

Universidad Miguel Hernández de Elche

Facultad de Ciencias Experimentales

Grado en Ciencias Ambientales

**RESPUESTA HIDROLÓGICA
ASOCIADA A LA EXPANSIÓN
DEL SELLADO DEL SUELO
DURANTE EL DESARROLLO DEL
CAMPUS UNIVERSITARIO DE
ELCHE (1997-2017)**

Autora: Navarro Leblond, Manon

Tutores: Meléndez Pastor, Ignacio;

Gómez Lucas, Ignacio



Trabajo Fin de Grado

Curso académico: 2020/2021

Área de conocimiento: Ingeniería Química

Departamento: Agroquímica y Medio Ambiente

Resumen: En las últimas décadas, la respuesta hidrológica asociada a la expansión urbana ha ido adquiriendo cada vez mayor interés. El desarrollo del campus de Elche de la Universidad Miguel Hernández se inicia en 1996, periodo a partir del cual el suelo comienza a experimentar una serie de cambios de uso y cobertura que se manifiestan en la transformación de un paisaje agrícola periurbano en un área urbanizada integrada en la ciudad. Este trabajo tuvo como propósito detectar la progresiva evolución del sellado del suelo y su impacto en la producción de escorrentía superficial. Los cambios en la ocupación del suelo se analizaron a partir de una serie histórica de fotografías aéreas que sirvieron de base para interpretar la respuesta hidrológica del campus bajo tres escenarios de desarrollo urbanístico: (a) estado de predesarrollo (escenario 1), (b) condiciones actuales de desarrollo (escenario 2), y (c) situación actual con implantación de estrategias LID (escenario 3). Los resultados obtenidos mostraron una considerable impermeabilización del terreno y modificación del ciclo hidrológico a lo largo del desarrollo del campus. No obstante, la atenuación del volumen y caudal pico de escorrentía observada en el último escenario reflejó los beneficios que supondría adoptar este tipo de medidas de conservación, especialmente en regiones semiáridas, donde la desertificación y la escasez del agua constituyen dos problemas de vital importancia.

Palabras clave: sellado del suelo; cambios terrestres; urbanización; escorrentía superficial; infraestructura verde.

Abstract: The hydrological response associated with urban sprawl has been acquiring a greater interest in recent decades. The development of the campus of the University Miguel Hernández of Elche began in 1996, a period from which the area experienced land use and land cover changes that manifested in the transformation of a peri-urban agricultural landscape into an urbanized area integrated in the city. The purpose of this work was to evaluate the progressive sealing of the soil and its impact on the surface runoff production. A time series of aerial images was used to assess changes in land occupation and three urban development scenarios were analyzed to determinate the hydrological response of the campus: (a) pre-development state (scenario 1), (b) current development conditions (scenario 2), and (c) current situation with implementation of LID strategies (scenario 3). From scenario 1 to scenario 2, considerable increases in impervious surfaces and runoff production were detected. However, the attenuation of the runoff and peak flow observed in the scenario 3 reflected the benefits of adopting such conservation measures, especially in semi-arid regions, where desertification and water scarcity constitute two significant issues.

Keywords: soil sealing; land changes; urbanization; surface runoff; green infrastructure.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al Dr. Ignacio Meléndez Pastor y al Dr. Ignacio Gómez Lucas, directores del trabajo de fin de grado, por el apoyo recibido. Gracias Ignacio M. por todos estos años de aprendizaje y motivación, por tu cercanía, humildad y confianza. Trabajar con una persona tan dedicada y entusiasmada por su trabajo es toda una inspiración.

Al Dr. José Navarro Pedreño, por su sincera colaboración y aportación en este trabajo; y con una recámara de sabias y profundas palabras que, sin duda, cuidadosamente conservaré.

Al Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente y al Servicio de Infraestructuras por facilitar los medios necesarios para la consecución de este trabajo.

A María Sánchez Díaz, Alejandra Patiño Trives y Pablo Perales Pacheco, amigos de corazón, por ser una luz en cada etapa de este viaje.

Y especialmente a mi familia, por su apoyo incondicional en cada descabellada decisión que he tomado a lo largo de mi vida.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	6
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	7
3.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	7
3.2.	EVOLUCIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LAS COBERTURAS DEL SUELO	8
3.2.1.	<i>Identificación y clasificación de las coberturas del suelo</i>	8
3.2.2.	<i>Detección de cambios en las coberturas del suelo</i>	10
3.3.	ESTIMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	12
3.3.1.	<i>Datos hidrometeorológicos: Precipitación máxima diaria para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años</i>	13
3.3.2.	<i>Cálculo de los umbrales medios de escorrentía a partir del Método del Número de Curva del SCS</i>	14
3.3.3.	<i>Cálculo de caudales máximos aplicando el Método Racional</i>	18
3.3.4.	<i>Hidrograma unitario adimensional del SCS</i>	20
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1.	EVOLUCIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LAS COBERTURAS DEL SUELO	22
4.2.	IMPACTO DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	24
4.3.	FORTALEZAS Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO	30
5.	CONCLUSIONES	31
6.	BIBLIOGRAFÍA	33
7.	ANEXOS	38

1. Introducción

La formación del suelo es un proceso extremadamente lento que deriva de los cambios físicos, químicos y biológicos de las rocas que componen la superficie terrestre, generando un complejo sistema definido por propiedades que se encuentran en constante cambio [1]. De ahí que algunas funciones del suelo hayan sido reconocidas como esenciales a nivel ambiental, económico y social [2,3]. El suelo actúa como medio de producción, filtración, amortiguación y transporte; además de ser recurso, hábitat y herencia cultural [2,4,5], desempeñando un papel importante en la regulación ecosistémica. Sin embargo, desde los primeros asentamientos humanos ha sido objeto de múltiples transformaciones que han conducido a su progresiva degradación [6]. Según los resultados presentados por la FAO [7], la degradación del suelo representa cerca del 33% de la superficie mundial, esperando que este valor alcance el 90% en 2050.

Las transformaciones del suelo reflejan el desarrollo socioeconómico y las decisiones políticas adoptadas a lo largo del tiempo, constituyendo un factor indispensable para comprender la dinámica relación entre las funciones desempeñadas por el edafosistema y los cambios en los usos y coberturas terrestres acaecidos. El concepto *uso del suelo* puede definirse como el paisaje urbano en el que se desarrollan las actividades humanas (p.e. industrial, residencial, ...); mientras que el término *cobertura de suelo* se entiende como el conjunto de elementos que integran dichos paisajes urbanos y representan las condiciones biofísicas de la superficie terrestre (p.e. vegetación, cemento, asfalto...) [8]. A lo largo del último siglo, factores como el crecimiento poblacional, la idoneidad de las condiciones climáticas y los cambios en los estilos de vida asociados a mayores niveles de renta han acelerado la expansión de las zonas urbanas y la red de infraestructuras asociadas a ellas en los entornos costeros euromediterráneos, donde el aumento del valor de la propiedad ha llevado al abandono de actividades humanas de menor rentabilidad económica como la agricultura tradicional [9,10]. La Comunidad Valenciana es un área especialmente frágil y vulnerable cuyas múltiples modificaciones han dado paso a espacios urbanos plurifuncionales consumidores de grandes cantidades de suelos fértiles que han transformado radicalmente los paisajes históricos, particularmente los de naturaleza agraria. Esta competencia entre los distintos usos del suelo pone en riesgo la supervivencia del sistema edáfico, propiciando los procesos de desertificación. Éstos últimos han sido reconocidos como la principal amenaza en la región [11] y, entre ellos, el sellado antrópico del suelo (*soil sealing*, en terminología anglosajona) constituye el más severo de los cambios, entendiéndose como la acción permanente de cubrir completamente o parcialmente una superficie de terreno con material impermeable (p.e. asfalto, cemento, metal, vidrio o plástico) [3,12]. Puede deducirse, por lo tanto, que el sellado del suelo es una manifestación de los cambios en las coberturas terrestres y sus propiedades asociadas a lo largo de un periodo de tiempo (rugosidad, contenido orgánico, porosidad, ...) [13,14].

