido se divide por la superficie de ese *buffer* para obtener el valor propio específico correspondiente y asociarlo a la casa. Este valor refleja tanto la presencia como ausencia de vegetación, como ocurre en las zonas de tejido urbano denso.

Asimismo se calcula la suma de los valores de la fricción unitaria de las celdas de la malla fina que se incluyen dentro del contorno de cada edificio. El índice *WUIX* propio será el producto de estos dos valores obtenidos. Los resultados de continuidad, fricción e índice *WUIX* se dividen por las superficies correspondientes (*buffer*, edificio) y se asignan los resultados a cada una de las viviendas, denominándose «valores específicos propios» que se designan como  $C_{op}$ ,  $U_{op}$ ,  $F_{op}$ , y  $WUIX_{op}$ .



En el cálculo de la fricción propia de cada vivienda en el sector 8 de Mati, se consideran todos los puntos de fricción con vegetación (incluidos los tejados cubiertos por las copas) que se contienen en el contorno de la edificación. El valor específico se obtiene dividiendo por la superficie de dicho contorno y se asocia a cada casa.

Como lo que se estima son las magnitudes propias de cada edificación, no se incluye en el cómputo la fricción de otras estructuras dentro de la zona *buffer* sino solo dentro del contorno de la propia edificación. Por el contrario, dentro de la zona *buffer* sí se contabiliza toda la continuidad de la vegetación así como la discontinuidad debida a la presencia de otras edificaciones, viarios, instalaciones etc. (por ejemplo en áreas de trama más urbana). Es necesario estudiar y conocer los valores máximos de cada una de las magnitudes para estos nuevos espacios de agregación, que pueden no coincidir con lo expuesto en el caso general de uso de mallas cuadradas.

La agregación de los valores de continuidad y fricción unitarios se puede realizar también para la zona rectangular que abarca todo el área de análisis (*bounding box*) o para la superficie cubierta por el límite administrativo de una urbanización; en ambos casos los valores específicos (dividiendo por el área de la superficie) permite su comparación entre los casos encontrados en el territorio para su clasificación (por ejemplo, comparación de fricciones, continuidades o índices *WUIX* específicos de varias urbanizaciones).

## La influencia de la calidad de datos de entrada

El algoritmo de cálculo del índice *WUIX* es muy sensible a los errores o desalineaciones en los datos de entrada, más en particular en lo referente al cálculo de la fricción. En efecto, corrientemente se utilizan como mínimo dos fuentes de datos diferentes: uno para obtener el mapa de vegetación y otro para el mapa de viviendas, con lo que las posibles diferencias de escala, resolución, proyección etc. pueden resultar en descuadres que falseen la interpretación topológica de la fricción.

Como se ha mencionado, el análisis de la mesoescala obliga a utilizar escalas y resoluciones de más detalle que la cartografía que habitualmente se maneja en los análisis territoriales del paisaje. Con ello es necesario evaluar hasta qué punto las escalas y resoluciones de los datos de partida seleccionados cumplen esos requisitos. En particular es de uso común utilizar los datos del catastro (cuya finalidad principal es control tributario) para cartografiar los contornos de las edificaciones, en gran medida porque se trata de dato de acceso libre (*open data*) y de información oficial. No obstante los datos que se incluyen en el catastro no tienen un único origen, escala y resolución, ya que se permite incorporar representaciones gráficas para su inscripción por parte de los propietarios que pueden aportar un plano georreferenciado (lit.) «técnicamente fiable, validado por un técnico competente».

Esta heterogeneidad da como resultado que no todos los contornos de las viviendas correspondan a lo que después se ve en la ortofoto más actual. Inconsistencias en la posición, la escala, la forma, la orientación, existencia de edificios donde ya no hay, falta de datos catastrales de nuevos edificios etc. hacen que sea necesario revisar uno a uno los contornos de las edificaciones o, alternativamente, pedir al consistorio correspondiente o a los propietarios los planos de detalle de las urbanizaciones y viviendas a analizar.



*Tres ejemplos de descuadres típicos del catastro para su utilización en el análisis WUIX: desalineaciones o desplazamientos, viviendas sin contorno o perfiles de viviendas que ya no existen. Los errores no deberían ser superiores a la resolución  $R$ , de la malla fina, habitualmente 1 o 2 m.*

La ortofoto del Plan Nacional de Observación del Territorio, el PNOA o Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, ofrece un muy buen punto de partida para la revisión e interpretación de la vegetación forestal y de los jardines, ofreciendo en algunos casos productos muy actualizados y de alta resolución (píxeles de hasta 22 cm y actualizaciones a 2018 a fecha de hoy). Es importante controlar con detalle los procesos de clasificación de imágenes para evitar errores temáticos en la asignación de píxeles a celdas con vegetación que no son considerados combustible (por ejemplo praderas de césped), la incorporación de estructuras de vegetación que son relevantes en las urbanizaciones (como setos) y que

tienen una respuesta radiométrica parecida a materiales estructurales (tejados de pizarra, de cemento) interpretándose por tanto como material incombustible. Esta similitud entre bandas de color *RGB* (*R=red*, rojo; *G=green*, verde; *B=blue*, azul) es bien conocida en el ámbito de interpretación de ortofotos e imágenes de satélite y puede derivar en «derrames» de clasificación, interpretando zonas de sombra o tejados como vegetación cuando en realidad no lo son.

Los datos *LIDAR*<sup>13</sup> —el CNIG<sup>14</sup> acaba de publicar un nuevo vuelo de toda España— son otra fuente muy recomendable para la interpretación de puntos-casa y puntos-vivienda, con el añadido de obtener información sobre las alturas de los mismos y ser, además, una única fuente de datos (por tanto espacial y temporalmente consistente). No obstante es asimismo importante comprobar el grado de actualización de los datos con respecto a los últimos desarrollos urbanísticos y estado de la vegetación, para evitar inconsistencias como las «casas-árbol», lugares donde el dato *LIDAR* marca la presencia de vegetación mientras que en realidad existe un edificio. En estos casos se recomienda trabajar con la nube de puntos *LAS*<sup>15</sup> y utilizar algoritmos propios de clasificación con los objetivos específicos de la cartografía de mesoescala. Tal y como se ha mencionado, y como regla general, es recomendable que tanto los errores temáticos como geométricos no superen la resolución de análisis (que como se ha razonado estará entre 1 y 2 m).

### **Aliasing y otros artefactos taxigeométricos**

La utilización de mapas de celdas cuadradas (mapas ráster) lleva implícita la aceptación de efectos taxigeométricos (Caballero, 2006) en el cómputo de distancias y magnitudes derivadas, como la continuidad o la fricción. Mientras las edificaciones estén alineadas con la rejilla de análisis no habrá diferencias entre las distancias euclidianas y taxigeométricas<sup>16</sup>. En los casos en que no exista esta coincidencia —que son prácticamente la generalidad—, las rectas se representarán como líneas quebradas de lados ortogonales (efecto conocido como «aliasing» en computación gráfica), mayorando así su longitud real. Esta longitud taxigeométrica de las fachadas tiene un claro efecto en el cálculo de la fricción en el índice *WUIX*. Este efecto se reduce cuanto mayor es la resolución (tamaño de la celda menor).

Otro efecto derivado del uso de una geometría rígida como la malla de celdas cuadradas (ráster) es que la posición de las edificaciones respecto a esta malla condiciona el cómputo total de fricción y de índice *WUIX*, especialmente cuando el contorno de las edificaciones está a caballo de varias celdas (por ejemplo, cuando están centradas en un vértice que es confluencia de cuatro). En estos casos es difícil detectar las viviendas que ofrecen más fricción e índice *WUIX*, ya que sus valores se reparten territorialmente entre varias celdas. Este efecto condiciona el modo de análisis y validación ya que no puede, consecuentemente, estar orientado a las edificaciones.

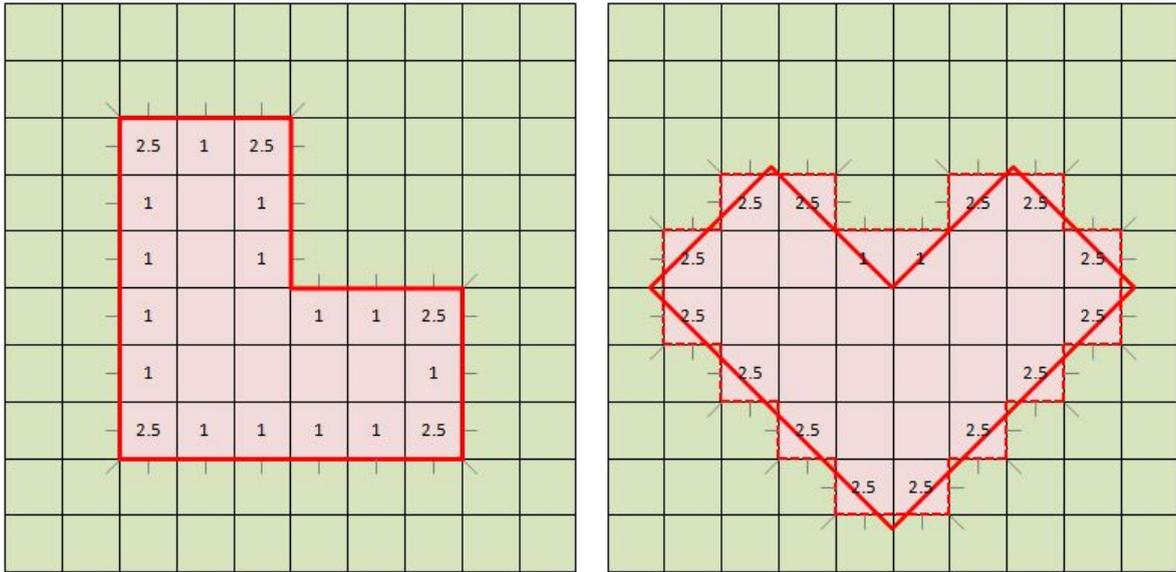
---

<sup>13</sup> *LIDAR* es el acrónimo de *Laser Imaging Detection And Ranging*, un proceso para la detección y medida remota de distancias mediante la utilización de haces láser.

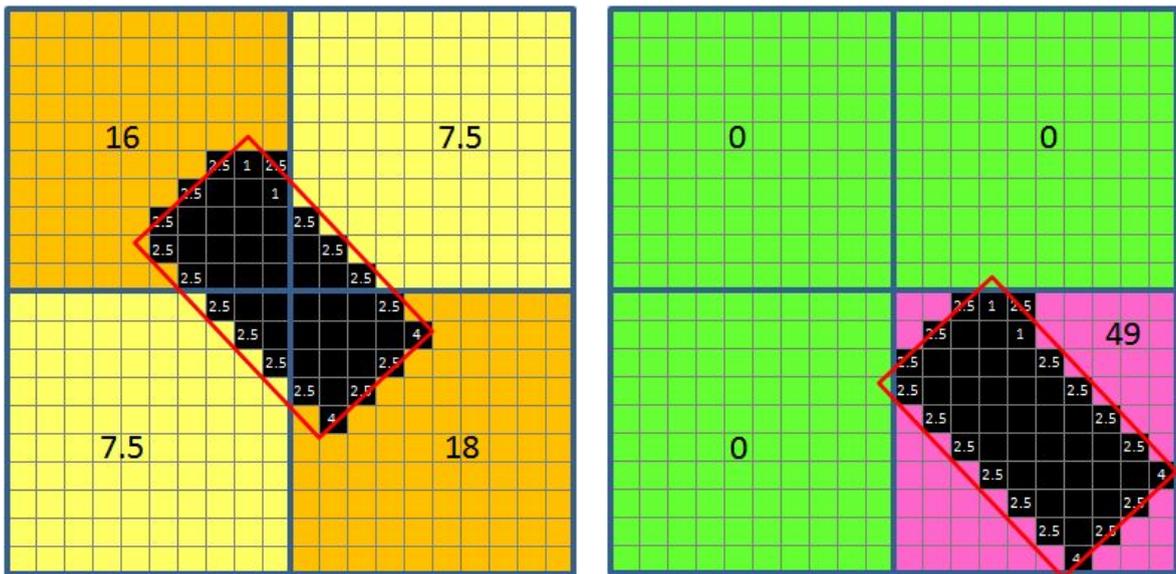
<sup>14</sup> Centro Nacional de Información Geográfica, organismo autónomo adscrito al Ministerio de Fomento de España.

<sup>15</sup> Los ficheros en formato estándar *LAS* (de *LASeR*) incluyen los datos de la nube de puntos obtenida mediante *LIDAR*.

<sup>16</sup> La distancia taxigeométrica o distancia del taxista entre dos puntos se define como la suma de las diferencias absolutas de sus coordenadas. Fue descrita por Hermann Minkowski en el siglo XIX y se aplica en problemas que se desarrollan en mallas cuadradas uniformes.



En la figura de ejemplo se muestra una edificación en «L» (izquierda) alineada con la rejilla de análisis y la misma figura (derecha) girada 45°. Mientras que en el primer caso las longitudes coinciden (24 m), en el segundo caso la longitud real de la fachada (línea continua, de 24 m) se ve mayorada un 25% por la longitud taxigeométrica (línea de puntos, de 30 m) y la fricción resultante (suma de las fricciones que se representan) en un 54% (fricción total 37 m).



La posición de las viviendas (en negro) relativa a la malla gruesa de análisis (en azul) puede condicionar la asignación de los valores calculados. Así en la figura de la izquierda la edificación cae en la intersección de cuatro celdas gruesas, por lo que el cómputo de la fricción total se reparte entre ellas, quedando enmascarada la alta fricción de la vivienda. En la figura de la derecha la totalidad de la vivienda cae en una celda gruesa, que en este caso sí computa la totalidad de la fricción, subrayando entonces su valor elevado (49 m). Aunque el procedimiento de asignación de los valores totales a las celdas de la malla gruesa es territorialmente correcto (cómputo de los puntos que caen allí, con sus atributos) éste dificulta o desvirtúa mucho el análisis orientado a las viviendas y, consecuentemente, su posible relación con el grado de afectación.

## Discusión

### *Capacidades y limitaciones*

El cálculo del índice de fricción-continuidad *WUIX* y sus componentes ofrece una manera sencilla de evaluar el efecto de la posición relativa entre la vegetación y las edificaciones en zonas de interfaz. Los algoritmos propuestos son fáciles de entender e incorporar en un análisis espacial y requieren datos de entrada relativamente sencillos de obtener. Los resultados pueden normalizarse para su comparación con respecto a valores máximos o referirse a diferentes superficies de análisis para su estudio relativo en diferentes partes del territorio. Al no tenerse en cuenta ni la topografía ni viento, los análisis son independientes de los escenarios de incendio por lo que son topológicamente comparables. Además, al tratarse de un proceso que discurre en un espacio bidimensional, se facilita mucho su uso en plataformas SIG en las que tanto los datos de entrada como los resultados de salida se almacenan en capas ráster de una resolución dada. Los valores unitarios obtenidos de continuidad, fricción e índice *WUIX* pueden ser fácilmente reutilizados en plataformas SIG para posteriores análisis y agregaciones espaciales sin más que aplicar álgebra de capas.

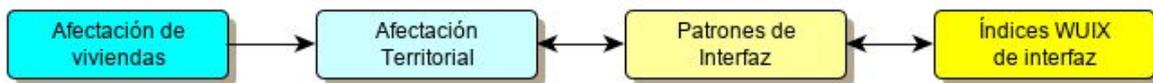
No obstante, la utilización de una geometría tan rígida como lo son las mallas cuadradas (mapas ráster) tiene implícita la aparición de artefactos propios de la métrica asociada, en particular en el cálculo de los valores del índice en las cercanías de las edificaciones y el cómputo de distancias y longitudes sujetas a los efectos de la taxigeometría que, por lo general, las exagera. Además, a no ser que el analista así lo especifique, la continuidad calculada no incorpora otros elementos combustibles —en especial los pastos secos, otros objetos y materiales, y las propias viviendas— que pudieran participar en la propagación del fuego, con lo que la continuidad real del combustible puede quedar minorada. Tampoco se realiza un análisis tridimensional de la relación espacial de la estructura de los combustibles ni de su disposición en la topografía, en particular en pendientes muy acusadas. La fricción se estima a partir del contacto de celdas-vivienda con celdas-vegetación, sin tener en cuenta la proximidad —sin contacto— de dichas celdas ni la direccionalidad de la influencia (por ejemplo la derivada de la dirección del viento o de la línea de máxima pendiente). Asimismo la relación espacial tridimensional entre las edificaciones y la vegetación queda reducida a una mera fricción lineal en fachadas y tejados, no considerándose el área de dichas superficies potencialmente expuestas a la vegetación.

### **Validación**

El cálculo del índice *WUIX* y sus componentes en áreas afectadas por incendio y en las que se ha observado algún grado de afectación o destrucción de las edificaciones arroja algunas conclusiones con respecto a su habilidad para discriminar situaciones de riesgo.