Según Pauleit y Duhme [15] las superficies urbanas pueden estudiarse como unidades fundamentales del ecosistema urbano, evaluando el balance energético y material que se produce en cada una de ellas (p.e. clima urbano, hidrología, demanda energética para calefacción y emisión de dióxido de carbono). En particular, el proceso de sellado del suelo conduce a la pérdida irrecuperable del recurso edáfico [2], generando impactos severos en el resto de compartimentos ambientales (biológico, hidrológico y atmosférico) [16], entre ellos: (i) la reducción de la tasa de infiltración del terreno y el flujo base; (ii) el incremento en la producción de escorrentía y reducción del tiempo de concentración de la cuenca en un evento de precipitación; (iii) la contaminación del aire y el agua; (iv) la fragmentación del hábitat y la pérdida de biodiversidad; (v) la emisión de gases de efecto invernadero al anularse el papel del suelo como sumidero de carbono; y (vi) la aparición del efecto isla de calor urbano al disminuir la absorción de radiación [2,16–19]. Además, el sellado del suelo modifica la dirección de los flujos de agua en ecosistemas vecinos y expone aquellos suelos no sellados a la contaminación [2]. Hoy en día, los efectos negativos asociados a la expansión urbana son ampliamente reconocidos por la Unión Europea, donde, en promedio, alrededor del 9% de la superficie se encuentra cubierta por material impermeable [20].

Se han dedicado muchos esfuerzos a analizar la respuesta hidrológica urbana a los cambios de cobertura terrestre, desde investigaciones enfocadas en el análisis de la calidad del agua [8,21,22] hasta las relacionadas con el estudio de la variabilidad espaciotemporal de la escorrentía [19,23,24]. En aparcamientos universitarios, Andrés-Doménech *et al.* [25] detectaron en aguas de escorrentía originadas bajo condiciones climáticas mediterráneas, elevados valores de concentración media de evento (*Event Mean Concentration*) para sólidos en suspensión totales (SST), materia orgánica (cuantificada mediante Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)), diversos nutrientes y metales pesados, excediendo de media, el valor umbral fijado en la Directiva Europea 91/271/ECC para los SST y los estándares de calidad ambiental (EQS) de la Directiva Europea 2008/105/CE para Cu, Ni y Pb. La elevada carga contaminante que acompaña al primer lavado o “*first-flush*” en un evento de precipitación, es una de las principales causas de problemas medioambientales en los medios receptores [26]. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) se presentan como alternativas mitigadoras de los efectos hidrológicos derivados de la impermeabilización de las superficies terrestres [2,27], pues a diferencia de los sistemas de drenaje urbano convencionales, tienen la capacidad de retener y/o eliminar parte de la carga contaminante arrastrada por la escorrentía. Además, interceptan parte del agua precipitada y permiten redirigirla hacia el subsuelo y otros cuerpos de agua, cerrando el ciclo hidrológico. No obstante, su implementación en regiones mediterráneas sigue siendo limitada debido a la falta de información sobre su eficiencia bajo condiciones climáticas caracterizadas por largos períodos secos y lluvias torrenciales [25].

En vista del cambio climático, se espera que los eventos climáticos extremos se acentúen en el futuro e intensifiquen el riesgo de sufrir inundaciones y sequías [28,29]. En zonas semiáridas, donde la disponibilidad de agua es escasa, la protección de la calidad de este recurso debe convertirse en una prioridad; por este motivo se requiere aunar esfuerzos para conocer en mayor profundidad el comportamiento hidrológico en entornos mediterráneos urbanos y desarrollar estrategias de planificación que mejoren la resiliencia a estos eventos.

2. Antecedentes y objetivos

Para representar de manera precisa la variabilidad espaciotemporal de los procesos de lluvia-escorrentía a pequeña escala, se requiere información detallada tanto de los materiales que conforman la superficie como de los parámetros hidrológicos que caracterizan el área de estudio [8]. La cartografía temática de coberturas terrestres constituye una información valiosa, que puede emplearse como variable de entrada en modelos ambientales de diversa índole, como pueden ser los relacionados con el análisis de cambios de cobertura terrestre, hábitat y biodiversidad, servicios ecosistémicos, adaptación al cambio climático, respuesta hidrológica, ...[13,30]. Gracias al avance computacional y a la disponibilidad y accesibilidad a los datos digitales espaciales, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección (*Remote Sensing*) se han convertido en herramientas versátiles de gran apoyo en la toma de decisiones, lo que ha facilitado la extensión de su uso en la modelización y planificación hídrica en numerosos países [13,23,31].

Sin embargo, la especificidad de los procesos de conversión lluvia-caudal y el exceso de información requerida en modelos como SWMM (*Storm Water Management Model*) o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) [32], hacen de los métodos empíricos una solución más efectiva a la hora de estimar la escorrentía superficial producida cuando se carece de datos suficientes o en entornos semiáridos y mediterráneos [23]. La aplicación del método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) probablemente sea el ejemplo más común; pues dada su sencillez y automaticidad, ha sido empleado mundialmente para estimar la escorrentía superficial en cuencas de reducido tamaño [33,34]. En España, fue adaptado por Témez [35] y constituye la base del Método Racional descrito en la Norma 5.2-IC de drenaje superficial.

En las últimas dos décadas, el número de universidades que comenzaron a introducir sus propias estrategias de sostenibilidad y a reducir el impacto medioambiental de sus campus ha ido en aumento [36]. La revisión bibliográfica realizada por Amaral *et al.* [37] sobre los proyectos implementados en los campus universitarios determinó que las mayores iniciativas se destinaban a mejoras en los edificios, mientras que sólo un 6% de los casos incluían proyectos hidrológicos (tratamientos de aguas residuales y captación de aguas pluviales para riego de espacios verdes). A tal efecto, este trabajo tiene como

objetivo principal explorar los impactos del sellado antrópico del suelo en la escorrentía superficial generada en el campus de Elche de la Universidad Miguel Hernández (UMH), para el que se contabilizarán los cambios de cobertura del suelo ocurridos a lo largo de su desarrollo (1997-2017). Para ello, se realizará en primer lugar una clasificación de las cubiertas superficiales existentes a partir de un proceso de fotointerpretación de imágenes aéreas digitales, generando una cartografía temática que pueda ser empleada en estudios futuros. Posteriormente, se analizarán los cambios de cobertura ocurridos entre el periodo de 1997 y 2017; y finalmente, se llevará a cabo una primera aproximación de la respuesta hidrológica asociada a tres escenarios de desarrollo urbano, con el fin último de promover el desarrollo de prácticas de conservación del suelo y de gestión integral del agua, por ejemplo, empleando enfoques holísticos como BMP (*Best Management Practice*), LID (*Low Impact Development*) o SuDS que permitan la captación, el tratamiento, el almacenamiento y la reutilización del agua de lluvia.

Cabe mencionar que este estudio constituye la base del artículo titulado “Soil sealing and hydrological changes during the development of the university campus of Elche (Spain)”, en estado de *minor revision* para su posible publicación en la revista *International Journal of Environmental Research and Public Health* (IJERPH) (JCR-IF2020 = 3,390; Q2- *Environmental Sciences*, Q2- *Public, Environmental and Occupational Health*).

3. Materiales y métodos

3.1. Características generales del área de estudio

El campus universitario se localiza en la ciudad de Elche, en el sureste de España (Figura 1), abarcando una extensión de 68,8 ha. El área de estudio se eleva sobre una altitud comprendida entre los 88-100 m.s.n.m., asentándose cerca de un paisaje histórico agrícola de gran valor cultural incluido en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO desde el año 2000 (nº 930): el “Palmeral de Elche”. Se trata de un mosaico de cultivos de palmeras datileras asociado a un antiguo sistema de regadío, documentado históricamente, por lo menos, desde el siglo X a.C. y considerado como un ejemplo extraordinario de gestión sostenible del agua [38]. El área del campus conserva cuatro antiguas acequias de riego que distribuyen el agua a distintas partes del municipio.

Elche se caracteriza por un clima mediterráneo semiárido acompañado de inviernos templados y veranos secos y cálidos. La precipitación y temperatura media anual ronda los 289 mm y 17,6°C, respectivamente [39]; perteneciendo a la Zona C: *Clima del sector litoral meridional* del “Atlas climático de la Comunidad Valenciana” elaborado por A.J. Pérez Cueva *et al.* [40].

Esta región se considera extremadamente vulnerable por tres razones [41,42]: (1) los recursos de agua convencionales no son suficientes para suplir la demanda de agua en regiones semiáridas, incluso

considerando la reutilización de agua regenerada y desalada; (2) en Alicante, la precipitación total anual se ha reducido más de un 15% en los últimos 30 años y se espera que este descenso continúe de aquí a 2050, lo que aumenta las presiones sobre los recursos hídricos; y (3) la precipitación se concentra mayoritariamente en otoño, cuando la intensidad de la precipitación y las inundaciones repentinas son más frecuentes. Como resultado, se incrementa la susceptibilidad de sufrir graves daños materiales, económicos e incluso humanos, como los acaecidos en septiembre de 2019 en la Vega Baja del Segura.