Antes que nada es importante subrayar que la naturaleza del índice *WUIX* y sus componentes está orientada a caracterizar los diferentes patrones de interfaz que se puedan encontrar en el territorio forestal, basándose en la continuidad de la vegetación y en la fricción de las viviendas con la misma. Así pues, se ha propuesto un procedimiento y una métrica para clasificar dichos patrones o tipologías de acuerdo a los valores específicos

(relativos a un área) encontrados. Ahora bien, cada tipología, en cada localización y para cada episodio concreto de incendio forestal tiene asociado un nivel de afectación, como suma de las todas las afectaciones de las edificaciones implicadas en el siniestro. Esta estadística de incendios, a medida que se incorporan nuevos episodios, va paulatinamente describiendo con más precisión el nivel potencial de afectación de los distintos patrones de interfaz encontrados en una región, con el fin último de asociar un nivel de riesgo a cada tipología. De esta manera, y solo entonces, el índice *WUIX* podrá, a partir de la identificación de patrones de interfaz, asociar sus valores a niveles de afectación, y adquirir así cierta capacidad predictiva. El proceso se resume en el siguiente esquema:



Efectivamente, dado que en un proceso de afectación de una edificación concreta en un incendio forestal participan fenómenos de distinta índole —y no solo la cercanía de la vegetación— es altamente improbable que el índice *WUIX* y sus componentes tengan la capacidad de predecir de manera directa y precisa qué grado de destrucción puedan sufrir las estructuras. Como se ha podido comprobar en incendios pasados, el tipo y materiales de construcción, la configuración de las ventanas en el momento del incendio (abiertas o cerradas), la presencia de elementos combustibles otros que no sean vegetación, los procesos de combustión y la geometría local de las llamas, la presencia o no de medidas de protección activa o pasiva de las viviendas o las operaciones de defensa que hayan podido tener lugar, son algunos de los factores y condicionantes que influyen notablemente en la afectación final de los edificios. Por lo tanto, la asesoría de afectación de estructuras concretas que se realice con el índice *WUIX* y sus componentes no puede ser determinista, es tan solo orientativa.

Con el fin de evaluar esta posible capacidad predictiva del índice *WUIX*, se procede a realizar una validación mediante la comparación del nivel de destrucción de edificios en un caso real (incendio de Mati 2018) con los resultados obtenidos del índice *WUIX* y sus componentes para el mismo territorio. Para ello es necesario primero encontrar espacios comunes de análisis tanto para la afectación como para *WUIX*, permitiendo así que las comparaciones sean coherentes y significativas. Se sugieren dos aproximaciones que cumplen este propósito: por un lado la especialización territorial de la afectación y por otro el análisis orientado a viviendas. En el primero la afectación de las viviendas, que es un dato propio asociado a su geometría, se traduce al espacio de celdas cuadradas (malla fina y malla gruesa) en el que opera *WUIX*; en el segundo, por el contrario, los cálculos obtenidos en *WUIX* se refieren al espacio propio de las viviendas y su entorno inmediato (*buffer*).

En el estudio de la afectación es necesario considerar todas aquellas viviendas que han sido dañadas por el incendio, ya sea por la acción directa del frente de llama o de manera indirecta por la caída de pavesas o por el efecto de la combustión post-frontal latente. Solo así se obtendrá una verdadera evaluación de lo que explica y de lo que no explica *WUIX*.

### *El incendio de Mati (Grecia) como caso de estudio*

El 23 de julio de 2018 un incendio se inicia y desarrolla con rapidez en los alrededores de la zona residencial de Mati, al noreste de la región de Ática, Grecia, a la cual acaba por alcanzar y afectar gravemente. Como resultado, casi 2000 edificaciones se ven implicadas en mayor o menor grado, de las cuales alrededor de 600 son severamente afectadas o destruidas. En el mismo episodio fallecen 102 personas y casi 200 resultan heridas. Este es uno de los incendios más devastadores de la historia reciente en Europa y un muy buen caso de estudio por la extensión y heterogeneidad de la afectación a edificios.

La zona residencial afectada se puede dividir en cuatro bloques territoriales que son significativos: Daou Penteli (zona del origen), Neos Voutzas, Mati y Kokkino Limanaki. De los cuatro se ha seleccionado la población de Mati que, en proporción, fue la más afectada. Dada la extensión de la destrucción, se procedió a dividir el conjunto Mati-Kokkino Limanaki en 12 sectores que ayudarían a la sistematización tanto del trabajo de campo como del análisis posterior en gabinete. De ellos el sector 8 (Mati S08) fue en proporción uno de los más afectados. Este sector queda limitado al Oeste por la Avenida Maratón (autovía) y al Este por la calle Kyprou; asimismo, el límite Norte es la calle Tritonos y al Sur cierra el sector la calle Fisiolatron. En total el sector incluye 192 edificaciones en una superficie de aproximadamente 13,5 ha.

Se han definido cuatro niveles de afectación de edificaciones que han permitido hacer, de manera rápida y sencilla, la evaluación *de visu* tanto en el lugar de los hechos como la revisión posterior a través de la ortofoto correspondiente. Estos niveles son:



1. Sin afectación apreciable



2. Afectación moderada



3. Afectación severa



4. Destrucción completa

1. **Sin daños apreciables.** El edificio no presenta afectación o esta es muy ligera, como ennegrecido superficial de la pintura o alguna alteración de elementos plásticos (deformación ligera de canalones o perfiles de PVC). Se puede recuperar su plena funcionalidad con una mínima intervención.
2. **Daños ligeros a moderados.** El edificio presenta afectación de los elementos exteriores, combustión de alguna de las habitaciones pero la mayor parte no sufre daños. La estructura no se ve alterada. Se puede recuperar con obra y reacondicionamiento del interior y exterior.
3. **Daños severos.** La vivienda ha sufrido notables daños en el exterior y gran parte del interior ha sido afectado, con muchas o todas las habitaciones quemadas. No obstante la cubierta, forjados, muros y paredes siguen en pie sin muestras de afectación estructural. Puede recuperarse su funcionalidad tras obras de mayor magnitud y un reacondicionamiento completo del interior.
4. **Destrucción completa.** La edificación tiene la cubierta colapsada y puede que también algunas de sus paredes o muros, presenta daños estructurales irreparables. No es posible su reutilización y se recomienda su demolición.

Cada uno de los niveles tiene asociado un color para su fácil interpretación en mapas y tablas. De acuerdo a esta clasificación, se ha encontrado la siguiente distribución de niveles de afectación en los edificios en el sector 8 de Mati:

	Afectación	K	Descripción	n
	1	0	Sin daños apreciables	55
	2	1	Daños ligeros a moderados	41
	3	4	Daños severos	28
	4	9	Destrucción completa	68

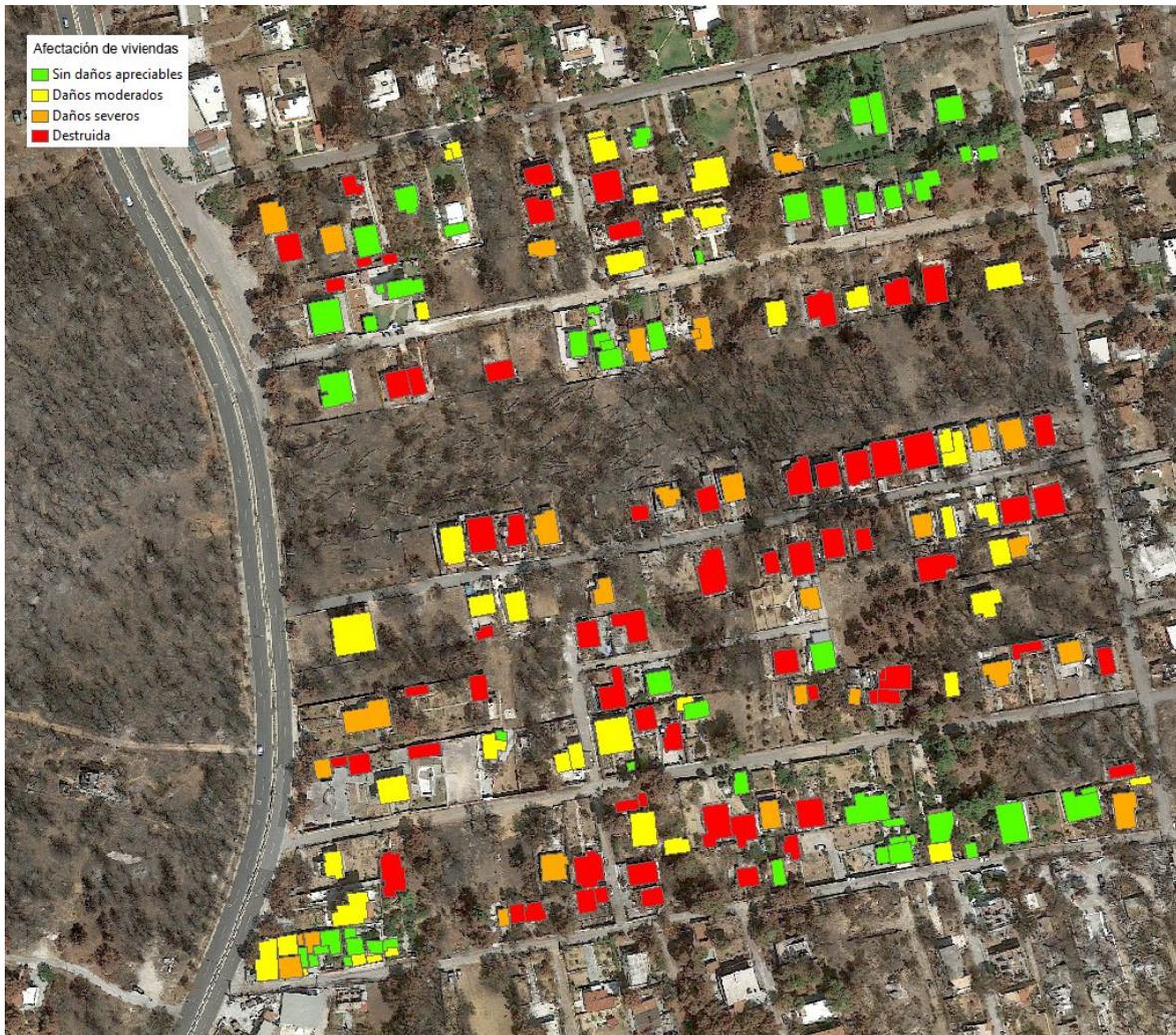
Como se puede comprobar, el 50% de las edificaciones (96) fueron severamente afectadas o totalmente destruidas y la otra mitad resultó sin daños apreciables o con afectación moderada. Aunque las tipologías de edificación varían bastante, en este sector preponderan las viviendas unifamiliares, con cubierta a dos o cuatro aguas, tejado de teja árabe y cerchas y carpintería exterior de madera.

Para los niveles de afectación 1 (sin daños) o 4 (destruido) la evaluación *de visu* es relativamente sencilla; pero esta subjetividad limita algunas veces la capacidad de discernir entre las clases intermedias, más en particular entre la 2 (daños moderados) y 3 (daños severos). Un análisis en profundidad de la afectación y un protocolo de evaluación pueden evitar parte de esta incertidumbre debida a la subjetividad de una revisión rápida *de visu*.

Con el fin de asignar un valor cuantificable ( $K$ ) a cada vivienda, se ha propuesto un método de puntuación en función del nivel de afectación ( $A$ ) mediante la expresión:

$$K = (A - 1)^2$$

Así, tanto el nivel de afectación ( $A$ ) como su cuantificación ( $K$ ) se asocian a cada edificación y a la superficie de terreno que ocupan. Este mapa resultante es el que se tomará como referencia para los procesos de validación propuestos.



Grado de afectación de las 192 edificaciones en el sector S08 del incendio de Mati, de acuerdo a lo observado *in situ* y su posterior revisión en la ortofoto. Mientras que los casos 1 (sin afectación) y 4 (completamente destruido) son claros, los casos intermedios (2 afectación moderada y 3 afectación severa) son más difíciles de clasificar con exactitud, ya que se aplican procedimientos subjetivos de evaluación de daños. Este mapa se toma como referencia para la validación del índice WUIX y sus componentes.

#### Validación del índice WUIX por afectación territorial

En este proceso de validación se utiliza la cuantificación de la afectación ( $K$ ) asociada a la geometría de cada una de las viviendas para obtener una espacialización territorial de la misma que sea coherente con el análisis que realiza WUIX, es decir, traducirlo al espacio de celdas cuadradas de una malla fina y de una malla gruesa. De esta manera se podrán comparar entonces el índice WUIX y la afectación territorial resultante de manera coherente y significativa. Para ello se procede primero a convertir la geometría vectorial de cada edificio (planta de la superficie construida) en celdas raster correspondientes a la malla fina de resolución  $R_p$ , asociando a cada una la cuantificación  $K$  de su grado de afectación. Después, para cada celda de la malla gruesa, se agregan todos los valores  $k_i$  correspondientes a todas las celdas de la malla fina que son edificación, cada una con su cuantificación de afectación correspondiente. Operando de esta manera se obtiene un valor total de afectación en el que se incorporan las porciones de las superficies ocupadas por los

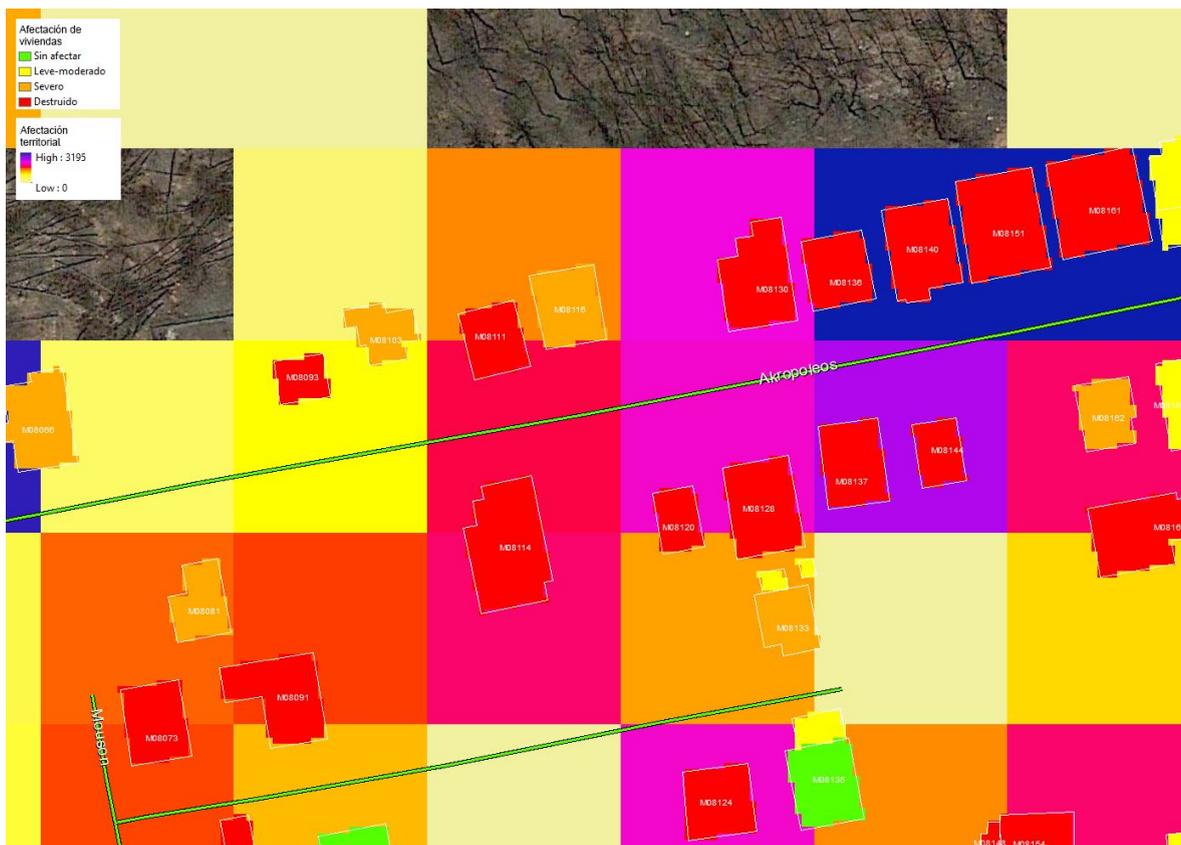
edificios en cada celda de la malla gruesa, cada una contribuyendo con su nivel de afectación. El valor obtenido se divide por la superficie de la celda de la malla gruesa  $S_g$  para obtener así un valor específico de afectación  $K_o$ . Así pues,

$$K_g = \sum_{i=1}^{N^2} k_i \quad K_o = K_g/S_g$$

donde

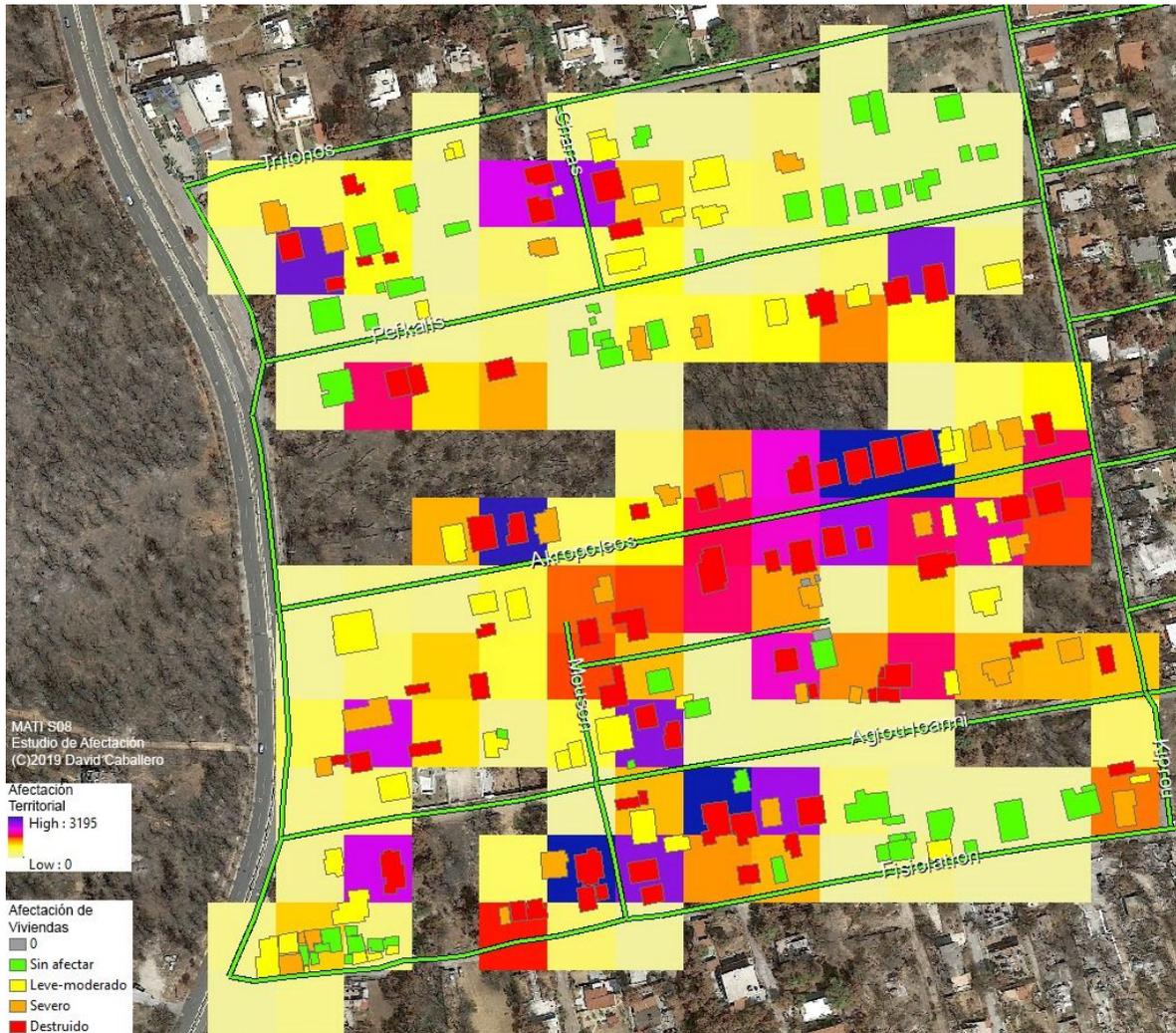
- $K_g$  Valor de la afectación territorial para cada celda de la malla gruesa (adim.)
- $k_i$  Valor de la afectación en cada celda de la malla fina que es edificación (adim.)
- $N$  Número de celdas de la malla fina en cada lado de la celda de malla gruesa
- $K_o$  Valor específico de la afectación territorial para cada celda de la malla gruesa ( $m^2$ )
- $S_g$  Superficie de la celda de la malla gruesa ( $m^2$ )

Este mecanismo es muy similar al que se sigue para el cálculo de los valores específicos de la continuidad vegetal  $C_o$ , la fricción  $F_o$  y el índice de interfaz  $W_o$ , refiriéndose además al mismo espacio de análisis (la celda de la malla gruesa), lo cual da coherencia a la comparación y por tanto a la validación.



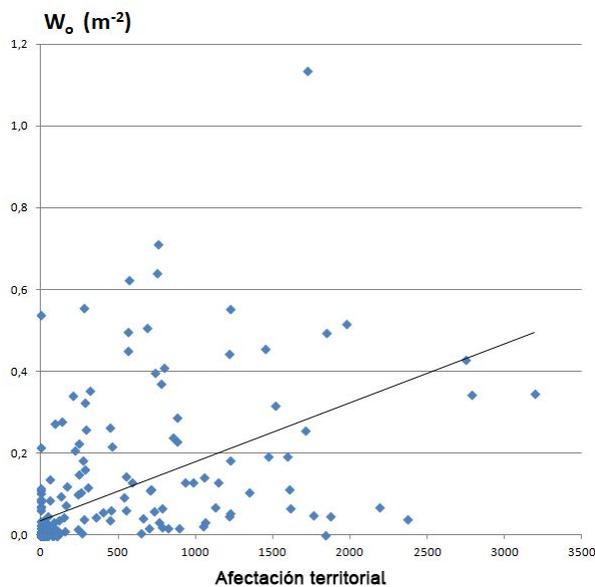
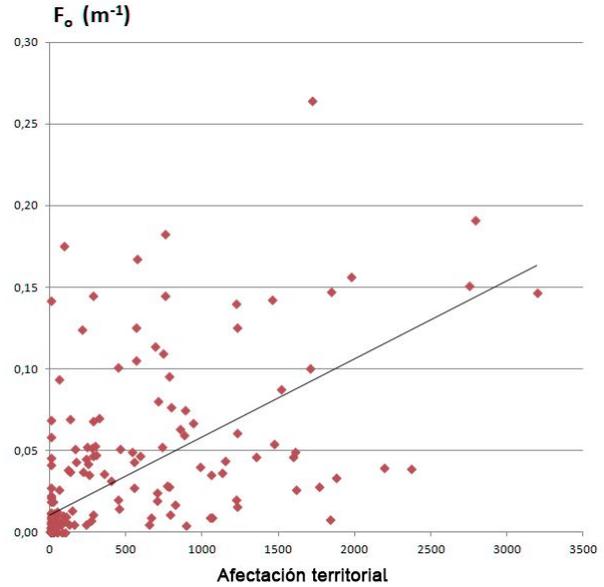
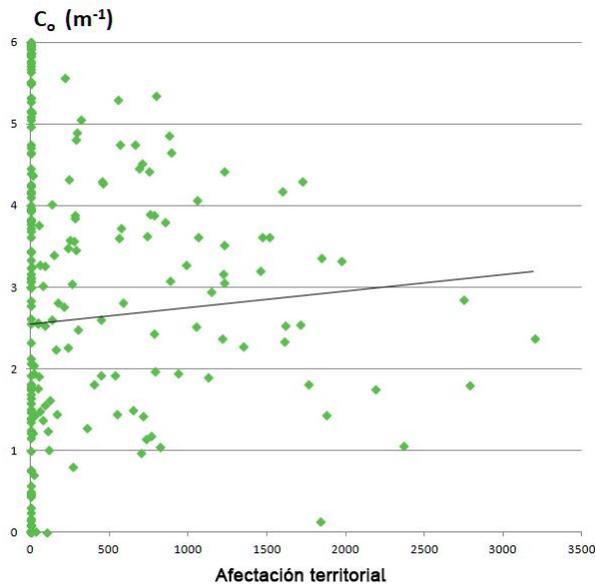
Detalle de la espacialización de la afectación territorial a partir de la evaluación del grado de destrucción de cada una de las viviendas (se muestra su identificador). Como se ve, se asocia una puntuación a cada celda de una malla fina (1 m) y se suman todos los valores en cada celda de una malla gruesa (30 m), muy similar a como se calcula el índice WUIX y sus componentes. De esta manera se pueden comparar coherentemente los valores de afectación territorial con cada uno de los componentes de WUIX y comprobar hasta qué punto son capaces de explicarla. Como se ve, la utilización de una geometría tan rígida como una malla de celdas cuadradas dificulta el análisis de afectación para edificaciones concretas en episodios concretos de incendios.

Aplicando el proceso para todo el área del sector 8 de Mati, con una malla fina de resolución  $R_f=1$  m y con una malla gruesa de resolución  $R_g=30$  m, se obtienen las 255 celdas de la malla gruesa con su afectación territorial correspondiente. El máximo valor para dicha afectación es  $K_x=9 \cdot 30^2 = 8.100$  para una resolución  $R_g=30$  m, valor que no se alcanza en este caso (el máximo observado es 3.195).



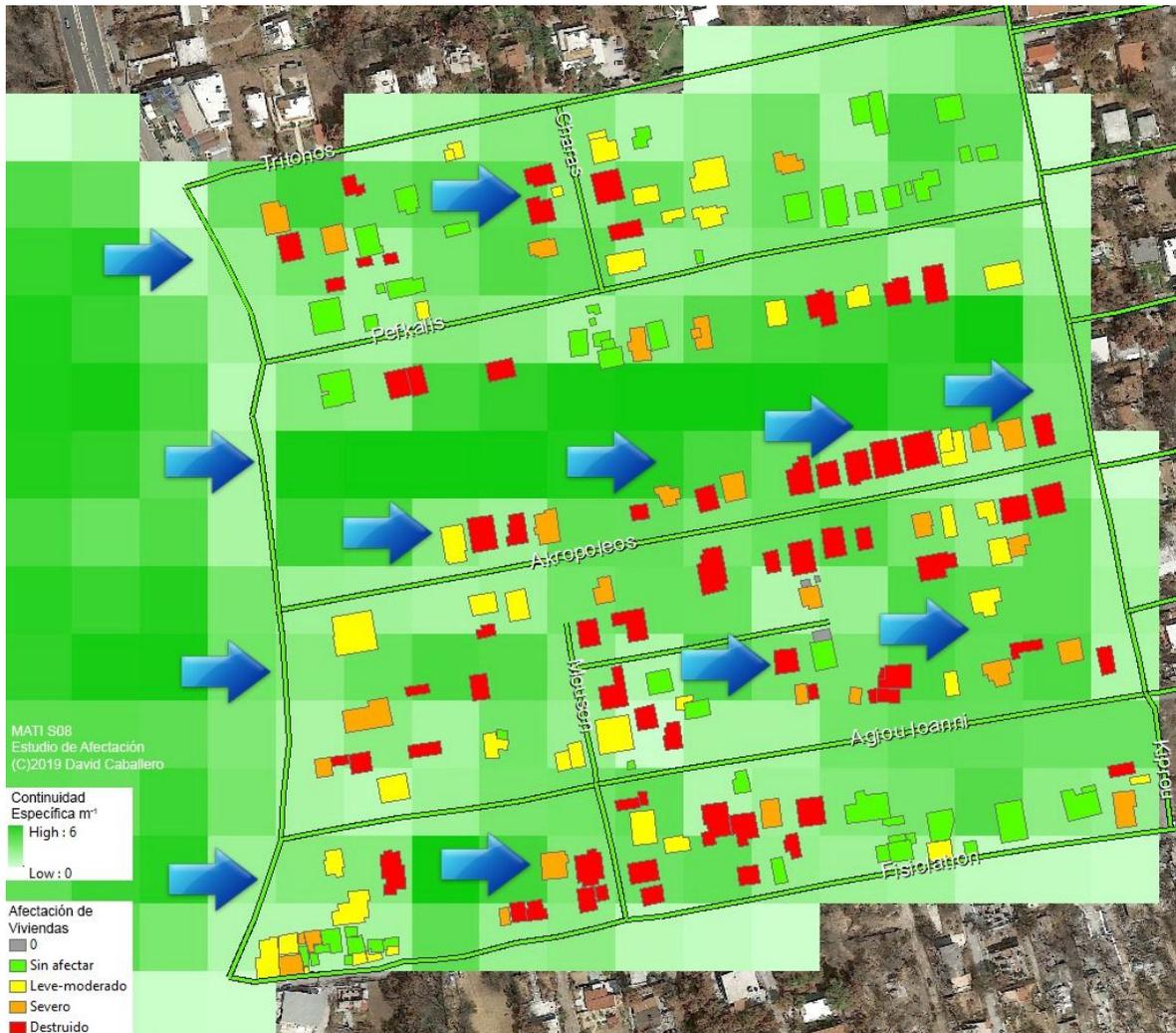
Cómputo del nivel de **afectación territorial** en el Sector 08 de Mati en una malla de referencia de celdas de 30 m de lado, de acuerdo al nivel de destrucción observado en cada una de las viviendas (superpuesto).

Dado que hay una relación espacial biunívoca y exacta entre las celdas del mapa de afectación y las utilizadas en el cálculo del índice *WUIX* y sus componentes, es posible realizar una comparación celda a celda y comprobar hasta qué punto la continuidad y la fricción específicas explican el nivel de destrucción. Hay que tener en cuenta que los incendios forestales no son entornos en los que las variables estén controladas como en un laboratorio, y que tampoco hay una uniformidad en los factores, especialmente en lo referente a tipología de las viviendas y su configuración, con lo que cabe esperar una gran dispersión en la nube de puntos que resulten en las gráficas de comparación entre la afectación y los componentes de *WUIX*.



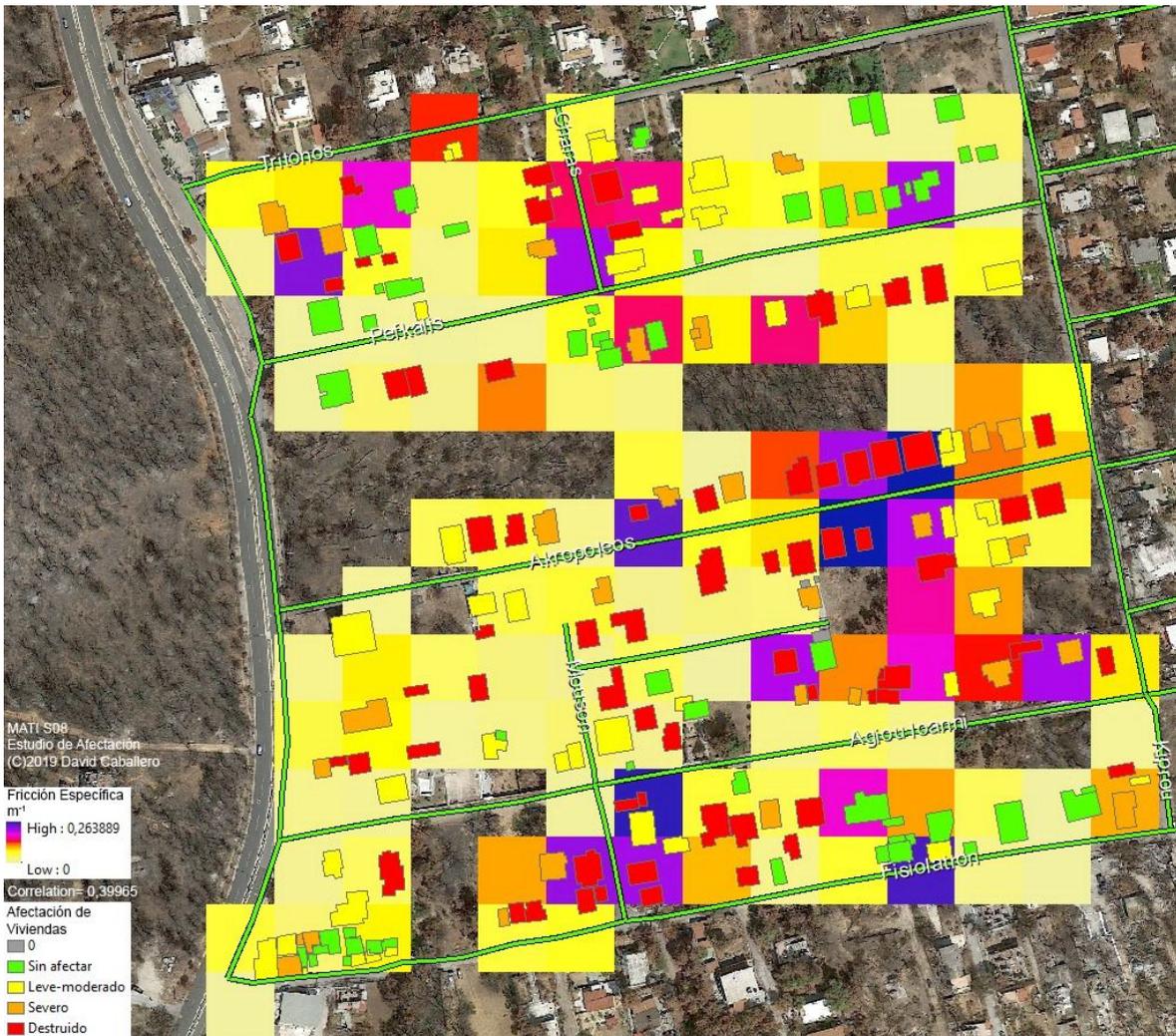
Gráficas que relacionan la afectación territorial con la continuidad específica  $C_o$ , la fricción específica  $F_o$  y el índice de interfaz específico  $W_o$  en cada una de las 255 celdas de la malla gruesa (30 m) para el sector 8 de Mati. Se observa en general una gran dispersión en la nube de puntos, debida en gran parte a que los incendios forestales no son entornos donde las variables que participan en la destrucción estén controlados. También debido a la gran heterogeneidad de tipologías y configuración de las viviendas. En la gráfica de la continuidad específica ( $C_o$ ) se aprecia una convergencia de las mayores afectaciones hacia valores de cobertura vegetal entre el 30% y el 50% del máximo (6), los cuales corresponden a situaciones de *intermix*. Los puntos que aparecen en el eje de ordenadas (afectación nula) incluyen aquellos que no tienen edificación.

La continuidad específica de la vegetación, se separa mucho de la afectación observada. En efecto, es frecuente que la continuidad sea baja allí donde haya viviendas, y que valores intermedios (es decir, para los espacios ocupados parte por edificios y parte por vegetación) estén más relacionados con una mayor destrucción (patrones de *intermix*). Además el cálculo de la continuidad no tiene en cuenta la direccionalidad de la amenaza, como en esta propagación conducida por el viento (hay que recordar que el índice de continuidad es isotrópico, es decir actúa igual en todas las direcciones). En este episodio de Mati es bastante evidente un patrón de destrucción que implica la presencia de zonas de vegetación en celdas cercanas con una continuidad alta situadas frecuentemente a barlovento de las edificaciones más afectadas y alineadas en la dirección predominante del viento.