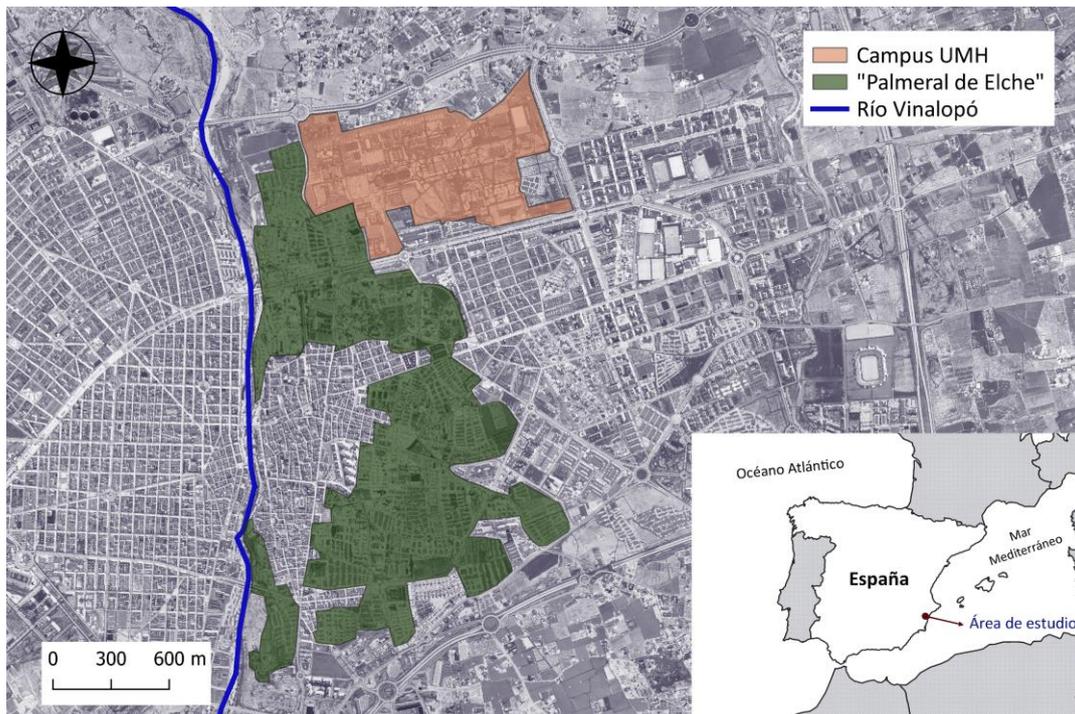


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de datos cartográficos procedentes del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Bajo la proyección de condiciones climáticas más secas y la incertidumbre de que se produzca un mayor número de precipitaciones de alta intensidad en el futuro [41,43], el campus de Elche constituye un buen caso de estudio para evaluar a pequeña escala el impacto de los cambios de coberturas en la escorrentía superficial, y proponer medidas de conservación para avanzar hacia una mayor autosuficiencia hídrica y protección del suelo.

3.2. Evolución espaciotemporal de las coberturas del suelo

3.2.1. Identificación y clasificación de las coberturas del suelo

Para estudiar la respuesta hidrológica asociada a los cambios superficiales ocurridos en el campus resulta necesario generar una base de datos cartográficos en la que se contemplen las distintas cubiertas existentes a lo largo de su desarrollo. Esta cartografía se generó a partir de una serie histórica de fotografías aéreas comprendidas entre 1997 y 2017 extraídas gratuitamente del centro de descargas del

Instituto Geográfico Nacional (IGN) [44]. Para ello, se dispuso de dos tipos de imágenes: (i) fotogramas correspondientes al Vuelo Quinquenal 1998-2003, del cual se seleccionó el año 1999; y (ii) ortofotos procedentes de tres fuentes distintas: Vuelo OLISTAT Oleícola, Sistema de Información Geográfica de parcelas agrícolas (SIGPAC) y Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), a partir de los cuales se obtuvieron las imágenes de los años 1997, 2002, 2005, 2007, 2009, 2012, 2014 y 2017. La resolución espacial de los datos manipulados se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resolución de las imágenes aéreas empleadas en el área de estudio.

Imágenes empleadas en el estudio	Resolución (m)	Fecha
Ortofotos OLISTAT	1	1997
Fotograma Vuelo Quinquenal 1998-2003	1	1999
Ortofotos SIGPAC	0,5	2002
Ortofotos PNOA	0,5	2005
Ortofotos PNOA	0,5	2007
Ortofotos PNOA	0,25	2009
Ortofotos PNOA	0,5	2012
Ortofotos PNOA	0,25	2014
Ortofotos PNOA	0,25	2017

Los fotogramas y las ortofotos se diferencian en la exactitud con la que se representan los elementos del terreno en la imagen. Mientras que las ortofotos reflejan exactamente la posición de los objetos, de la misma forma que lo haría un mapa o un plano, los fotogramas presentan pequeñas deformaciones como consecuencia de la posición de la toma de la fotografía y el relieve del terreno. Por ello, con el objetivo de hacer coincidir espacialmente los objetos representados en los fotogramas y ortofotos descargados, se georreferenció nuevamente el fotograma de 1999 con ayuda de un SIG; en este caso se empleó el software libre y de código abierto QGIS.

Una vez preparados los datos, se procedió a la digitalización de las imágenes, es decir, a la interpretación visual y clasificación de los objetos según el tipo de cobertura terrestre, basada ésta última en conocimiento del terreno y experiencia fotointerpretativa. Con la colaboración del Servicio de Infraestructuras de la UMH, se contó con cartografía relativa a los límites del campus que facilitó en gran medida este proceso. La Tabla 2 refleja la clasificación seleccionada, previa validación en campo para el año 2017, donde las superficies asfaltadas, cementadas y hormigonadas, el pavimento terrizo, el césped artificial y las cubiertas mixtas se definieron como suelo sellado. Existe una gran diversidad de terminología aplicada a la clasificación de superficies. Por ejemplo, Rio *et al.* [8] emplean dos niveles de clasificación en función de la cantidad y calidad del agua (Nivel 1: Unidades de Respuesta Hidrológica; Nivel 2: Unidades de Respuesta de Calidad del Agua), mientras que en Zhao *et al.* [45] la definición de las categorías se realiza con el objetivo de evaluar su contribución térmica al efecto “isla de calor

urbana". Si bien es cierto que para la clasificación de la vegetación en cuencas rurales se suelen emplear distintas categorías (p.e. pradera, bosque, huerta, ...), en este estudio árboles, arbustos y césped se distribuyen indistintamente entre "cobiertas mixtas" y "cobiertas naturales". No obstante, a la hora de estimar el umbral de escorrentía de cada superficie, estas áreas se subdividirán en zonas de cultivos y espacios verdes urbanos; diferenciando entre éstos últimos el grado de ocupación (o densidad) de la vegetación.

Tabla 2. Descripción de las coberturas de suelo presentes en el área de estudio.

Cobertura de suelo	Descripción
Asfalto	Redes viarias y aparcamientos.
Cemento/Hormigón	Redes peatonales y edificaciones.
Césped artificial	Campo de golf.
Pavimento terrizo	Pavimento compuesto por áridos, conglomerante y agua, generalmente presente en redes peatonales.
Suelo con cubierta mixta	Suelo cubierto por una mezcla de materiales que pueden encontrarse en la naturaleza (grava, arena, vegetación, madera, ...) y materiales sintéticos artificiales obtenidos por el hombre por medio de procesos físicos y químicos (p.e. membranas geotextiles). Asociado a jardines secos.
Suelo con cubierta natural	Suelo cubierto por materiales que pueden encontrarse en la naturaleza (grava, arena, vegetación, madera, ...). Asociadas a espacios verdes (incluyendo árboles, arbustos y césped) y cultivos.
Suelo desnudo	Suelo desprovisto de vegetación u otro tipo de cobertura y susceptible a procesos de erosión o a la pérdida de estructura por compactación, impermeabilización, ..., mayoritariamente asociado a terrenos en construcción, caminos de tierra y espacios verdes urbanos con vegetación en estado de crecimiento.
Cuerpo de agua	Acequias, piscinas, tanques de agua, balsas y otro tipo de masa de agua superficial.

3.2.2. Detección de cambios en las coberturas del suelo

El análisis de los cambios producidos en un periodo y lugar determinado puede llevarse a cabo por tabulación cruzada y superposición cartográfica de dos imágenes ráster, identificando las diferencias en la información contenida en los píxeles que las componen. En este estudio, los cambios en las coberturas del suelo se determinaron a través de TerrSet, un software de análisis geoespacial desarrollado por Clark Labs (Clark University, Worcester MA, EEUU) que incorpora herramientas para el análisis SIG y el procesamiento de imágenes de satélite, concretamente a través del módulo

CROSSTAB de IDRISI [30]. Para ello, previamente a la introducción de los datos en el programa, la cartografía vectorial generada en QGIS fue transformada a formato ráster con una resolución de celda de 0,5 m. El periodo considerado durante el análisis en TerrSet fue 1997-2017, obteniendo como resultado una matriz de transición en la que se expresaba de manera concisa la magnitud de los cambios sufridos de un año a otro, cuyo análisis se realizó siguiendo el enfoque propuesto por Pontius *et al.* [46] para la estimación del cambio neto, persistencia, intercambios, ganancias y pérdidas de cada categoría. Las matrices de transición son tablas de doble entrada simétricas que contienen, en este caso, en su eje horizontal (columnas) los tipos de coberturas de suelo para la primera fecha, y en su eje vertical (filas) la información de la siguiente fecha (Tabla 3). La diagonal de la matriz representa la superficie cuyas coberturas de suelo permanecieron constantes durante el intervalo de tiempo considerado, mientras que el resto de las celdas reflejan las superficies que experimentaron cambios hacia otro tipo de categoría.

Tabla 3. Matriz de transición entre categorías desde la fecha 1 hacia la fecha 2, incorporando ganancias, pérdidas y cambio neto (adaptada de Farfán Gutiérrez *et al.* [47]).

Categoría		Fecha 1				Total en Fecha 2 (P _{+j})	Ganancias (G _j)
		Cat 1 (i)	Cat 2	Cat 3	Cat _i		
Fecha 2	Cat 1 (j)	P ₁₁	P ₂₁	P ₃₁	P _{i1}	P ₊₁	P ₊₁ - P ₁₁
	Cat 2	P ₁₂	P ₂₂	P ₃₂	P _{i2}	P ₊₂	P ₊₂ - P ₂₂
	Cat 3	P ₁₃	P ₂₃	P ₃₃	P _{i3}	P ₊₃	P ₊₃ - P ₃₃
	Cat _j	P _{1j}	P _{2j}	P _{3j}	P _{ij}	P _{+j}	P _{+j} - P _{ij}
Total en Fecha 1 (P _{i+})		P ₁₊	P ₂₊	P ₃₊	P _{i+}	1	
Pérdidas (L _i)		P ₁₊ - P ₁₁	P ₂₊ - P ₂₂	P ₃₊ - P ₃₃	P _{i+} - P _{ij}		
Cambio neto (C _n)		P ₊₁ - P ₁₊	P ₊₂ - P ₂₊	P ₊₃ - P ₃₊	P _{+j} - P _{i+}		
Intercambio (S)		2* min (L _i ,G _j)					

A partir de la matriz de cambio se estimaron las ganancias (G_j), como la diferencia del área total de la categoría j en la fecha 2 (P_{+j}) y la persistencia expresada en la diagonal de la matriz (P_{ij}); y las pérdidas (L_{ij}), como la diferencia entre el área total de la categoría i en la fecha 1 (P_{i+}) y la persistencia (P_{ij}) [47]:

$$G_j = (P_{+j}) - (P_{ij}) \quad (1)$$

$$L_{ij} = (P_{i+}) - (P_{ij}) \quad (2)$$

El valor absoluto del cambio neto para cada categoría puede expresarse como la diferencia entre el área total de la categoría j en la fecha 2 (P_{+j}) y el área total de la categoría i en la fecha 1 (P_{i+}); mientras que los intercambios se obtienen tras aplicar la Ecuación 4 [46]:

$$\text{Valor absoluto del cambio neto } (C_n) = |P_{+j} - P_{+i}| \quad (3)$$

$$\text{Intercambio } (S) = 2 \cdot \text{MIN } (L_i, G_i) \quad (4)$$

3.3. Estimación de la escorrentía superficial

La escorrentía directa producida en un territorio depende fundamentalmente de dos factores: la precipitación, que representa las entradas al sistema, y las características de la cuenca de drenaje, que regulan el proceso de transformación lluvia-escorrentía para un evento dado. Éstas últimas determinan el volumen de agua que puede ser interceptado, evapotranspirado e infiltrado antes de generar flujo superficial y por lo tanto, el potencial de la cuenca para producir escorrentía [23]. El cálculo de este parámetro constituye uno de los principales objetivos de la hidrología superficial y resulta necesario para el dimensionamiento hidráulico de obras de drenaje tanto en cuencas naturales como en cuencas alteradas por procesos urbanísticos. Este estudio pretende analizar la respuesta hidrológica del campus universitario bajo tres escenarios de desarrollo urbano:

- **Escenario 1.** Representa las condiciones de predesarrollo del campus. Se seleccionará para ello el año 1997 al considerarse una etapa en la que la superficie no ha sufrido todavía grandes modificaciones.
- **Escenario 2.** Representa las condiciones de desarrollo final del campus. Esta situación corresponde con el año 2017, en el que las obras de construcción están prácticamente finalizadas.
- **Escenario 3.** Representa las condiciones de desarrollo del campus a fecha de 2017 considerando la implementación de: (a) cubiertas verdes extensivas de *Sedum* instaladas en el 95% de los edificios (3373,65 m²); y (b) pavimentos permeables en todos los aparcamientos, carreteras y redes peatonales (22,81 ha). Dado que las cubiertas verdes representan una pequeña proporción del área de estudio, la escorrentía se contabilizará considerando ambas propuestas conjuntamente.

Estos escenarios tienen por objetivo ilustrar la variación en la escorrentía producida en función de distintos cambios de coberturas de suelo. El procedimiento llevado a cabo para la estimación de la escorrentía superficial se ha desarrollado fundamentalmente en dos fases [48]:

- I. Estimación del umbral de escorrentía medio del campus. Consiste en hallar aquella parte de la precipitación que es interceptada por el suelo y la vegetación antes de generar escorrentía superficial. El método más empleado para ello es el del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) [49], el cual se aplicará en este estudio.

- II. Estimación de la escorrentía superficial producida. En esta segunda fase se obtienen los caudales e hidrogramas generados por la escorrentía superficial. Los métodos más empleados para modelar este proceso son el Método Racional [50], el método de Chow [51], el hidrograma unitario adimensional del SCS [52] y el hidrograma unitario triangular de Témez [53]. En este caso, se empleará el Método Racional para el cálculo de los caudales máximos y el hidrograma se construirá aplicando el hidrograma unitario adimensional del SCS.

El estudio hidrológico puede abordarse a partir de precipitaciones reales o supuestas en función de la disponibilidad de datos pluviométricos. En este caso, se emplearán lluvias sintéticas para tres periodos de retorno (2, 5 y 10 años).

3.3.1. Datos hidrometeorológicos: Precipitación máxima diaria para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años

El periodo de retorno representa la probabilidad de ocurrencia de un evento y se expresa como la frecuencia media, en años, con la que se pueden producir eventos de magnitud superior a su cuantil correspondiente. Dado que las redes de drenaje urbanas se diseñan para periodos relativamente bajos [54], la estimación de la escorrentía superficial se realizará en base a una precipitación máxima diaria sintética obtenida para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años. En España, la precipitación máxima diaria puede obtenerse de manera breve y fiable a través del método de las “Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular” desarrollado por el Ministerio de Fomento y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), basado en el análisis estadístico de 26 regiones geográficas, procedentes de la agrupación de 1545 estaciones con 30 o más años de registro [55]. El cálculo de los cuantiles de lluvia para diferentes periodos de retorno se realiza a partir de isolíneas representadas en una serie de mapas, en los que se reflejan valores regionales del coeficiente de variación y valores medios de la máxima precipitación diaria anual. El área de estudio (Elche) se identifica en la hoja “4-5. Murcia” (Figura A1), correspondiéndole un valor de precipitación media diaria (P) de 48 mm y un coeficiente de variación (Cv) de 0,51. A partir del valor Cv y para los periodos de retorno buscados (T), se obtiene el cuantil adimensional regional (Yt) (también conocido como factor de amplificación), empleando la tabla predefinida en el método que relaciona ambos parámetros (Figura A2). Finalmente, el cuantil local Xt o precipitación máxima diaria para un periodo T determinado se calcula mediante el producto $X_t = Y_t \cdot P$. Los resultados obtenidos se representan en la Tabla 4.