Representación del patrón de destrucción observado en el sector 8 y su comparación con la **continuidad específica** de vegetación a 30 m de resolución, el cual implica casi siempre zonas de mayor carga de combustible (vegetación más densa) situadas justo a barlovento de las casas más afectadas, en la dirección del viento dominante en ese momento y lugar (las flechas azules indican ese patrón). La continuidad específica del índice WUIX no recoge esta direccionalidad de la amenaza ya que es un cálculo isotrópico (se aplica de la misma manera en todas las direcciones, no ponderando ninguna de ellas). Además, en este episodio, el ligero ángulo del eje de las parcelas y las calles con respecto a la dirección W-E contribuyó a exponer con más eficiencia la parte trasera de las edificaciones, situadas a ambos márgenes de las parcelas, al impacto de las llamas, que corrían principalmente por el centro de las mismas (configuración en «tubo»). Además, un patrón tan permeable de interfaz dejó pasar la propagación, que se vio mayorada por la proyección de pavesas y aparición de focos secundarios en cabeza. Por lo que se aprecia en los vestigios, el proceso se repitió (a saltos) hasta llegar al mar.

Con respecto a la fricción, es interesante observar que zonas con alta fricción específica (según WUIX) fueron severamente afectadas. Pero asimismo se comprueba que otras muy afectadas no presentan tanta fricción (o ninguna en absoluto). Hay que recordar que en el caso de Mati hubo una huida en el último momento y, muy probablemente, se dejaron las ventanas o puertas abiertas en muchos casos. Además, como se ha comentado, no se tiene en cuenta el tipo de edificación ni sus materiales; tampoco se tiene en cuenta la fricción con otros objetos y materiales cercanos ni el efecto de la combustión post-frontal. Por ello, el componente de fricción de WUIX es conceptualmente robusto, pero en general sub-predice la afectación si no se consideran estos y otros factores ni procesos.



*Cálculo de la fricción específica (en  $m^{-1}$ ) correspondiente a la malla gruesa de 30 m para el sector 8 de Mati. Se obtiene a partir de la suma de todas las fricciones encontradas (con resolución 1 m) entre vegetación y edificaciones y su división por el área de referencia (en este caso  $900 m^2$ ). Es interesante comparar este mapa con el de afectación territorial y comprobar el nivel de predicción de este componente. Apréciase que muchas de las zonas más afectadas presentan además alta fricción específica, pero esto no ocurre en todas. Estos descuadres son debidos a muchos otros factores que participan en la destrucción, incluyendo entrada de pavesas por ventanas abiertas o la combustión post-frontal de objetos y materiales pegados a las fachadas. La fricción es un buen indicador, pero en general sub-predice la afectación potencial.*

Finalmente, el índice WUIX específico refleja un esquema y una relación muy parecida a la encontrada para el caso de la fricción, salvo que en algunos puntos de más baja continuidad (zonas de tejido más urbano) su valor es consecuentemente más bajo, mostrando casos en los que la destrucción ha sido alta. Este hecho manifiesta que valores intermedios de WUIX (con una continuidad media o baja y con algo de fricción), que pueden perfectamente referirse a situaciones de *intermix*, pueden llevar asociados altos niveles de afectación. De todo este análisis se deduce que el índice WUIX y sus componentes dan una buena primera orientación a la hora de predecir el nivel de afectación territorial pero que, en general, subestiman esta destrucción particular de edificios ya que, como se ha comentado, hay otros factores y procesos que también participan y que no se consideran. A la vista de estos resultados es necesario realizar más comparaciones como la presentada, con mayores muestras de viviendas afectadas y, en la medida de lo posible, incorporar datos de entornos experimentales (p.e. laboratorio) en los que las variables estén más controladas.

### Validación del índice WUIX por agregación orientada a viviendas

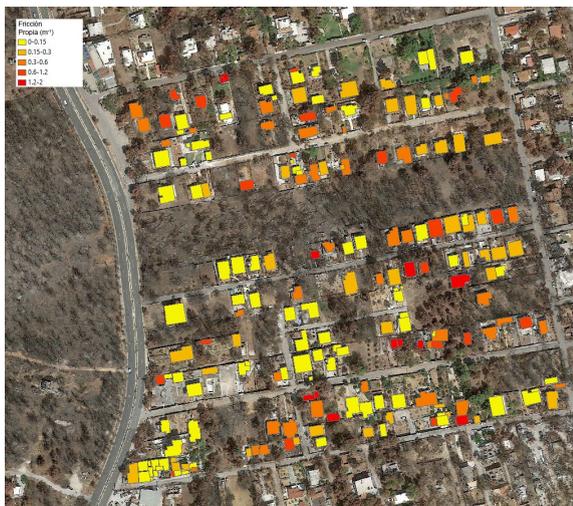
Una segunda aproximación a la validación del índice WUIX y sus componentes implica la utilización de los espacios de análisis asociados a cada una de las viviendas, en particular para el estudio de la continuidad de la vegetación y la fricción. Mientras que la primera está ligada a una superficie alrededor del edificio (habitualmente una zona *buffer* de 30 m correspondiente al área de ignición o HIZ), la segunda está íntimamente ligada al contorno de la vivienda. Así, continuidad y fricción son magnitudes espacialmente disociadas, con lo que el análisis implica la utilización de dos superficies de referencia: la zona *buffer* alrededor de la vivienda y la superficie construida. Esta aproximación permite comparar así dichos factores e índices con el nivel de afectación observado en cada una de las edificaciones.



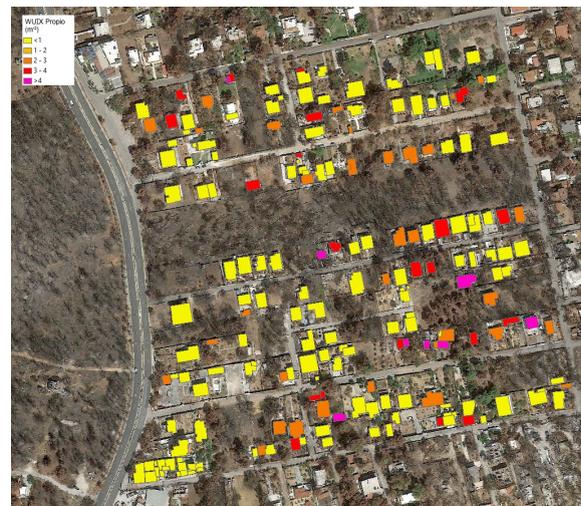
Nivel de afectación de cada edificio en el S08 Mati de acuerdo a lo observado in situ.



Continuidad propia de vegetación en un buffer de 30 m alrededor de cada una de las viviendas en el S08 Mati.

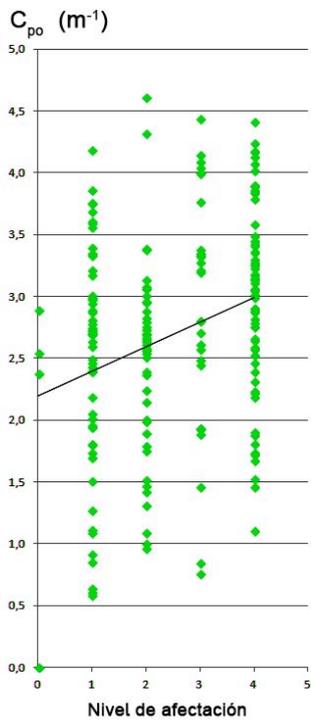


Fricción propia de cada una de las viviendas con la vegetación inmediata en el S08 Mati.

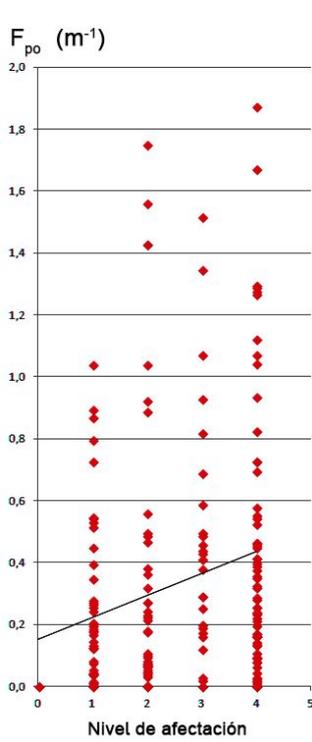


Índice WUIX propio de cada vivienda, como resultado del producto de la continuidad y fricción propias.

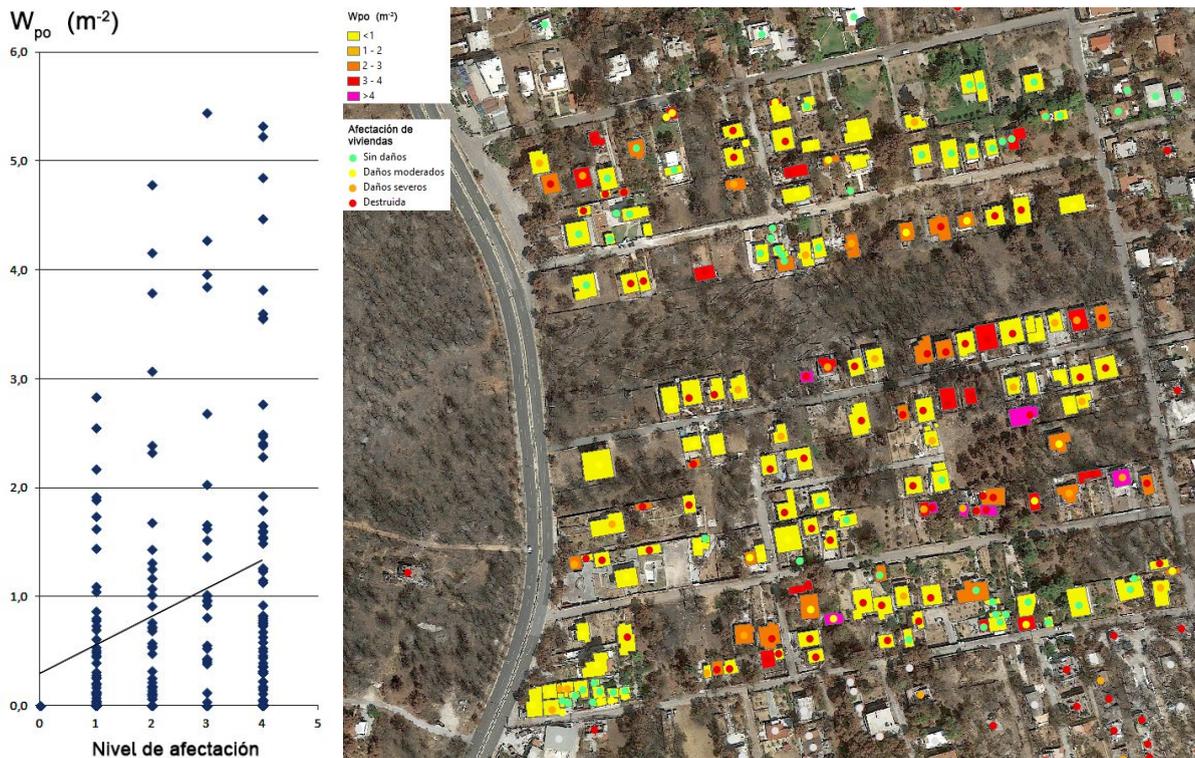
Utilizar el método de agregación orientada a viviendas, asociando los valores propios de la continuidad de vegetación y de la fricción, permite estudiar y posteriormente mejorar la capacidad predictiva de la afectación de edificios concretos, mediante la paulatina incorporación de otros factores y variables propios de la vivienda y que participan en los procesos de afectación (como por ejemplo el tipo de cubierta, acristalamientos, fecha de construcción o la configuración de las ventanas), a medida que se vayan teniendo datos.



Continuidad específica propia de la vegetación y nivel de afectación (puntos).



Fricción específica propia y nivel de afectación (puntos).



Índice WUIX específico propio y nivel de afectación (puntos).

A efectos de facilitar la comparación, se representan la continuidad específica propia y la fricción específica propia así como el índice *WUIX* específico propio de cada vivienda junto con el nivel de afectación observado (pequeño círculo encima de cada casa). Asimismo se presentan las gráficas que relacionan cada uno de los componentes con este grado de destrucción y de ellas se pueden derivar algunas conclusiones. Si se observa la gráfica de continuidad específica propia  $C_{op}$  (m<sup>-1</sup>) de la vegetación alrededor de la vivienda comparada con el nivel de afectación, se comprueba que, como en el método anterior, hay una gran dispersión de puntos. No obstante esta aproximación explica mejor el efecto de la alta o muy alta continuidad de vegetación en los alrededores de las viviendas que han sido severamente afectadas o destruidas. Particularmente en el nivel 4 de afectación, los valores de  $C_{op}$  entre 3 y 4 m<sup>-1</sup> registran el mayor número de viviendas destruidas, y un número también significativo entre 4 y 5 m<sup>-1</sup>. De esta manera el análisis de la vegetación en el *buffer* de 30 m recoge en cierto modo el efecto observado de presencia de vegetación más densa a barlovento de las edificaciones más afectadas. La gráfica de fricción específica propia  $F_{op}$  (m<sup>-1</sup>) comparado con el nivel de afectación indica así mismo una gran dispersión de puntos, en un escenario en el que la fricción es baja o moderada (el valor máximo apenas llega a 2 m<sup>-1</sup>). No obstante se puede deducir en cierto modo que los mayores valores de fricción (por encima de 1 m<sup>-1</sup>) tienen asociados algunos casos de niveles 3 y 4 de destrucción. Con esta gráfica queda patente que, como se ha comentado, no es necesaria una gran fricción para obtener una afectación importante, pero una alta fricción supone una mayor probabilidad de que esto ocurra, especialmente cuando se sitúa en la dirección de la que proviene la amenaza. En cierto modo la fricción cuantifica el verdadero interfaz entre la vegetación y la edificación, en el dominio de la microescala. Finalmente, el índice *WUIX* específico propio (m<sup>-2</sup>) queda notablemente afectado por la fricción, y las consideraciones que se han hecho son también aplicables, si bien se aprecia cierta tendencia a acumular más casos de nivel de afectación 4 para valores por encima de 2 m<sup>-2</sup>. Con ello se deduce que tanto *WUIX* como sus componentes tienen tan solo cierta capacidad predictiva del nivel de afectación de las viviendas individuales.

## Mejoras

El índice *WUIX* y sus componentes son un buen primer paso para la caracterización del territorio respecto a su capacidad para conducir el fuego y afectar las viviendas mediante la aplicación de una sencilla rutina de cálculo y utilizando dos capas de información de fácil elaboración. No obstante a lo largo de este texto se han ido subrayando algunas importantes limitaciones que a su vez pueden ser objeto de mejoras en futuras versiones.

La primera y quizás más importante es que se incorpore un análisis tridimensional completo y verdadero de la relación topológica entre la vegetación y las viviendas. Esta aproximación implicaría la descripción de espacios volumétricos constituidos por celdas cúbicas unitarias de una resolución dada (referidas anteriormente como *voxels*) que podrían ser aire, terreno, vegetación o edificación cada una. Desde el punto de vista geométrico la aproximación para el análisis sería muy similar a la presentada aquí, considerando en este caso 6 facetas, 12 aristas y 8 vértices correspondientes a las 26 celdas vecinas. Tanto la continuidad como la fricción se medirían en  $m^2$  ya que para este caso los valores unitarios se referirían a superficies. Se aplicaría el mismo artificio que el explicado para las esquinas en dos dimensiones, en este caso considerando la superficie de un cuarto de vuelta de una superficie cilíndrica alrededor de cada arista y de un octavo de superficie esférica para cada vértice, correspondientes a una superficie envolvente separada un tercio de la longitud de la arista del cubo unitario. El resto de los cálculos sería muy similar, pero esta vez aplicando un autómata celular espacial que fuera encontrando las contigüidades entre las celdas-vegetación con las celdas-vegetación (continuidad vegetal) y entre las celdas-vegetación con las celdas-edificio (fricción) en tres dimensiones. La mayor dificultad radicaría en la obtención de escenas 3D con suficiente detalle que reflejaran con precisión casos reales, dado que las resoluciones de los *voxels* unitarios deberían estar entre 1 y 2 m. Técnicas de fotogrametría desde drones o LIDAR muy local podrían resolver este reto para pequeñas extensiones de mesoescalas.

La segunda apunta a la más que evidente necesidad de ir hacia un modelo que incorpore los factores y procesos fundamentales en la combustión de los elementos más cercanos a la vivienda, deduciendo así la geometría tridimensional de las llamas resultantes y derivando por tanto su efecto potencial sobre las edificaciones, ya sea por la radiación o por el contacto de la propia llama (y ya no necesariamente de la vegetación como en *WUIX*). El establecimiento de umbrales de flujo de calor radiante incidente marcaría el límite de lo que se consideraría «fricción térmica» (por ejemplo,  $40 \text{ kW/m}^2$  para edificaciones) que sería el sustituto de la «fricción física» de la vivienda con la vegetación considerada en índices como *WUIX*. El cálculo del factor de forma<sup>17</sup> jugaría un papel primordial para establecer la verdadera relación topológica entre las fuentes potenciales de calor y las superficies de la vivienda. En este sentido se pondría de manifiesto con más realismo la importancia de la distancia de la vegetación y otros elementos combustibles en escenarios concretos de topografía y viento, indicando asimismo la direccionalidad de la amenaza, cosa que un índice isométrico como *WUIX* no considera. Además, un modelo de radiación subrayaría el

---

<sup>17</sup> El factor de forma o factor de intercambio de radiación es la fracción de la energía emitida por una superficie que llega a otra. Se trata de un factor puramente geométrico que implica la posición y orientación relativas de las superficies del cuerpo emisor y del cuerpo receptor.

efecto de la distribución de la carga de combustible y su posición con respecto a la vivienda y relativo a la topografía y vientos considerados en el análisis. Un modelo de radiación tridimensional completo pondría de relieve además algunos fenómenos que de otra manera serían difíciles de interpretar, como por ejemplo el efecto de apantallamiento de las propias edificaciones o de la vegetación sobre el flujo de calor radiante que provenga de una fuente distante. Una de las mayores dificultades de esta aproximación es la obtención de la distribución detallada en tres dimensiones de las cargas y otras características del combustible en la mesoescala. Este dato requeriría procesos de muestreo sofisticados en campo y su correlación con modelos tridimensionales de su distribución en extensiones de cierta magnitud. Como alternativa se podrían utilizar idealizaciones tridimensionales de «unidades de combustible» de catálogo (árboles, matorrales, elementos de jardinería, otros objetos) cuya geometría y distribución del combustible se describa con detalle, para incorporarlas después en las posiciones de las plantas y otros objetos reales que los sustituyen. Aparte de ello, la obtención de las dimensiones de la llama resultante no sería un proceso sencillo, salvo que se utilicen modelos semi-empíricos de propagación (Rothermel, 1972 y 1983) e intensidad lineal (Byram, 1959; Alexander, 1980), que trabajan con modelos de simplificados combustible de superficie; o bien que, alternativamente, se utilicen los resultados de experimentación sobre combustión en laboratorio u observación en campo de incendios reales. Esto es especialmente relevante para elementos de jardinería, sobre todo los setos, cuyo comportamiento frente al fuego y combustión no son todavía muy bien conocidos y para los que el modelo de Rothermel no es directamente aplicable.

## Conclusiones

El índice topológico WUIX utiliza los valores estimados de continuidad de la vegetación y su fricción con edificaciones para ayudar a una primera clasificación de las tipologías de interfaz urbano-forestal, obtener su distribución y encontrar su posible relación con los niveles de afectación territorial en caso de incendio. Para ello utiliza dos mapas fáciles de obtener, uno de vegetación y otro de edificaciones, y aplica un sencillo autómata celular bidimensional que calcula el índice y sus componentes para cada punto de una malla de celdas cuadradas. Los resultados pueden agregarse y referirse después a otras superficies de análisis, como mallas más gruesas, el entorno que rodea a las viviendas (*buffer*) o los límites administrativos de urbanizaciones. Así es posible comparar diferentes zonas del territorio, identificar patrones y asociarlos a un posible nivel de afectación, de acuerdo a lo observado incendios pasados. No obstante, la utilización de geometrías rígidas, como las mallas cuadradas, tienen limitaciones y efectos asociados que es necesario tener en cuenta, ya que pueden desvirtuar el análisis del territorio y, más especialmente, el estudio de afectación de viviendas. Además el concepto de fricción se limita al contacto entre celdas-vegetación con celdas-vivienda, no recogiendo el efecto a distancia de la radiación o del contacto de llama ni la direccionalidad de la amenaza. Por tanto, aunque el índice WUIX ayuda a establecer una aproximación racionalizada al estudio y caracterización de los patrones de interfaz, es todavía necesario ampliar el análisis de un fenómeno claramente tridimensional e incorporar los procesos locales de combustión y la descripción de la geometría de la llama en las cercanías de las edificaciones, especialmente la debida a los combustibles más cercanos, para mejorar la capacidad predictiva del índice sobre los niveles de afectación potencial.

## Agradecimientos

Quisiera agradecer al Cuerpo de Bomberos de la Comunidad de Madrid su apoyo para el desarrollo e implementación de las primeras versiones del índice *WUIX* en el cálculo de la vulnerabilidad de las zonas de interfaz en esta comunidad autónoma. También agradecer al Dr. Gavriil Xanthopoulos (DEMETER) y a Miltiadis Athanasiou su disposición a ayudarme, acompañarme y asistirme en las labores de campo en el post-desastre del incendio de Mati, del cual hemos extraído valiosas lecciones. Y finalmente agradecer al Dr. Giuseppe Mariano Delogu su paciencia con la lectura de los diversos borradores de este documento y por indicarme algunos interesantes lugares de interfaz en Cerdeña que han servido de casos de estudio y validación del índice.

## Referencias

- ALEXANDER, M. E. (1982) *Calculating and interpreting forest fire intensities*. Can. J. Bot. 60: 349-357.
- BYRAM, G. M. (1959) *Combustion of forest fuels*. In Forest fire: control and use. Edited by K. P. Davis. McGraw-Hill, New York. pp. 61-89.
- CABALLERO, D. BELTRAN, I. (2003) *Concepts and ideas of assessing settlement fire vulnerability in the W-UI zone*. En proc. del II International Workshop on Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe. WARM project Atenas, Grecia, 15 mayo.
- CABALLERO, D. (2006) *Taxicab geometry: some problems and solutions for square grid-based fire spread simulation*. Forest Ecology and Management 234 (1), S98.
- COHEN, J.D. (2000) *Preventing disaster: home ignitability in the wildland urban interface*. Journal of Forestry, 98(3), pp.15-21.
- ROTHERMEL, R.C. (1972) *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.
- ROTHERMEL, R.C. (1983) *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 161 p.

## Anexo 1. Utilización del programa de cálculo

El algoritmo de cálculo ha sido desarrollado en *RealBasic* y compilado para entornos Windows como una aplicación de consola<sup>18</sup>. El programa se invoca por el nombre de su ejecutable (WUIX2.exe) seguido del modificador *GR* que especifica el número de celdas de paso fino que constituyen la malla de paso grueso. Los modificadores vienen siempre precedidos por una barra hacia adelante (/). La línea de comando quedaría por tanto:

WUIX2 /GR=N

donde *N* es un número entero que va de 3 a 100. Si *N* es menor que 3 o si no se especifica, el programa no computa los cálculos asociados a la malla gruesa. Si *N* es mayor que 100 el programa asume que *N* es 100.

El programa espera dos ficheros en formato raster ASCII de ArcMap, uno de vegetación (veget.asc) y otro de edificaciones (casas.asc). Ambos ficheros han de tener la misma extensión, el mismo número de filas y columnas y la misma resolución. La resolución especificada en los ficheros se asume que es la resolución de la malla de paso fino. El separador decimal de los valores de las celdas ha de ser el punto.

Todos los resultados se escriben asimismo en formato raster ASCII de ArcMap, con el mismo cabecero que los datos de partida. Los ficheros correspondientes a la continuidad de vegetación comienzan por **CONT**; los correspondientes a la fricción empiezan por **FRIC**; los relativos a la trama urbana con **URBA**; y los resultados sobre el índice de interfaz empiezan con **WUIX**. El programa escribe cuatro ficheros para cada uno de ellos. Los valores unitarios (en m para CONT, URBA y FRIC; en m<sup>2</sup> para WUIX) se especifican como **UNIT**; los valores normalizados (adimensional, de 0 a 100) como **NORM**; los valores totales de la malla gruesa se escriben como **TOTAL** (en m para CONT, URBA y FRIC; en m<sup>2</sup> para WUIX); y los valores específicos se escriben como **SPEC** (en m<sup>-1</sup> para CONT, URBA y FRIC; en m<sup>-2</sup> para WUIX). Además, para facilitar la organización de los ficheros, el programa añade la resolución de la malla fina  $R_f$  al nombre del fichero, seguida por la resolución de la malla gruesa  $R_g$ . En todos los ficheros, los puntos sin datos se especifican como -9999. Cada vez que se ejecuta el programa se reescriben los ficheros en el mismo directorio en donde se encuentra el ejecutable, sin preguntar al usuario. Por ello es recomendable que en caso de que se quieran guardar los resultados de varios cálculos se proceda a renombrar los ficheros de salida antes de volver a ejecutar la aplicación.

Además, el programa admite el modificador /OV=X que se escribe en la línea de comando a continuación separado por un espacio, donde X es 0, 1 o 2. Este modificador permite realizar diferentes modos de cálculo de situaciones de solape, siendo 0 el valor por defecto y para el que se añade la fricción de la vegetación sobre los tejados. El valor 1 da prioridad a los edificios, anulando la presencia de vegetación encima. El valor 2 da prioridad a la vegetación, anulando la presencia de los edificios por debajo en los puntos de solape.

---

<sup>18</sup> La aplicación y algunos datos de ejemplo se pueden descargar libremente de [www.davidcaballero.com/apps/wuix2.zip](http://www.davidcaballero.com/apps/wuix2.zip) para uso académico e investigación. Su utilización comercial está restringida.

## Anexo 2. Tabla de valores máximos de normalización

Los valores máximos de la continuidad ( $C_x$ ), fricción ( $F_x$ ) e índice WUIX ( $W_x$ ), según el número de celdas  $N$ , son:

N	$C_x$	$F_x$	$W_x$
3	54	25	1.350
4	96	40	3.840
5	150	65	9.750
6	216	90	19.440
7	294	125	36.750
8	384	160	61.440
9	486	205	99.630
10	600	250	150.000
15	1.350	565	762.750
20	2.400	1.000	2.400.000
25	3.750	1.565	5.868.750
30	5.400	2.250	12.150.000
40	9.600	4.000	38.400.000
50	15.000	6.250	93.750.000
100	60.000	25.000	1.500.000.000

$$C_x = 6 \cdot N^2$$

Para el caso N par:  $N_N = N^2 / 2$

Para el caso N impar:  $N_N = (N^2 + 1) / 2$

$$F_x = 5 \cdot N_N$$

$$W_x = C_x \cdot F_x$$

### Anexo 3. Clasificación tipificada de situaciones de interfaz

Para la sistematización de la clasificación de tipologías de interfaz, se consideran las siguientes clases de continuidad urbana  $U_o$  ( $m^{-1}$ ):

I	Sin edificar	$U_o = 0$
II	Aislado	$0 < U_o \leq 1,5$
III	Diseminado	$1,5 < U_o \leq 3$
IV	Intermix	$3 < U_o \leq 4,5$
V	Urbano	$U_o > 4,5$

Asimismo, se consideran las siguientes clases de continuidad de vegetación  $C_o$  ( $m^{-1}$ ):

A	Sin vegetación	$C_o = 0$
B	Vegetación rala	$0 < C_o \leq 1,5$
C	Vegetación media	$1,5 < C_o \leq 3$
D	Vegetación densa	$3 < C_o \leq 4,5$
E	Vegetación muy densa	$C_o > 4,5$

Con estos valores, se pueden identificar las 25 **clases genéricas de interfaz** de acuerdo a la siguiente tabla (las descripciones corresponden a celdas de 1 ha, con  $R_g=100$ ):

n	Cod	Descripción equivalente (1 ha)	n	Cod	Descripción equivalente (1 ha)
1	IA	Vacío	14	IIID	Diseminado con veget. densa
2	IB	Vegetación rala	15	IIIE	Diseminado con veget. muy densa
3	IC	Vegetación media	16	IVA	Intermix (sin vegetación)
4	ID	Vegetación densa	17	IVB	Intermix con veget. rala
5	IE	Vegetación muy densa	18	IVC	Intermix con veget. media
6	IIA	Aislado (sin vegetación)	19	IVD	Intermix con veget. densa
7	IIB	Aislado con veget. rala	20	IVE	Intermix con veget. muy densa
8	IIC	Aislado con veget. media	21	VA	Urbano (sin vegetación)
9	IID	Aislado con veget. densa	22	VB	Urbano con veget. rala
10	IIE	Aislado con veget. muy densa	23	VC	Urbano con veget. media
11	IIIA	Diseminado (sin vegetación)	24	VD	Urbano con veget. densa
12	IIIB	Diseminado con veget. rala	25	VE	Urbano con veget. muy densa
13	IIIC	Diseminado con veget. media			

La clase 16 en realidad es un diseminado denso, pero se usa el término *intermix* para mantener la coherencia de la clase y simplificar la tabla (ya que *intermix* implica por definición la presencia de vegetación). Se recomienda añadir además un identificador de fricción<sup>19</sup> al código de tipología de interfaz, de acuerdo al siguiente criterio en función del valor de fricción específica  $F_o$  ( $m^{-1}$ )<sup>20</sup>:

Bajo (L) si  $F_o < 0,25$       Medio (M) si  $0,25 \leq F_o \leq 0,5$       Alto (H) si  $F_o > 0,5$

<sup>19</sup> Los códigos de fricción responden a la primera letra de sus homólogos en inglés: L=Low, M=Medium, H=High

<sup>20</sup> Los valores de fricción específica  $F_o$  pueden expresarse también en m/ha sin más que multiplicar por 10.000.

De esta manera el código resultante que identifica cada tipología de interfaz tendrá un número romano que se refiera a la continuidad de la trama urbana, una letra mayúscula que indique la continuidad vegetal seguida de una barra y un código que identifique el rango de fricción entre viviendas y vegetación encontrada en cada celda. Así pues, por ejemplo, el código **IVC/H** significa una situación de *intermix* con vegetación media y con alta fricción.

El código de colores utilizado en la leyenda obedece a las siguientes reglas:

- Un territorio sin vegetación ni edificaciones («vacío») se representa como blanco.
- Para las familias de tonos se sigue el mismo criterio de colores que el utilizado habitualmente en las leyendas, es decir la secuencia verde, amarillo, naranja, rojo y magenta para una presencia creciente de edificios.
- Las clases de vegetación sin edificaciones se representan con tonos verdes.
- Para las clases de  $U_o$  «sin edificios», «aislado» y «diseminado», más oscuro significa más vegetación; para las clases «intermix» y «urbano», más oscuro significa más viviendas.
- La clase C es la central de  $C_o$ , por tanto el color tiene el máximo de saturación y de iluminación de la familia de tono correspondiente.
- Las clases A y B reducen su saturación al 30% y 50% para los casos  $U_o$  de «sin edificios», «aislados» y «diseminados»; y disminuyen su brillo al 33% y 66% en los casos de «intermix» y «urbano». Las clases D y E reducen su brillo al 33% y 66% para los casos  $U_o$  de «sin edificios», «aislado» y «diseminado»; y disminuyen su saturación al 30% y 50% en los casos de «intermix» y «urbano».

La tabla completa de colores para la leyenda de las 25 clases es como sigue:

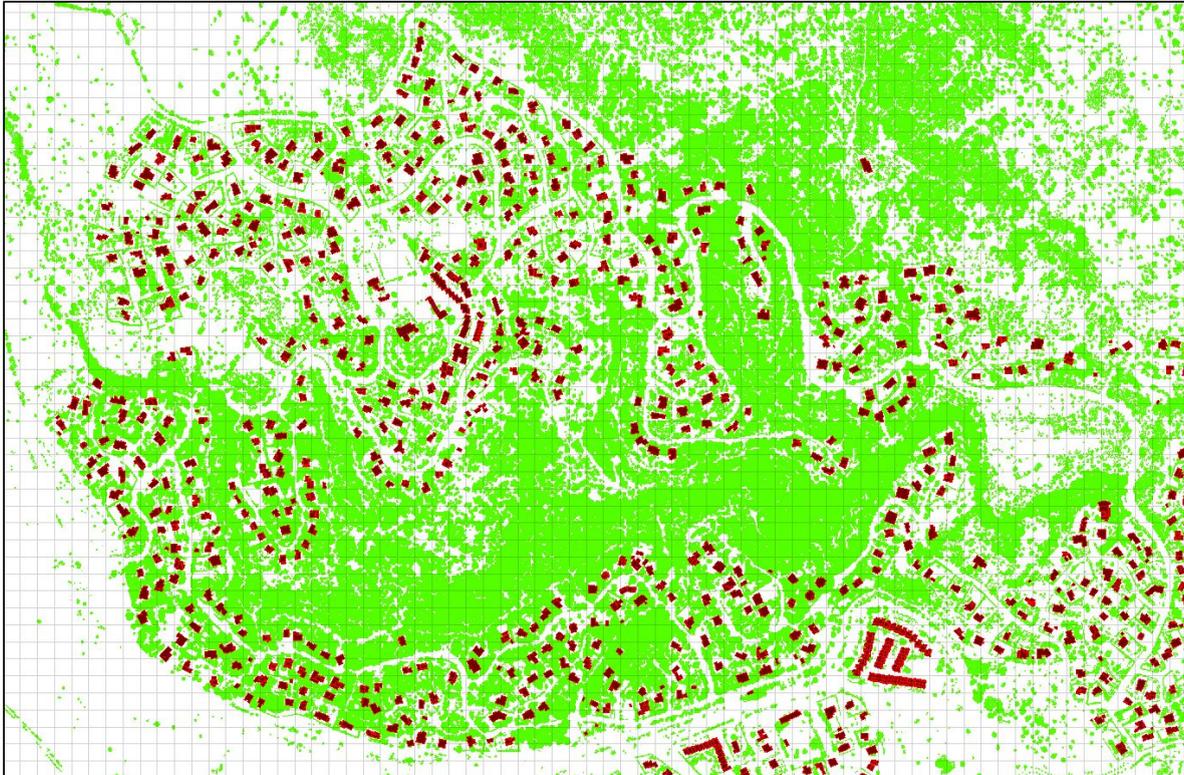
	n	Cod	R	G	B		n	Cod	R	G	B
	1	IA	255	255	255		14	IIID	168	84	0
	2	IB	178	255	178		15	IIIE	84	42	0
	3	IC	0	255	0		16	IVA	84	0	0
	4	ID	0	168	0		17	IVB	168	0	0
	5	IE	0	84	0		18	IVC	255	0	0
	6	IIA	255	255	178		19	IVD	255	128	128
	7	IIB	255	255	128		20	IVE	255	178	178
	8	IIC	255	255	0		21	VA	84	0	84
	9	IID	168	168	0		22	VB	168	0	168
	10	IIE	84	84	0		23	VC	255	0	255
	11	IIIA	255	217	178		24	VD	255	128	255
	12	IIIB	255	191	128		25	VE	255	178	255
	13	IIIC	255	127	0						

Se recomienda en la medida de lo posible utilizar estos códigos de color para obtener mapas que sean comparables y con clases fácilmente identificables.

El programa *WUIX2* genera automáticamente las tipologías de interfaz para la malla gruesa de resolución  $R_g$  de acuerdo a los valores de  $C_o$  y  $U_o$  encontrados y los almacena en el fichero *TiposIUF.asc*. No obstante, estas tipologías no incorporan las clases de fricción.