Tabla 4. Precipitación máxima diaria (X_t) para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

T (años)	Yt	Xt (mm/día)
2	0,883	42,4
5	1,301	62,4
10	1,625	78,0

3.3.2. Cálculo de los umbrales medios de escorrentía a partir del Método del Número de Curva del SCS

Método SCS-CN

El método del Número de Curva fue desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS) de EEUU en 1972, actualmente denominado *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), para estimar la escorrentía superficial generada en una cuenca hidrográfica durante un episodio de lluvia. Se trata de un procedimiento ampliamente extendido a nivel mundial en el campo de la Ingeniería Hidrológica dada su simplicidad de uso, formando hoy en día parte de numerosos modelos hidrológicos informáticos, como el SWMM, el HEC-HMS o el *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).

Este método supone que cada complejo suelo-vegetación presenta un límite en su capacidad de infiltración inicial por debajo del cual toda el agua es interceptada y la escorrentía superficial es nula. Superado ese umbral las abstracciones (pérdidas que no contribuyen a la escorrentía directa) van disminuyendo progresivamente, de manera que el porcentaje de precipitación caída que genera escorrentía aumenta con el tiempo [48]. Esta precipitación mínima requerida antes de que se inicie el proceso de escorrentía se conoce como umbral de escorrentía (P_0) o abstracción inicial (I_a). Dado que el valor de P_0 no es sencillo de determinar, se asume que es una función del potencial máximo de retención de humedad del suelo o abstracción total (S), generándose la siguiente relación:

$$P_0 = \lambda \cdot S \quad (5)$$

donde λ representa la constante de abstracción inicial para la que se asume un valor de 0,2.

El comportamiento hidrológico de cada complejo suelo-vegetación puede representarse gráficamente a través de una curva característica adimensional a la que se le atribuye un valor comprendido entre 0 y 100 conocido como Número de Curva o Número Hidrológico (CN). Los valores de P_0 y CN se encuentran tabulados y recogidos, respectivamente, en la norma española 5.2-IC de drenaje superficial [56] y en el libro nacional de ingeniería hidráulica del NRCS [57]. Los valores de P_0 (mm) y CN pueden relacionarse fácilmente a través de la Ecuación 6:

$$P_0 = \frac{5080}{CN} - 50,8 \quad (6)$$

Cuanto más pequeño sea el valor de P_0 (o mayor el valor de CN) mayor será el potencial para producir escorrentía.

En ambos casos, los valores de CN y P_0 se expresan en función del uso/cobertura de la superficie, pendiente (distinguiendo entre pendientes mayores o menores del 3%), medidas de conservación aplicadas en los cultivos, contenido previo de humedad (AMC) y tipo de suelo (HSG), dividido éste

último en cuatro categorías hidrológicas (A, B, C y D), de más arenoso (A) a más arcilloso (D). Por otro lado, el método SCS-CN define tres tipos de AMC en función de la humedad del suelo en los cinco días previos al evento de precipitación: I (condiciones secas), II (condiciones medias) y III (condiciones húmedas).

Valores aplicados en el área de estudio

La asignación del grupo hidrológico (HSG) constituye una de las mayores incertidumbres de este método [58], especialmente en ambientes semiáridos, donde los suelos son más incipientes, heterogéneos y dependientes de la roca madre [23]. En el presente trabajo, se consultaron las tablas desarrolladas en el trabajo de Camarasa *et al.* [23], en el cual se consideran factores litológicos, geomorfológicos y edafológicos (Figura A3), y se compararon con los valores que proporcionaría el mapa de la figura 2.7 de la Norma 5.2-IC (Figura A4). Consultando el visor de la Generalitat Valenciana [59] y el mapa de suelos de España a escala 1:1.000.000 del Instituto Geográfico Nacional [60], se observa que el campus se sitúa sobre una llanura aluvial de sedimentos cuaternarios (gravas, arenas y limos arcillosos) (Figura A5) y se caracteriza por la presencia de haplocalcids (Figura A6). Para ambos casos, se obtuvo como resultado una categoría de tipo C, correspondiente a la siguiente capacidad de infiltración del suelo (Tabla 5):

Tabla 5. Grupos hidrológicos de suelo a efectos de la determinación del valor inicial del umbral de escorrentía. Tabla adaptada de la Norma 5.2-IC [56].

Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Nota: Los terrenos con nivel freático alto se incluirán en el Grupo D.

Finalmente, se seleccionaron los valores de P_0 y CN que mejor se adecuaron a la clasificación inicial realizada para el análisis de los cambios de coberturas terrestres (punto 3.2.1, Tabla 2), los cuales quedan

recogidos en la Tabla 6. Los valores de CN de las tablas americanas se convirtieron a P_0 mediante la Ecuación 6, mientras que los valores de P_0 se extrajeron de las tablas españolas para una pendiente media del campus inferior al 3%. Esta última se calculó en QGIS a partir de un modelo digital de pendientes (MDP) con paso de malla de 5 m, descargado directamente del Instituto Geográfico Nacional [44].

Los valores tabulados de P_0 y CN suponen un grado de humedad previa del suelo normal (AMC II), que puede emplearse de forma estándar cuando el procedimiento no se aplica a precipitaciones reales [48], como es el caso que nos ocupa. Sin embargo, la Norma 5.2-IC proporciona una serie de coeficientes correctores en función de la región de estudio y el periodo de retorno considerado que se empleará más adelante para adaptar este parámetro a las condiciones del territorio.

Tabla 6. Valores iniciales de P_0 y CN asignados a las cubiertas de suelo definidas en el área de estudio bajo condiciones medias de humedad. Para los valores de CN se indica entre paréntesis su equivalencia a P_0 tras aplicar la Ecuación 6.

P_0 inicial (mm)	CN inicial	Cubiertas de suelo
0		Cuerpo de agua
1		Asfalto, cemento y hormigón
	96 (2.1)	Césped artificial, suelos con cubierta mixta (jardines secos)
	87 (7.6)	Suelo desnudo (camino de tierra)
8		Suelo desnudo (área en construcción)
	86 (8.3)	Suelo desnudo (espacios verdes con vegetación en crecimiento: cobertura de la vegetación < 50%)
	74 (17.8)	Suelo con cubierta natural (espacios verdes con vegetación crecida: cobertura de la vegetación > 75%)
22		Suelo con cubierta natural (cultivos*)

*El tipo de cultivo histórico fue consultado a través del Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA), correspondiendo a la descripción de “Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío” de la tabla 2.3 de la Norma 5.2-IC.

Cuando la cuenca de estudio presenta más de un complejo suelo-vegetación, puede calcularse un valor de P_0 medio para toda el área a partir de la superficie conocida de cada cubierta terrestre [48]:

$$P_0(w) = \sum_i S_i \cdot P_0(i) \quad (7)$$

donde $P_0(w)$ es el umbral de escorrentía medio (mm); S_i es la proporción de cubierta i ; y $P_0(i)$ es el valor inicial de P_0 de la cubierta i (mm). Este procedimiento se aplicó en el área de estudio para obtener un

valor medio de P_0 a partir del cual analizar la producción de escorrentía superficial a lo largo del desarrollo del campus.

Con el objetivo de considerar las condiciones previas de humedad del suelo en la región, previa estimación de la escorrentía superficial para los tres eventos de precipitación diaria considerados (42.4 mm, 62.4 mm y 78 mm), el valor medio de P_0 fue calibrado aplicando el coeficiente corrector del umbral de escorrentía previsto en la Norma 5.2-IC:

$$P_0(w_c) = P_0(w) \cdot \beta^{PM} \quad (8)$$

$$\beta^{PM} = \beta_m \cdot F_T \quad (9)$$

donde $P_0(w_c)$ representa el umbral medio calibrado; β^{PM} es el coeficiente corrector del umbral de escorrentía (adimensional); β_m representa el valor medio en la región del coeficiente corrector del umbral de escorrentía (adimensional); y F_T es un factor función del periodo de retorno T (adimensional). Consultando los mapas (Figura A7) y tablas (Figura A8) disponibles, se observa que Elche pertenece a la región 72 con valores $\beta_m = 2,1$ y $F_T = 0,67, 0,86$ y 1 para $T = 2, 5$ y 10 años, respectivamente.