#### Anexo 4. Algunos ejemplos de tipologías de interfaz

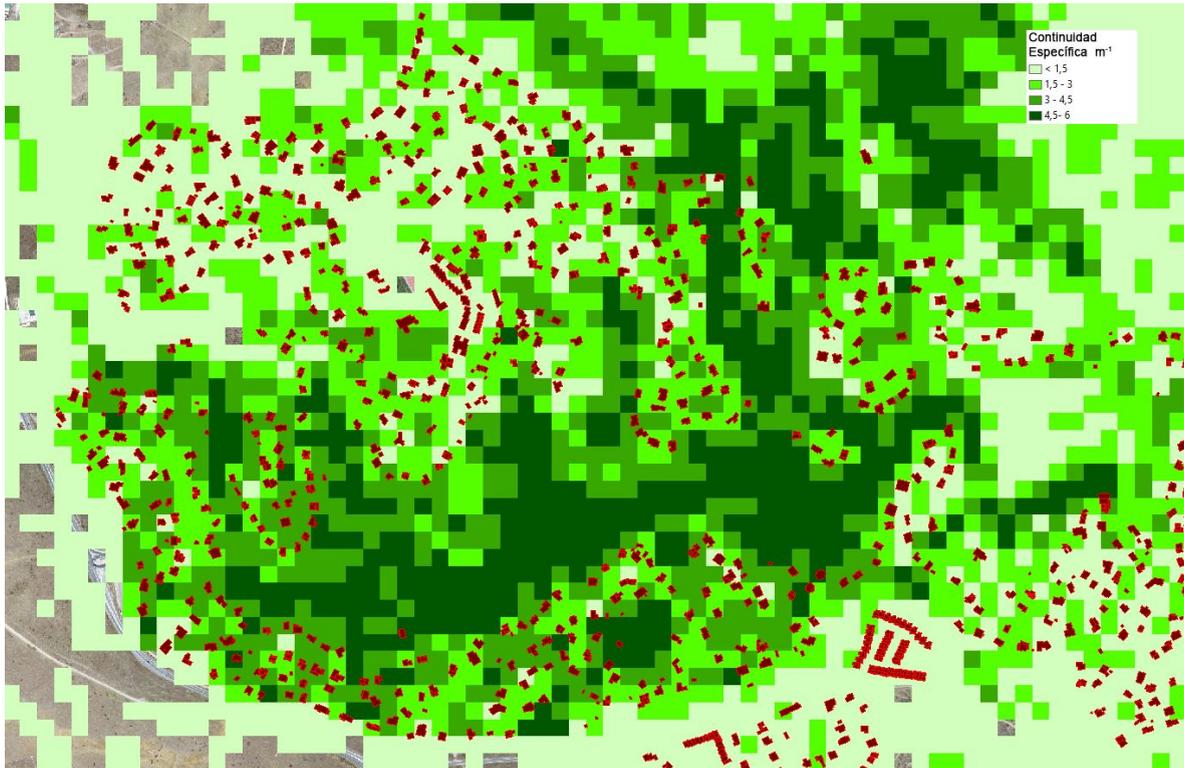
##### Ejemplo 1. Puentelasierra (Comunidad de Madrid, España)



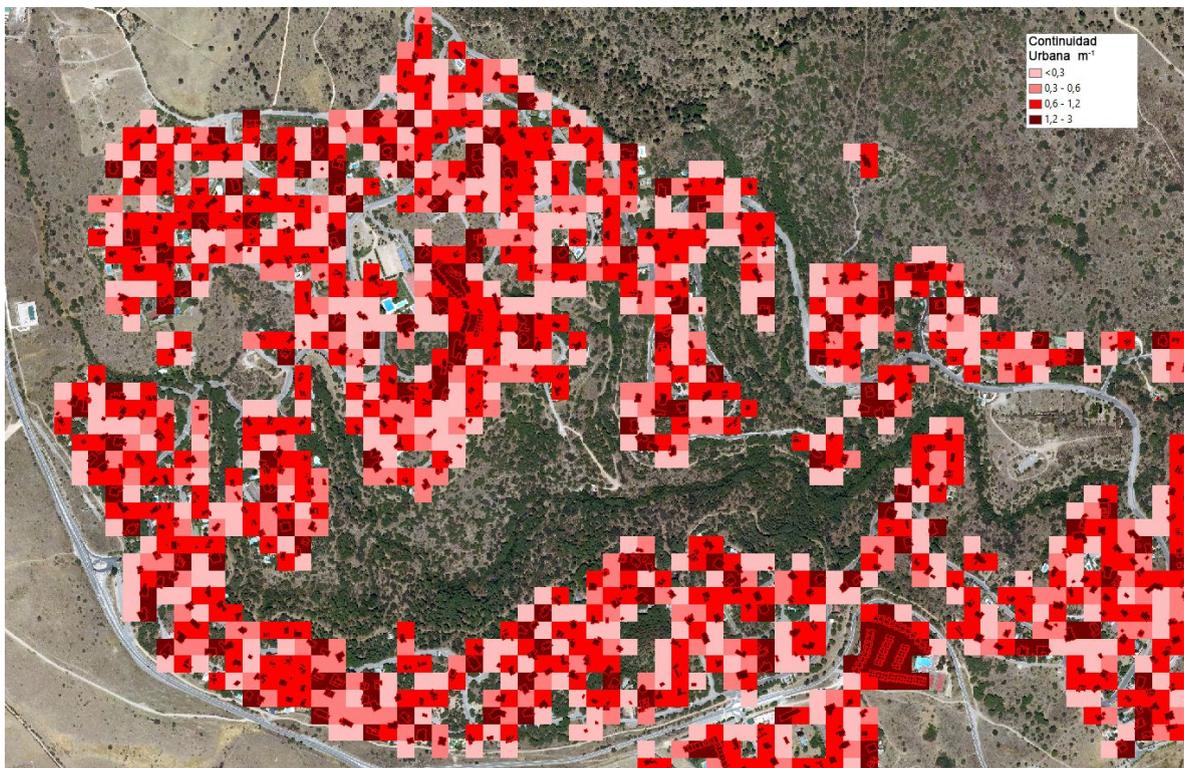
Mapa de mesoescala de la urbanización Puentelasierra a 1 m de resolución, con la presencia de vegetación (en verde) y las viviendas (en rojo). La malla de fondo de celdas de 30x30 m<sup>2</sup> es la utilizada como referencia en el análisis. El área de estudio mostrada cubre 283,5 ha.

$R_g=30$ m	Máximo	Media	Media >0
$C_g$ (m)	5400	2070	2177
$F_g$ (m)	194	6	22
$W_g$ (m <sup>2</sup> )	822657	15643	55574
$C_o$ (m <sup>-1</sup> )	6	2,3	2,4
$F_o$ (m/ha)	2199	70	315
$W_o$ (ha <sup>-1</sup> )	10155	193	687

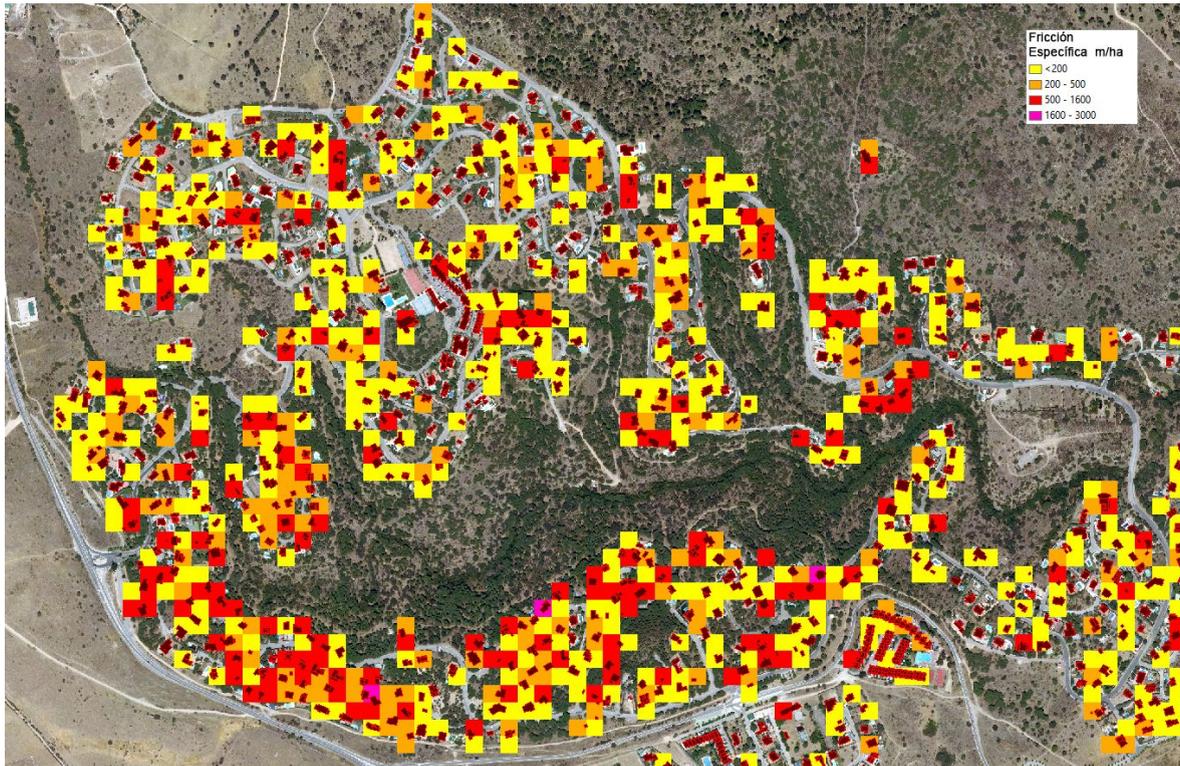
La urbanización «Puentelasierra» se encuentra en el municipio de Valdemorillo en la Comunidad de Madrid. Abarca una extensión aproximada de 100 ha y la integran un total de 460 parcelas de una superficie mínima de 1.000 m<sup>2</sup>, de las cuales tres están destinadas a zonas residenciales de apartamentos y una es la gran zona verde central de 24 ha. Se trata de viviendas de residencia permanente, con casas de buena construcción, materiales y mantenimiento, viarios anchos y asfaltados. Hay algunas parcelas sin construir. Los jardines habitualmente incorporan pinos y encinas, además de una profusa presencia de setos.



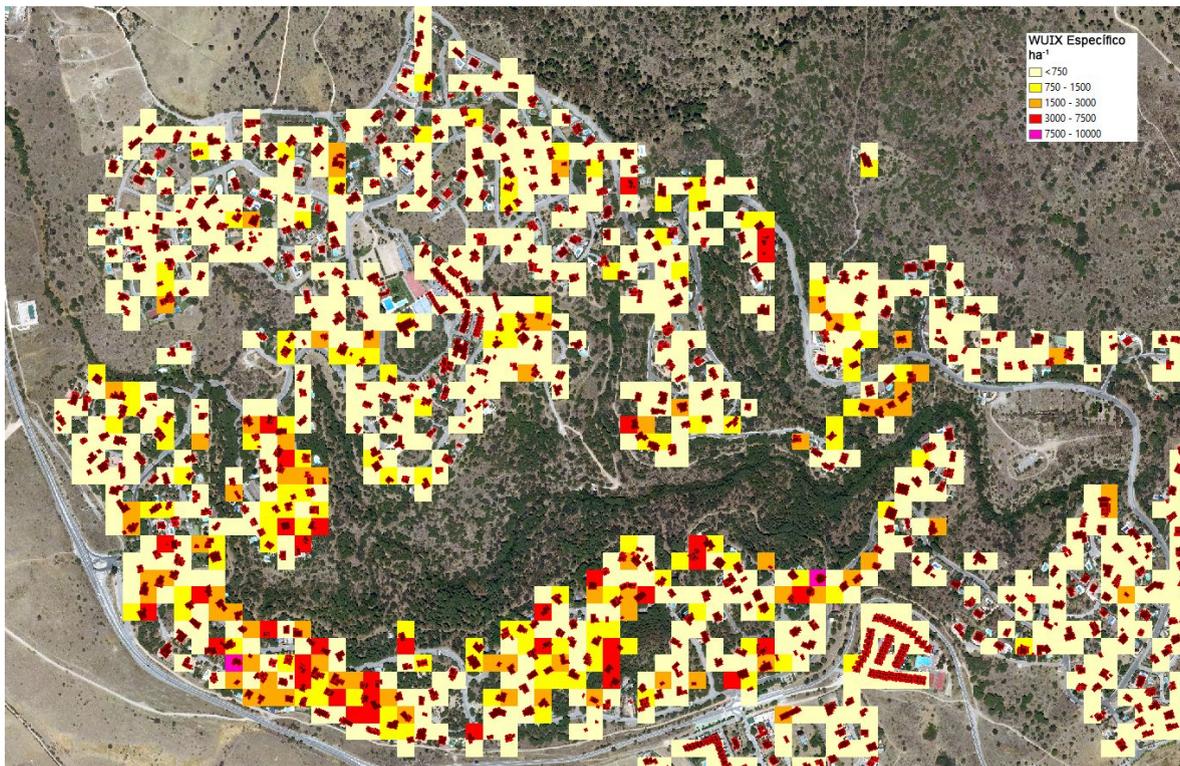
Mapa de continuidad específica de vegetación  $C_v$  en  $m^{-1}$ . Se aprecia la zona central más forestal, las áreas dominadas por los setos al norte y el intermix más denso de casas y vegetación al sur. El exterior de la urbanización por el S, SW, W y NW apenas presenta continuidad.



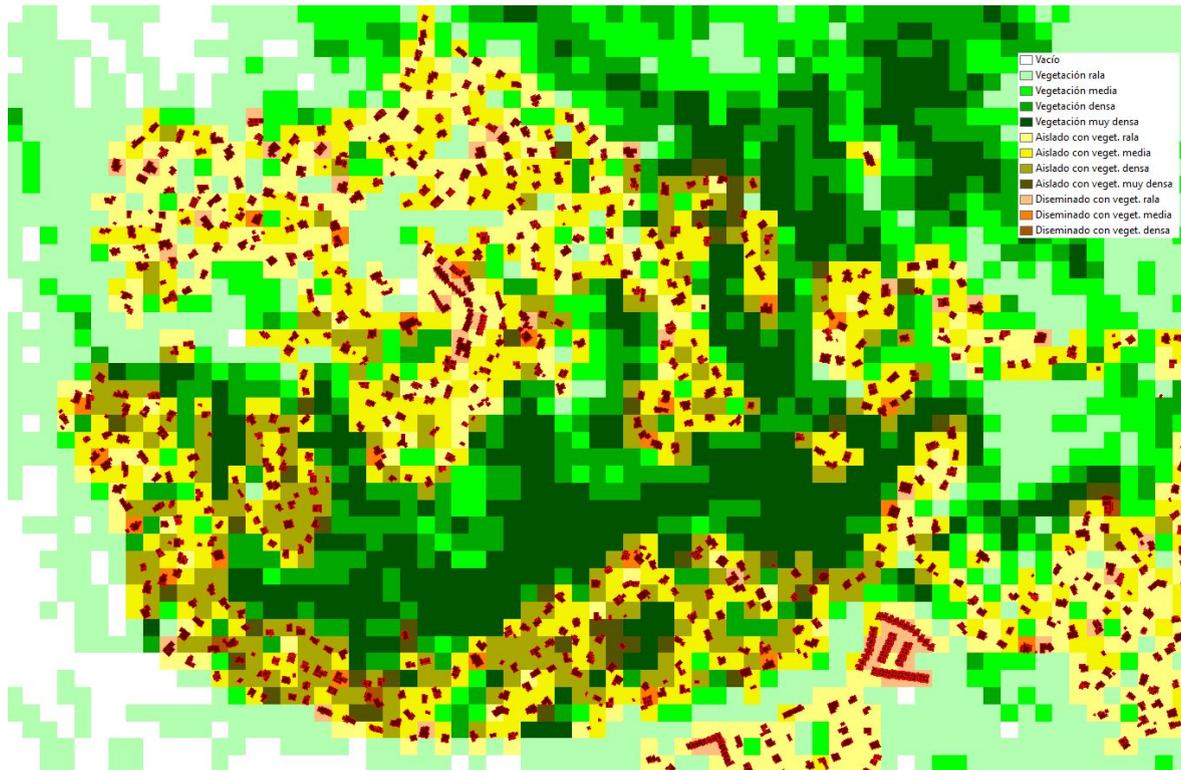
Mapa de continuidad urbana específica  $U_v$  en  $m^{-1}$ . Se aprecian numerosos pequeños grupos de casas o «clusters» repartidos por toda la urbanización y dos núcleos de carácter más urbano en el centro y en el sur que corresponden a las zonas residenciales de apartamentos.



Mapa de fricción específica en m/ha. En general los valores de fricción son moderados a bajos. La zona del sur presenta algo más de fricción, en particular debido a las casas bajo el arbolado en intermix.



Mapa de índice WUIX específico en  $ha^{-1}$ . En general los valores son bajos, debido a la baja fricción y a la baja continuidad de vegetación. Sin embargo, la parte SW presenta valores moderados debido a las casas con más fricción, algunas bajo arbolado, insertas en un intermix continuo.



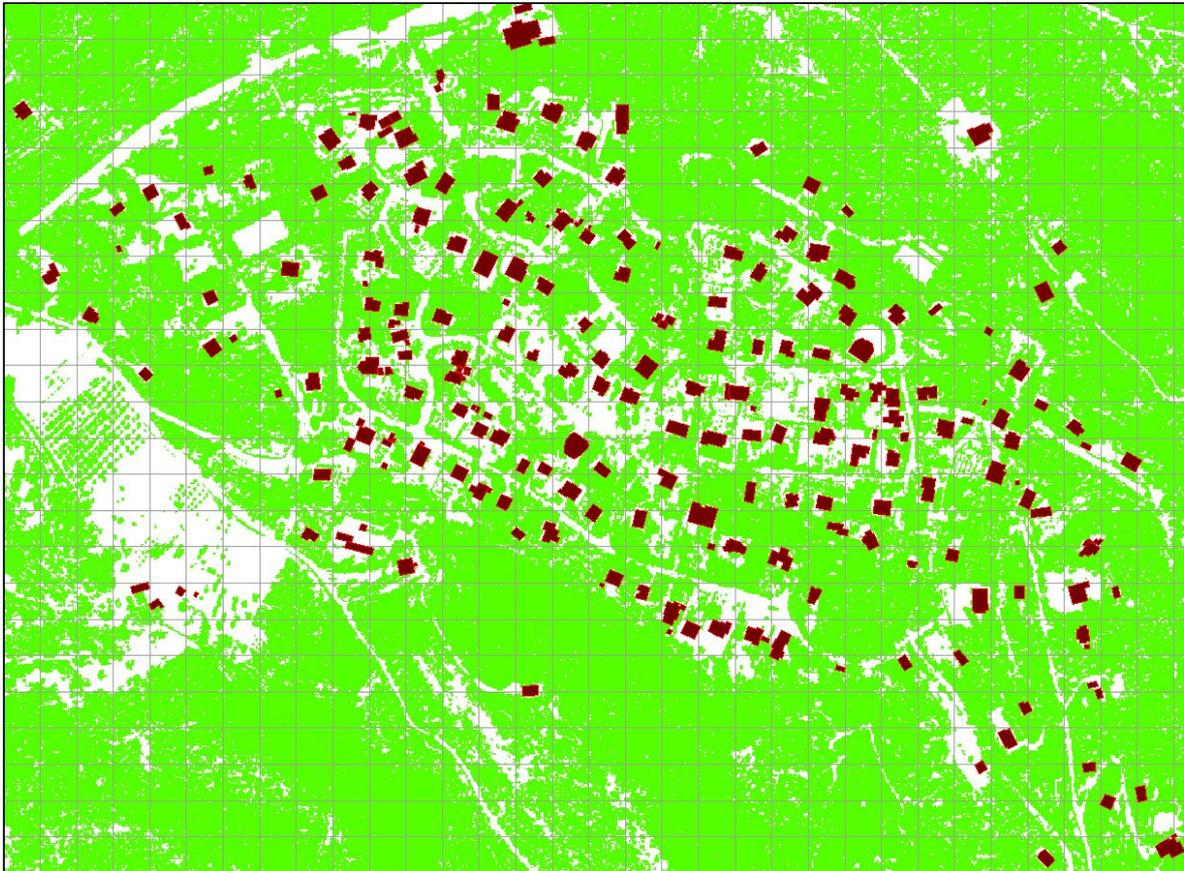
Mapa de tipologías de interfaz. En este caso solo se encuentran 12 clases. La urbanización se encuentra dominada por una superficie forestal central y matorral en el exterior. En la parte norte y oriental aparecen diseminados de viviendas con vegetación escasa (sobre todo setos). En la parte sur se aprecia mayor densidad de vegetación (colores más oscuros) en densidades parecidas de viviendas. Aparecen además dos zonas de carácter más urbano en el centro y en el sur, con vegetación escasa, pegada a las viviendas (patrón H3).

### Discusión

Puentelasierra queda caracterizada por la presencia de una parcela muy forestal en el centro, que se extiende en ramas hacia el N y NW y con eje principal E-W. Esto la hace muy vulnerable a los vientos de componente S y SW, habituales en la zona. Aparece una zona de intermix con fricción acusada en el cuadrante SW de la urbanización. Una parte notable del cuadrante NW y algo del SE están ocupadas por parcelas con viviendas y setos, que le dan cierta continuidad pero escasa fricción. Esto se refleja en el índice WUIX que, en general, presenta valores bajos de manera generalizada, excepto en la zona sur de la urbanización, debido sobre todo a la presencia de algunas casas cubiertas con árboles.

Esta urbanización, sin presentar valores medios muy altos de fricción (70 m/ha), tiene algunas vulnerabilidades en situaciones de viento sur, para las que un desarrollo de incendios en la parcela central darían impactos en la primeras líneas de viviendas con fricciones más altas. La gran diferencia entre la fricción media (70 m/ha) y la media con valores positivos (315 m/ha) indica que gran parte de las edificaciones están separadas de la vegetación circundante. Por tanto, en caso de incendio, es posible predecir un alto porcentaje de supervivencia de las viviendas, siempre que se cierren las ventanas y no haya combustión post-frontal de objetos y materiales cercanos. Otras situaciones de viento de componente W darían carreras que impactarían con las viviendas de la parte sur que lindan con la parcela forestal central. Los valores observados del índice WUIX son los habituales en este tipo de urbanizaciones, de las cuales Puentelasierra es un buen ejemplo.

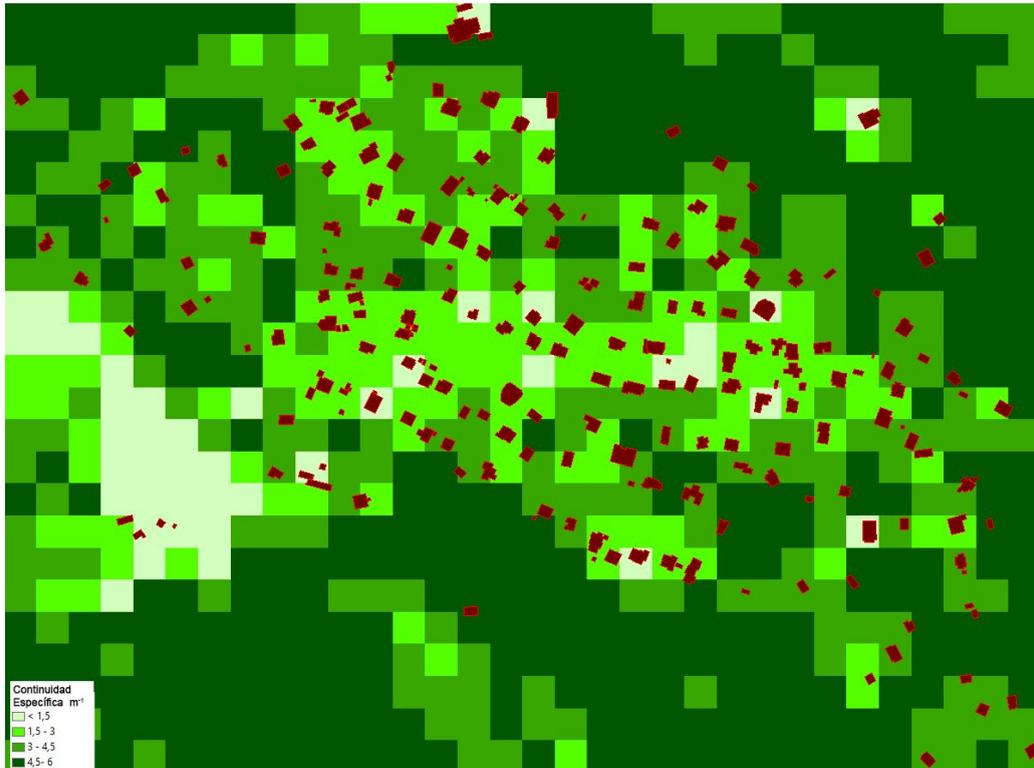
Ejemplo 2. Villaggio delle Mimose (Cerdeña, Italia)



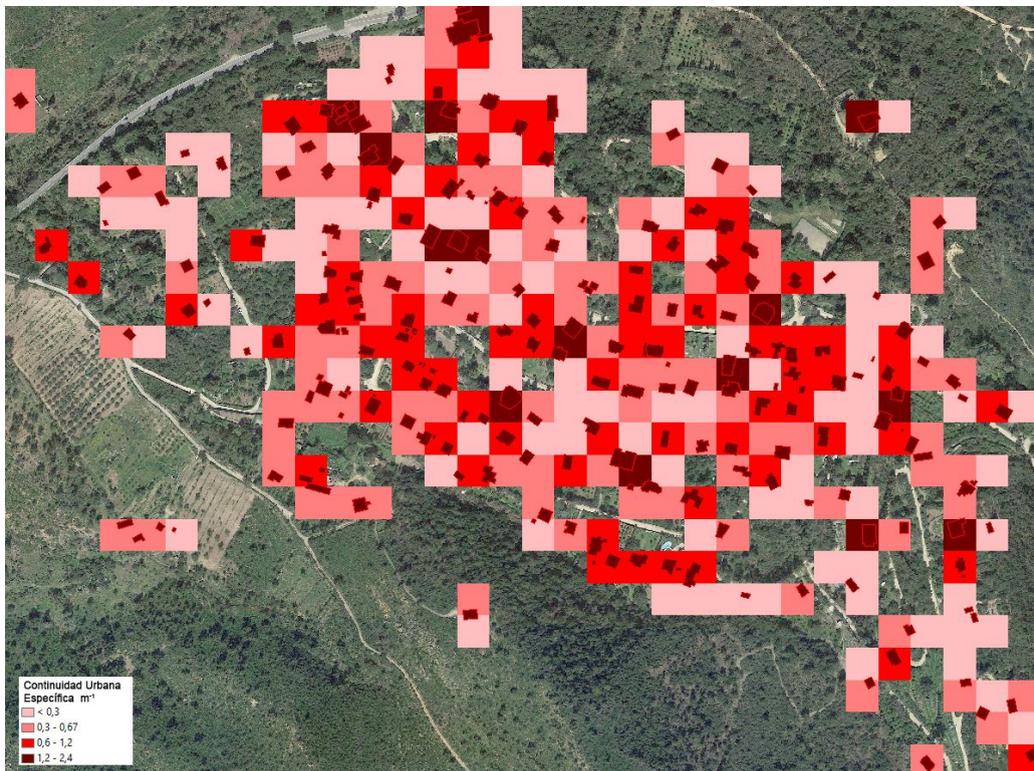
Mapa de mesoescala de la zona más poblada de la urbanización Villaggio delle Mimose, a 1 m de resolución, con la presencia de vegetación (en verde) y las viviendas (en rojo). La malla de fondo de celdas de 30x30 m<sup>2</sup> es la utilizada como referencia en el análisis. El área de estudio mostrada cubre 69,8 ha.

$R_g=30$ m	Máximo	Media	Media >0
$C_g$ (m)	5389	3670	3670
$F_g$ (m)	141	8,9	25,7
$W_g$ (m <sup>2</sup> )	722641	28532	82070
$C_o$ (m <sup>-1</sup> )	6	4	4
$F_o$ (m/ha)	1599	99	321
$W_o$ (ha <sup>-1</sup> )	8920	352	1013

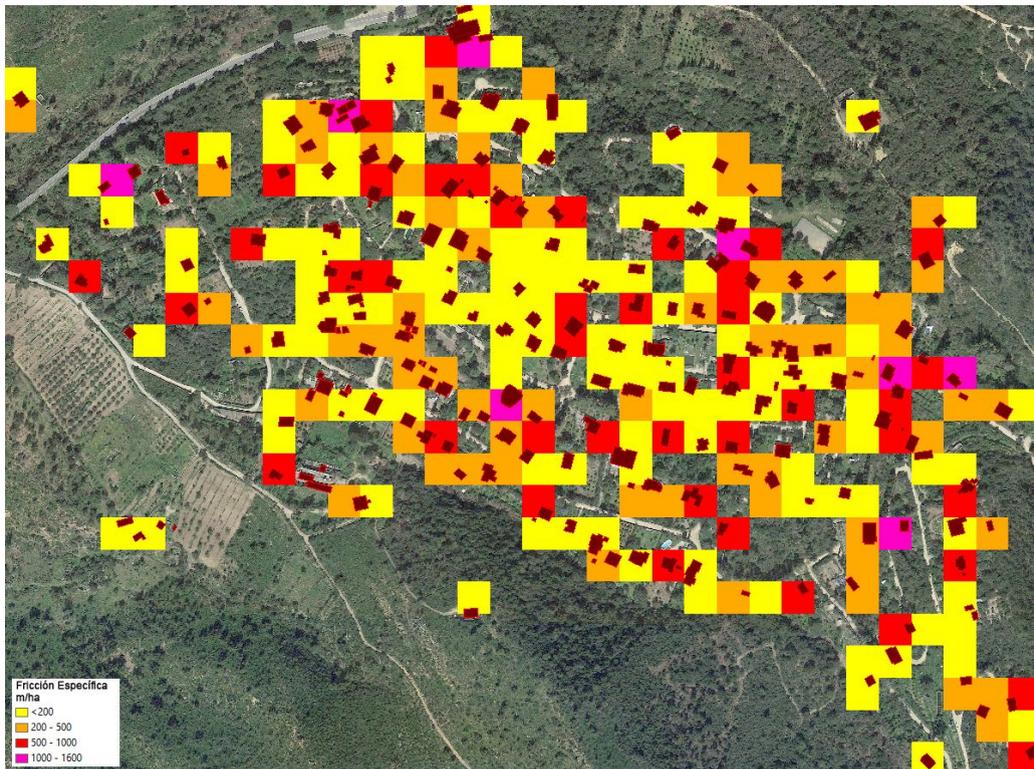
Villaggio delle Mimose es una urbanización situada en el municipio de Sinnai, en la provincia de Cagliari (Cerdeña). Surgida inicialmente como un centro turístico, en la actualidad cada vez más familias residen de manera permanente. Abarca 49 ha que incluyen 174 edificios, de los cuales el 85% fueron construidos entre 1960 y 1980. Las casas son todas villas independientes de buena construcción y con jardines. Los viarios no están asfaltados pero son anchos (de 4 a 6 m) y en su mayoría están flanqueados por muros que separan las parcelas. La vegetación de la zona es la típica del maquis mediterráneo con abundante presencia de pinos, en algunas zonas de manera densa.



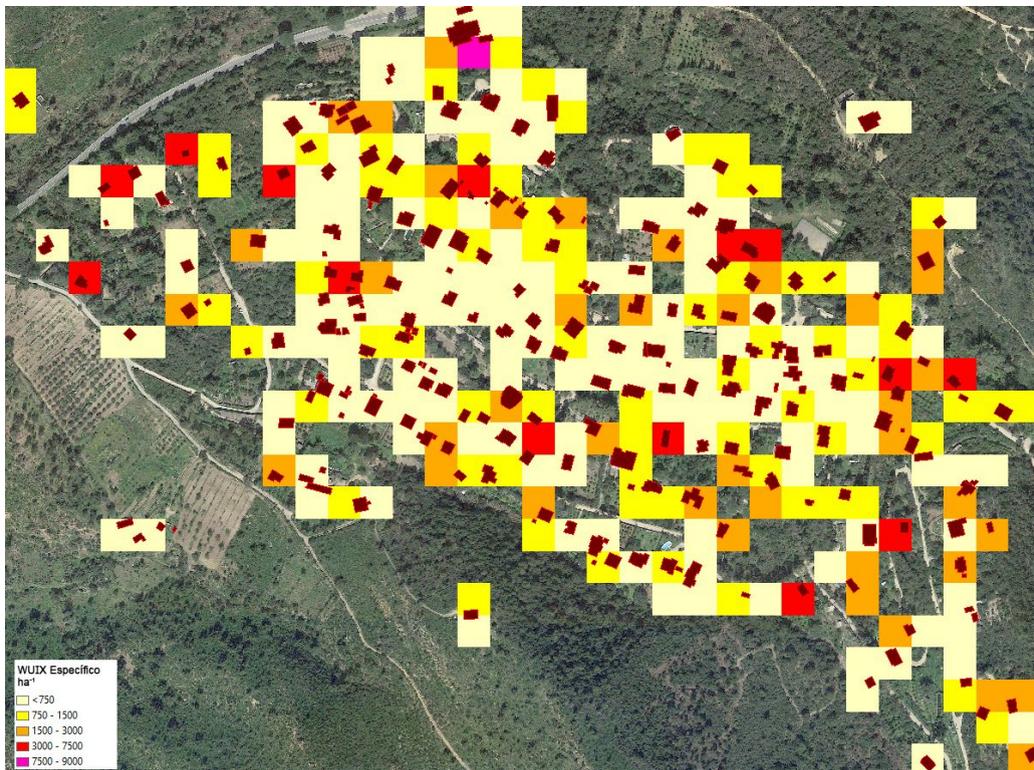
Mapa de continuidad específica de vegetación  $C_o$  en  $m^{-1}$ . Salvo la zona agrícola en el lado occidental, toda la urbanización tiene valores medios y altos, con bastante posibilidad de penetración del fuego. Los alrededores de la urbanización tienen también alta continuidad de vegetación. Se aprecian algunos corredores de combustible en dirección NW-SE.