Especificaciones para el Escenario 3

A pesar de que no se dispone actualmente de valores tabulados de P_0 y CN para cubiertas verdes y pavimentos permeables, cada vez son más los estudios enfocados en determinar el número de curva de estas infraestructuras a partir de ensayos en campo y a escala de laboratorio. Para pavimentos permeables como asfaltos u hormigones porosos, se han registrado valores de CN comprendidos entre 45-85 en estudios realizados en Carolina del Norte, dependiendo de la profundidad de la subbase permeable y la composición del suelo que conforma la subrasante del pavimento [61]. Sin embargo, en este estudio se seguirán los rangos recomendados por el *NC Cooperative Extension* de entre 75-80 [62]; seleccionando un CN de 80 ($P_0 = 12,7$ mm) para un HSG C. En cuanto a cubiertas verdes, el número de valores de CN documentados difiere según la región climática de estudio y las condiciones experimentales. Por ejemplo, en Liu *et al.* [63] se obtuvieron rangos de valores de 93-98 para cubiertas verdes vegetadas y desnudas, mientras que Getter *et al.* [18] alcanzaron valores de CN de 84, 87, 89 y 90 para cubiertas verdes con pendientes del 2, 7, 15 y 25%, respectivamente. En nuestro caso, se seleccionará un valor de CN de 87 ($P_0 = 7,59$ mm) para cubiertas verdes extensivas de *Sedum* con una pendiente fija para todos los edificios del 7% que asegure un buen drenaje.

3.3.3. Cálculo de caudales máximos aplicando el Método Racional

Método Racional

El Método Racional es un modelo discreto, originalmente propuesto por Kuichling en 1889, empleado en la obtención del caudal máximo de escorrentía Q de una cuenca para un periodo de retorno determinado [64]. Es un método ampliamente extendido en el diseño de sistemas de alcantarillado y estructuras de drenaje (p.e. carreteras) dada la simplicidad y facilidad con la que es posible obtener los datos necesarios para su aplicación. En España fue modificado por el profesor J.R. Témez para la Dirección General de Carreteras en base a datos empíricos de varias cuencas aforadas y forma parte a día de hoy de la Norma 5.2-IC de drenaje superficial. Si bien es cierto que el avance computacional y el mayor conocimiento científico en hidrología ha dado lugar al desarrollo de modelos con mayor base física que permiten, además, incluir la variable temporal; el uso del Método Racional puede justificarse como método de prediseño o emplearse en cuencas pequeñas inferiores a 50 km² cuando no se dispone de datos sobre caudales [56,65].

Este método asume que, para una precipitación constante de intensidad I que cae homogéneamente sobre una cuenca de superficie A , la parte de la lluvia que es transformada en escorrentía generará un caudal en el punto de salida de la cuenca que irá creciendo hasta alcanzar un punto de equilibrio en el cual el caudal es constante en el tiempo:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (10)$$

que aplicado en unidades de medición habituales da lugar a la conocida expresión:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (11)$$

donde Q es el caudal de salida en m³/s; C es el coeficiente de escorrentía (adimensional); I es la intensidad de la precipitación en mm/h y A es el área de la cuenca en km². Este caudal conforma el caudal máximo de escorrentía o caudal pico, y se alcanza generalmente para una duración de la lluvia equivalente al tiempo de concentración de la cuenca (T_c).

Parámetros de entrada en el área de estudio

- *Tiempo de concentración*

Asumiendo la hipótesis del Método Racional, el tiempo de concentración representa el tiempo mínimo necesario desde el inicio del aguacero para que toda la superficie de la misma contribuya a generar escorrentía en el punto de desagüe [56]. El tiempo de concentración depende, por un lado, de las características geomorfológicas de la cuenca, que condicionan la evacuación de la escorrentía y, por otro lado, de la intensidad de la precipitación, ya que la velocidad del flujo varía en función del caudal de

escorrentía generado. En entornos urbanos, la rugosidad de las superficies se ve notablemente reducida; dando lugar a mayores escorrentías que son evacuadas rápidamente a través de una red de drenaje artificial. Todo ello origina, como consecuencia, una disminución en los tiempos de concentración (normalmente inferiores a 1h) [17]. En zonas urbanas muy impermeabilizadas, el flujo de entrada en la red de drenaje varía entre 5 y 10 minutos, mientras que en el caso de áreas no conectadas directamente a la red o en menor presencia de infraestructuras de captación, el tiempo de concentración ronda los 15-20 minutos [66]. Dado que no se dispone de datos suficientes para caracterizar la red fluvial del escenario 1 (año 1997), y el Método Racional estipula una duración mínima de 10 minutos (0,167 h) para el cómputo de la intensidad de precipitación [67,68], se seleccionarán tiempos de concentración aproximados en función del grado de impermeabilidad del campus. En este caso, se asignará una duración de la lluvia equivalente a tiempos de concentración de 20 minutos para el escenario 1 y de 10 minutos para los escenarios 2 y 3.

- *Intensidad de precipitación*

La intensidad de precipitación I_t se define como la intensidad media correspondiente a una duración de la lluvia equivalente al tiempo de concentración para distintos periodos de retorno. La determinación de este parámetro se realiza normalmente a partir de una serie de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) confeccionadas a partir de hietogramas representativos de la región de estudio. En España, la Dirección General de Carreteras propone una familia de curvas IDF caracterizadas por un factor regional, cuya expresión es la que sigue [56]:

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{3,5287 - 2,5287 \cdot t^{0,1}} \quad (12)$$

$$I_d = \frac{P_d}{24} \quad (13)$$

donde I_t es la intensidad media, en mm/h, asociada a un período de retorno T y a una duración del aguacero t ; I_d es la intensidad media diaria de precipitación en mm/h; P_d es la precipitación máxima diaria en mm; I_1 es la intensidad horaria de precipitación en mm/h; I_1/I_d es el parámetro que relaciona la intensidad horaria con la diaria del mismo periodo de retorno y que depende de la zona de estudio y t es el periodo, en horas, para el que se quiere evaluar la intensidad de precipitación del aguacero. En este caso, I_d se obtiene mediante el método de las “Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular” descrito en el punto 3.3.1, t equivale al tiempo de concentración de cada escenario de desarrollo urbano establecido en el campus y el coeficiente I_1/I_d representativo de la región de estudio se lee directamente del mapa proporcionado por la Norma 5.2-IC de drenaje superficial (Figura A9), para el que se obtiene

un valor de 11; esto quiere decir que la intensidad en la hora más lluviosa es 11 veces mayor que la intensidad media de todo el día.

- *Coefficiente de escorrentía*

El coeficiente de escorrentía C , representa la parte de la precipitación total de intensidad I_t que genera el caudal de escorrentía en el punto de desagüe de la cuenca. Éste se obtendrá mediante la fórmula proporcionada por la Instrucción de Carreteras en la Norma 5.2-IC de drenaje superficial (Ecuación 14) [56], basada en el método del número de curva del SCS.

$$C = 0 \quad \text{si } P_d \cdot K_A \leq P_0$$

$$C = \frac{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} + 11\right)^2} \quad \text{si } P_d \cdot K_A > P_0 \quad (14)$$

donde C es el coeficiente de escorrentía (adimensional) en el rango de valores entre 0 y 1; P_d es la precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno T considerado (mm); K_A es el factor reductor de la precipitación por área de la cuenca ($K=1$ para áreas inferiores a 1 km²) y P_0 representa el umbral de escorrentía (mm). En este estudio, se empleará un umbral medio calibrado (Ecuación 8) para cada escenario de desarrollo urbano considerado.

3.3.4. Hidrograma unitario adimensional del SCS

En ausencia de hidrogramas naturales propios de la región de estudio, se hace necesario recurrir a hidrogramas sintéticos que dependan solamente de unos pocos parámetros. Estos modelos se presentan como ideas aproximadas de la respuesta de una cuenca pequeña a unas precipitaciones cortas y homogéneas, permitiendo conocer la distribución de los caudales resultantes a lo largo del tiempo. En este estudio se empleará el hidrograma unitario adimensional del SCS, el cual fue desarrollado por Victor Mockus a partir de numerosos hidrogramas unitarios pertenecientes a cuencas de diversos tamaños y procedencias [52].

Para su construcción se hace uso de dos parámetros adimensionales: t/T_p y Q/Q_p , siendo Q_p el caudal punta y T_p el tiempo en el que se produce éste (Figura 2). La relación entre estas dos variables se define mediante la siguiente expresión:

$$\frac{Q_p}{A} = 2,08 \cdot \frac{1}{T_p} \quad (15)$$

donde Q_p es el caudal punta (m³/s-mm); T_p es el tiempo que transcurre hasta que se alcanza la punta del hidrograma (h) y A es el área de la cuenca (km²).

Hidrograma unitario adimensional del SCS

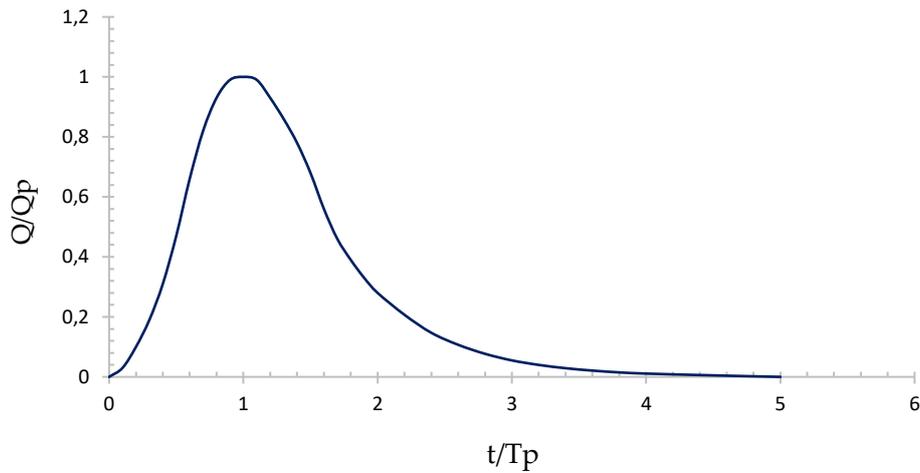


Figura 2. Hidrograma unitario adimensional del SCS.

Puesto que se conoce tanto el área de la cuenca como el caudal pico a la salida de la misma, aplicando la tabla proporcionada por el NRCS (Tabla 7) es posible definir el hidrograma global del campus para cada escenario y periodo de retorno.

Tabla 7. Hidrograma unitario adimensional del SCS.

Hidrograma unitario adimensional del SCS					
t/T _p	Q/Q _p	t/T _p	Q/Q _p	t/T _p	Q/Q _p
0	0	1,1	0,99	2,4	0,147
0,1	0,03	1,2	0,93	2,6	0,107
0,2	0,1	1,3	0,86	2,8	0,077
0,3	0,19	1,4	0,78	3	0,055
0,4	0,31	1,5	0,68	3,2	0,04
0,5	0,47	1,6	0,56	3,4	0,029
0,6	0,66	1,7	0,46	3,6	0,021
0,7	0,82	1,8	0,39	3,8	0,015
0,8	0,93	1,9	0,33	4	0,011
0,9	0,99	2	0,28	4,5	0,005
1	1	2,2	0,207	5	0

4. Resultados y discusión

La construcción del campus se establece bajo un contexto socioeconómico en transición, en el que la contribución al PIB de los sectores energéticos, agrícolas, ganaderos y pesqueros disminuye notablemente, dando paso a una economía consumidora de grandes cantidades de suelo, ligada a una creciente actividad constructora y a un mayor desarrollo del sector terciario, principalmente del turismo

costero [69]. Consecuentemente, surge la necesidad de proveer nuevos servicios como centros comerciales, hospitales, escuelas o universidades. Dicha transformación se manifiesta en la pérdida de suelos de alta productividad [70] y en el deterioro de servicios ecosistémicos asociados a la fragmentación de paisajes agrícolas tradicionales, como el agro-ecosistema del Palmeral de Elche. Gracias a este trabajo, se ha podido detectar la respuesta hidrológica asociada a la progresiva evolución del sellado del suelo en el campus universitario, resultante de la transformación de un paisaje agrícola periurbano en paisaje urbano.

4.1. Evolución espaciotemporal de las coberturas del suelo

Analizar las superficies urbanas como unidades con un intercambio de energía y materia propio permite comprender el efecto que genera cada transformación superficial en el balance hídrico y anticipar problemas ambientales futuros. Así pues, resulta necesario definir y clasificar previamente dichas unidades urbanas.

A lo largo de este estudio se desarrollaron una serie de mapas históricos de coberturas terrestres (Figura A10), a partir de los cuales, se analizaron los cambios ocurridos a lo largo del proceso de construcción del campus universitario (1997-2017).

La comparación de los dos mapas representados en la Figura 3 pertenecientes a los años 1997 y 2017 se llevó a cabo a partir de una matriz de transición (Tabla A1) siguiendo la metodología propuesta por Pontius *et al.* [46], la cual permite responder a una serie de preguntas con un creciente grado de detalle, partiendo del análisis del cambio neto de cada categoría hasta la detección de la distancia a la que se producen estos cambios. No obstante, este estudio se centró únicamente en los indicadores reflejados en la Tabla 8, pues el objetivo residía en cuantificar estas transformaciones y no en identificar las fuerzas impulsoras de las mismas. A raíz de estos resultados, se observa que la cantidad de superficie del campus que permaneció constante entre 1997 y 2017 es de 29,85 ha, representando algo menos de la mitad del área de estudio (43,35 %). Por lo tanto, el cambio total fue de 39 ha (47,83 %), del cual 29,52 ha (42,88 %) corresponden a cambios netos y 9,48 ha (13,77 %) a intercambios entre categorías. Como era de esperar, las cubiertas naturales asociadas a mosaicos de cultivos anuales y de regadío registraron las mayores pérdidas netas (34,19 %) e intercambios (15,76 %), debido en parte a que esta es la categoría que mayor superficie ocupa en el campus. Paralelamente, el desarrollo de aparcamientos, carreteras, redes peatonales y edificaciones propició la introducción de materiales impermeables como el cemento/hormigón o el asfalto, para los cuales se registraron unas ganancias netas del 23,78 % y 13,03 %, respectivamente.