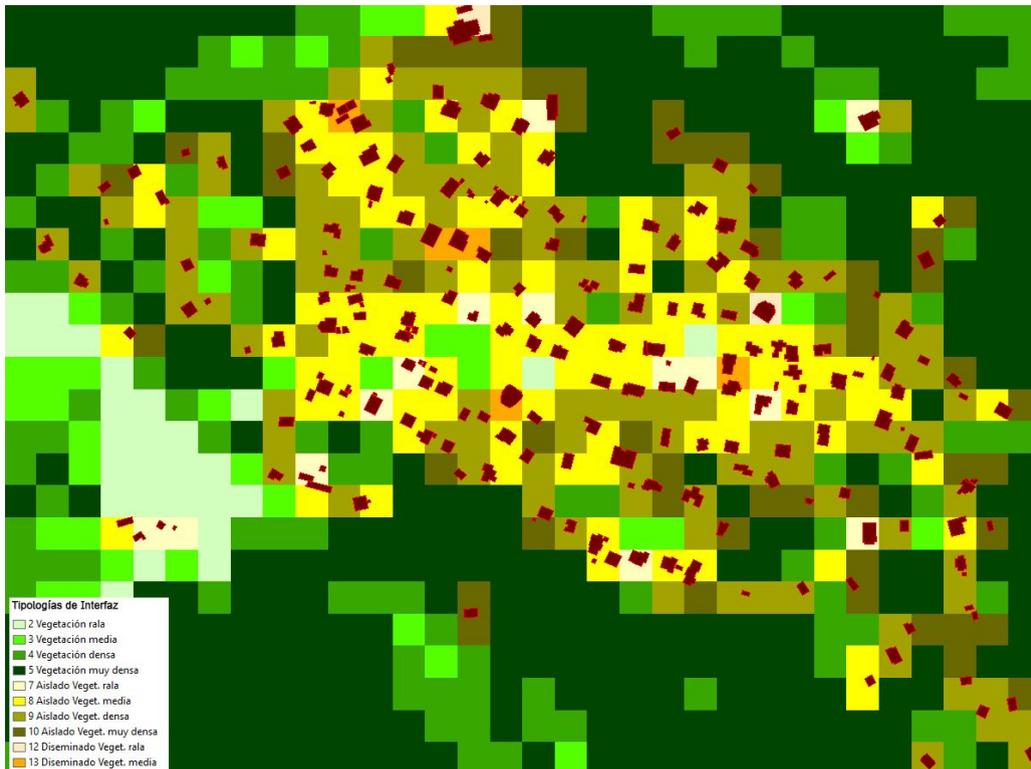
Mapa de continuidad urbana específica  $U_o$ , expresado en  $m^{-1}$ . Se trata de un diseminado de casas individuales que dibujan algunos clusters aislados de dos o tres edificios.



Mapa de fricción específica  $F_0$  en m/ha. En general muestra valores bajos en la zona central y bajos-moderados hacia el perímetro, con algunos puntos con mayor fricción por la presencia de viviendas bajo arbolado.



Mapa del índice WUIX específico en  $ha^{-1}$ . En general presenta valores bajos por la escasa fricción. En la parte oriental y en la zona NW aparecen algunas viviendas con mayor exposición a la entrada de incendios.



Mapa de tipologías de interfaz. En este caso aparecen 10 clases, dominada por patrones de edificios aislados (amarillo) con vegetación de baja y media continuidad, pero en algunos casos densa (color más oscuro), lo que lo hace especialmente permeable a los incendios forestales.

## Discusión

Villaggio delle Mimose presenta altos valores de continuidad vegetal, especialmente en el perímetro exterior de la urbanización, excepto en el límite occidental que queda flanqueado por campos de cultivo. En configuración de viento NW esta población es muy vulnerable a la penetración de incendios por alineaciones de vegetación y viviendas que discurren en el eje NW-SE, pudiendo cruzar la zona urbana a salto por la generación de focos secundarios. El cuadrante NE es especialmente vulnerable a los posibles impactos, por presentar mayor fricción precisamente en esa dirección. En general el valor del índice WUIX es bajo, sobre todo en la zona central por carecer de fricción, pero moderado y en algunos casos más alto en las zonas más perimetrales. Es por tanto previsible que la urbanización sea permeable al paso del fuego y que las viviendas reciban impacto directo de las llamas, con lo que es aconsejable reducir la fricción y reforzar los edificios para este posible episodio. En caso de que los viarios quedaran afectados por el incendio, la zona central, debidamente adaptada, podría servir de área de confinamiento. En configuraciones de viento SW las parcelas en la parte sur de la urbanización recibirían el impacto directo, dando penetración al fuego por saltos y generación de focos secundarios, pero con menor afectación general, en parte facilitada por el efecto protector potencial de los campos de cultivo presentes. Dado que toda la zona en la que se inserta Villaggio delle Mimose es muy forestal (maquis mediterráneo con presencia abundante de pinos), se puede esperar que las viviendas sean especialmente vulnerables a las pavesas que se puedan generar, con lo que es fundamental cerrar puertas y ventanas en caso de incendio.

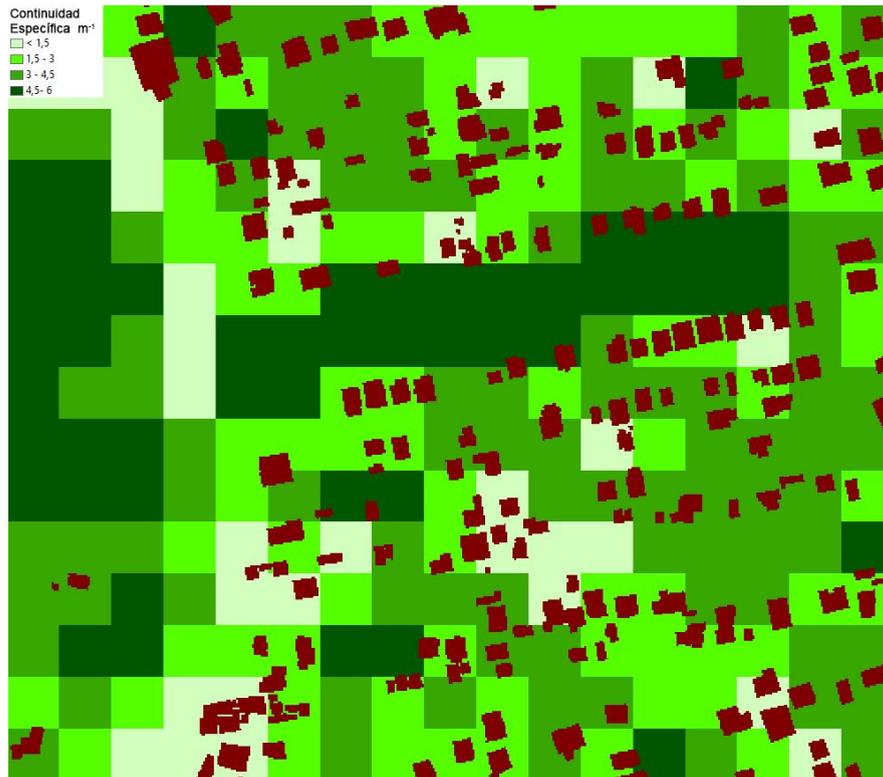
Ejemplo 3. Sector 08 de Mati (Ática, Grecia)



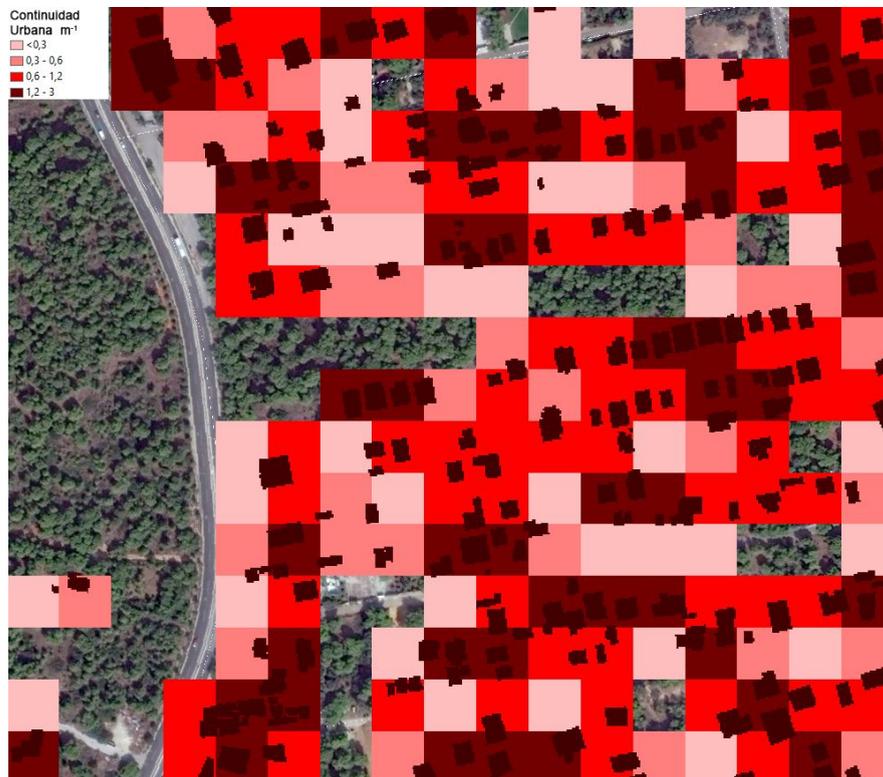
Mapa de mesoescala del sector 08 de Mati antes del incendio de 2018, con la presencia de vegetación (en verde) a 1 m de resolución. A efectos de representación se han superpuesto las viviendas (en rojo), aunque muchas quedan en realidad por debajo del dosel arbóreo. La malla de fondo de celdas de 30x30 m<sup>2</sup> es la utilizada como referencia en el análisis. El área de estudio que se muestra cubre 24 ha.

$R_g=30$ m	Máximo	Media	Media >0
$C_g$ (m)	5400	2952	2952
$F_g$ (m)	237	34	50
$W_g$ (m <sup>2</sup> )	919719	99071	146030
$C_o$ (m <sup>-1</sup> )	6	3,3	3,3
$F_o$ (m/ha)	2599	381	603
$W_o$ (ha <sup>-1</sup> )	11355	1223	1803

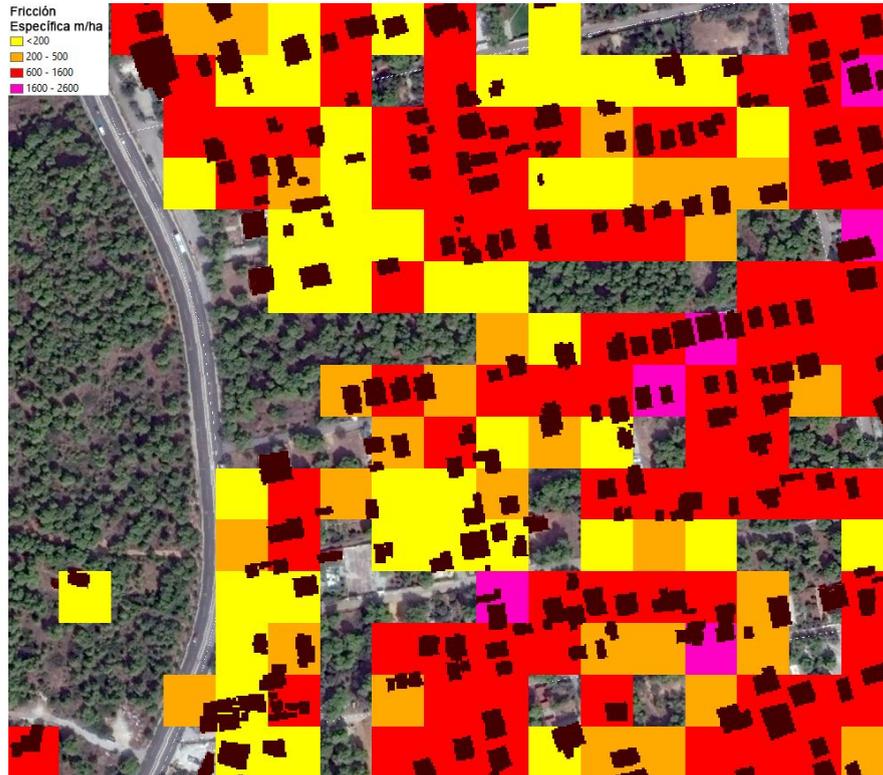
Mati es una zona residencial que se extiende a lo largo de 10 km<sup>2</sup> situada en la costa NE de la región de Ática, no muy lejos de Atenas (Grecia), que incluye centenares de viviendas unifamiliares, villas, hoteles, instalaciones y campamentos de verano. Mati sufrió un incendio devastador en julio de 2018 y destruyó o afectó severamente a más de 600 edificaciones. Mati era una zona cubierta por una densa masa de pino carrasco, con muchas parcelas alargadas sin construir y que presentaba una notable acumulación de combustible forestal en todos los estratos, particularmente pastos y maleza. Gran parte de las edificaciones se construyeron por los mismos propietarios en los años '60 y '70.



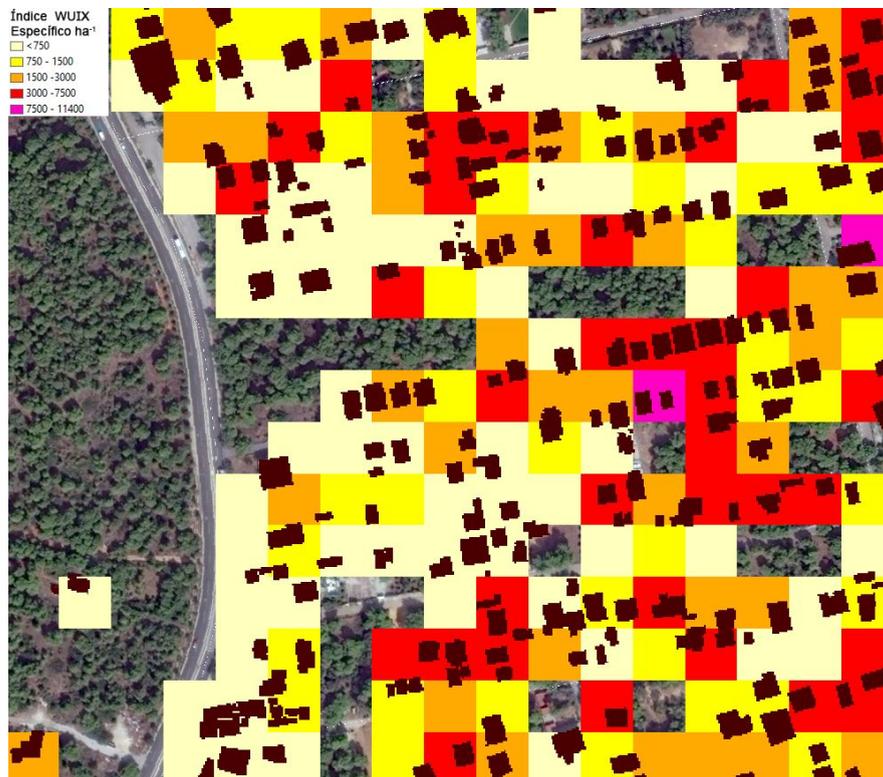
Mapa de continuidad específica  $C_0$  en  $m^{-1}$ . Llama la atención la parcela estrecha y larga con vegetación forestal entre las calles Akropoleos y Pefkalis, así como la continuidad moderada-alta en gran parte de la zona de estudio. La Av. Maratón (izquierda) apenas supone una discontinuidad a esta escala de análisis.



Mapa de continuidad urbana  $U_0$  en  $m^{-1}$ . Aparecen varios «clusters» de viviendas alineadas a lo largo de las calles, separadas por parcelas sin construir.



Mapa de fricción específica  $F_0$  en m/ha. Esta zona presenta valores moderados de manera generalizada, y algunos puntos con valores altos, debido a la frecuente presencia de casas bajo el arbolado.



Mapa del índice WUIX específico en  $ha^{-1}$  que indica algunas zonas con valores relativamente altos y, de manera generalizada, valores moderados, muy marcado por la fricción. Aún así en este sector la destrucción de viviendas fue generalizada.



Mapa de tipologías de interfaz del sector S08 de Mati. En este caso aparecen 11 clases, de las cuales son más frecuentes el caso aislado con vegetación densa o muy densa y algunos casos de diseminado. Los patrones fueron muy permeables al paso del fuego.

## Discusión

Lo primero que llama la atención en el sector S08 de Mati es la continuidad de las parcelas alargadas de vegetación forestal que se sitúan dentro de la urbanización. Además, la relativa alta continuidad de vegetación a pesar de la presencia de las viviendas. Las edificaciones se sitúan agrupadas a lo largo de las calles, formando pequeños «clusters» distribuidos uniformemente. Las estadísticas de los índices calculados indican valores medios notablemente más altos de fricción (381 m/ha, con 603 m/ha para casos positivos) y del índice *WUIX* (1223 ha<sup>-1</sup> y 1803 ha<sup>-1</sup> para casos positivos) que en los casos habituales de *intermix* en el resto de la Europa mediterránea. Esta fricción tan elevada queda en gran parte explicada por la frecuente presencia de viviendas bajo el arbolado, prácticamente rodeando la envolvente de algunos edificios. En el mapa se aprecia como la alineación de viviendas a ambos lados de la parcela forestal expone a las edificaciones al paso del fuego por el centro, precisamente en los puntos en los que el índice *WUIX* es mayor (de 3000 a 7000 ha<sup>-1</sup>). En algunos casos se han encontrado valores que superan los 11000 ha<sup>-1</sup> para celdas de 30x30 m<sup>2</sup>. Es igualmente interesante fijarse en las tipologías de interfaz que se encuentran, siendo mayoría las configuraciones de edificios aislados o diseminados con vegetación densa o muy densa, dando —como así se comprobó— gran permeabilidad al paso del fuego. Asimismo se identifican algunas zonas con vegetación densa o muy densa dentro de la urbanización, que potencialmente suponen nuevos orígenes de proyección de pavesas y generación de focos secundarios. En este tipo de interfaz, en el que se puede esperar contacto directo de la llama, es muy importante reforzar las edificaciones al paso del fuego, así como reducir notablemente la fricción de las viviendas con la vegetación. Aún así, en el incendio de 2018 hubo una huída en el último momento, que dejó muchas de las edificaciones con las ventanas o puertas abiertas, muy expuestas a la entrada de pavesas.

© 2019 David Caballero  
Todos los derechos reservados

Madrid, 16 de agosto de 2019  
Revisado el 18 de noviembre de 2019