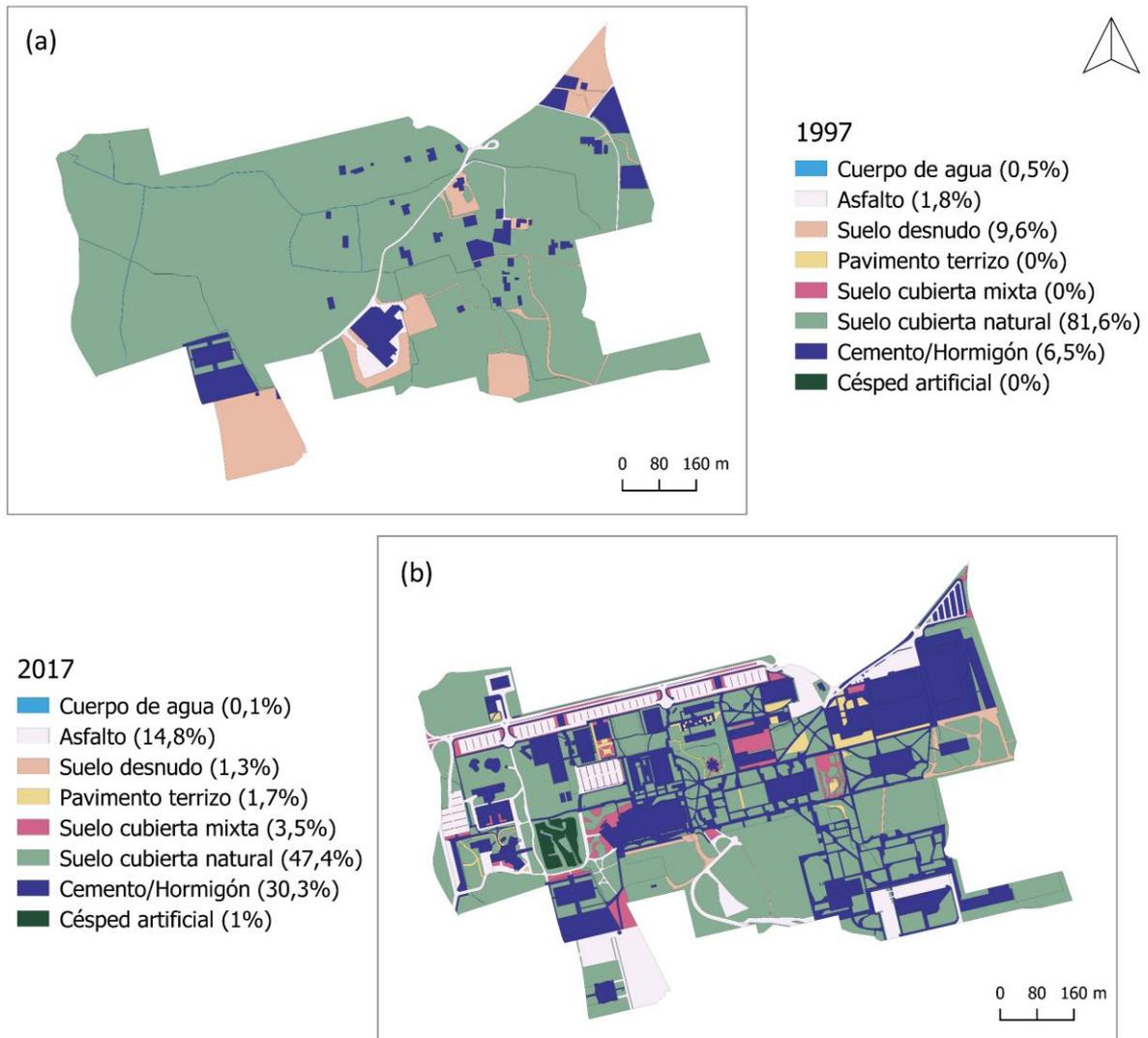


Figura 3. Mapas de coberturas de suelo del campus universitario en (a) 1997 y (b) 2017.

Si bien es cierto que la mayoría de los cambios corresponden a cambios netos puros o casi puros, es decir, que las superficies no han sufrido a penas modificaciones, como es el caso del césped artificial que compone el campo de golf o los jardines secos que bordean las áreas de aparcamiento; se ha podido detectar cómo los pavimentos terrizos se han ido incorporando en pequeñas proporciones en las redes peatonales, especialmente en el sector noreste que rodea las instalaciones deportivas, lo que podría sugerir un cambio de estrategia en la gestión del campus a lo largo de estos últimos años. Además, el acceso a los vehículos fue progresivamente restringiéndose a medida que se reemplazaban redes viarias por redes peatonales durante los primeros años; una decisión que, intencionadamente o no, podría limitar la deposición de especies contaminantes en las superficies y su posterior arrastre por escorrentía.

Tabla 8. Porcentaje de superficie del campus que experimentó cambios de cobertura de suelo entre 1997-2017.

	Persistencia	Ganancia	Pérdida	Cambio total	Cambio neto	Intercambio
Asfalto	0,69	14,11	0,74	14,85	13,03	2,16
Cemento/Hormigón	3,03	27,26	2,39	29,65	23,78	6,95
Pavimento terrizo	0,00	1,66	0,00	1,66	1,66	0,00
Suelo con cubierta natural	39,54	7,88	28,97	36,85	34,19	15,76
Suelo con cubierta mixta	0,00	3,46	0,00	3,46	3,46	0,00
Suelo desnudo	0,02	1,29	6,62	7,91	8,33	2,57
Cuerpo de agua	0,07	0,04	0,27	0,31	0,35	0,09
Césped artificial	0,00	0,96	0,00	0,96	0,96	0,00
Total	43,35	56,66	38,99	47,83	42,88	13,77

4.2. Impacto de los cambios de cobertura en la escorrentía superficial

Los problemas relacionados con la calidad y disponibilidad del agua en las ciudades se encuentran estrechamente vinculados al tipo de desarrollo urbanístico, sustentado éste por unas necesidades y patrones de consumo específicos [71]. Por ello, detectar las alteraciones que se producen en el ciclo hidrológico constituye el punto de partida para frenar el deterioro del agua en un mundo cada vez más urbanizado. A nivel local, el tipo de suelo, la morfología del terreno y las condiciones climáticas permanecen constantes y los cambios hidrológicos dependen fundamentalmente del tipo de cobertura terrestre [72]. La capacidad de infiltración y retención de agua en el suelo disminuye a medida que aumenta el grado de impermeabilización del terreno [73]; lo que, intuitivamente, nos lleva a deducir que se generará mayor escorrentía. La estimación de los cambios en la producción de flujo superficial se analiza interpretando el descenso en el umbral de escorrentía (P_0) como un aumento en el potencial de producción de escorrentía, y viceversa [23].

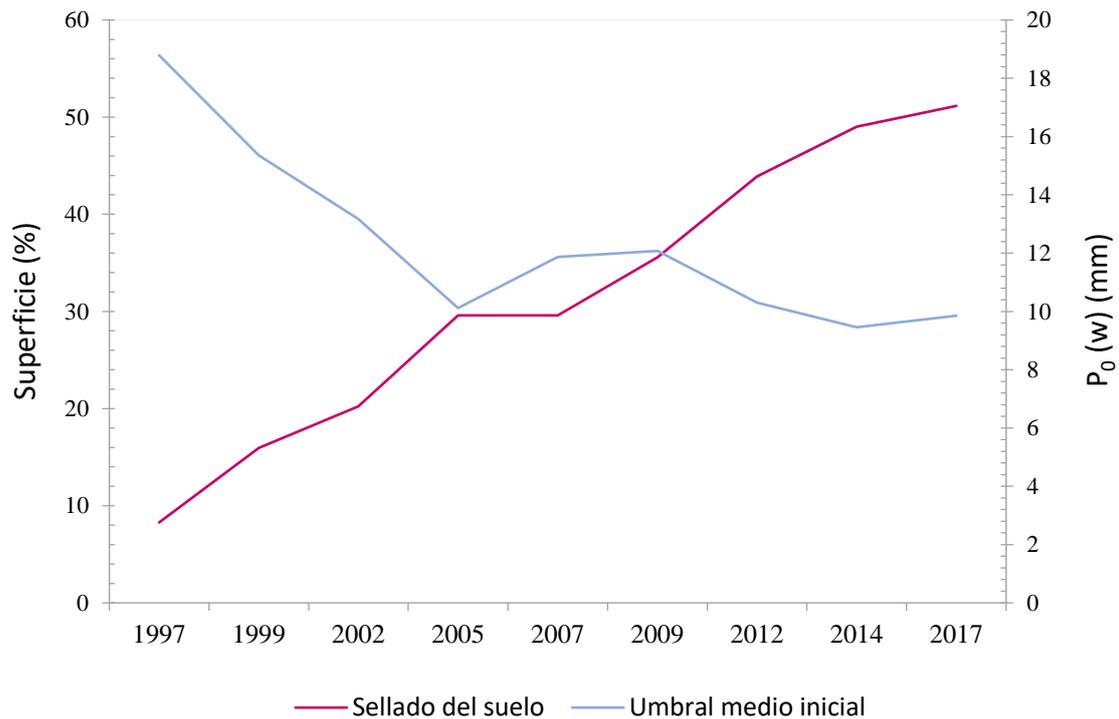


Figura 4. Representación de la evolución del sellado del suelo y umbral medio del campus entre 1997 y 2017.

Analizando el umbral medio inicial $P_0(w)$ se pudo determinar que, la modificación de las condiciones naturales del suelo (Escenario 1) a lo largo del desarrollo del campus generó un aumento del 47,5 % en el potencial de producción de escorrentía. Estos cambios se asocian al sellado progresivo del suelo entre 1997 y 2017, periodo en el que el campus experimentó una tasa de cambio anual media del 10,6 %. En la Figura 4 se observa que la superficie sellada oscila entre 5,7 ha (1997) y 35,2 ha (2017), representando en la última fecha algo más del 50% del área total del ámbito de estudio. El sellado del suelo se debe mayoritariamente a la presencia de edificaciones, aparcamientos, carreteras y redes peatonales; compuestas principalmente por materiales impermeables como cemento, hormigón o asfalto, los cuales contribuyen al 90 % de la superficie sellada. Paralelamente, el umbral medio de escorrentía, fijado en 18,79 mm para el año 1997 desciende a 9,86 mm en 2017; reflejando una tendencia positiva en el potencial de producción de escorrentía para un evento de precipitación cualquiera. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Pauleit *et al.* [15] y Xu *et al.* [19] en áreas residenciales de baja densidad.

La distribución espacial de los umbrales de escorrentía de cada superficie se muestra en la Figura 5, a partir de la cual se detectó una reducción del 28% en áreas con valores comprendidos entre 20-25 mm y, simultáneamente, un incremento del 42% y 28% para rangos de 0-5 mm y 15-20 mm, respectivamente.

Así pues, se observa un mosaico de coberturas caracterizadas mayoritariamente por valores de P_0 inferiores a 5 mm que contribuyen a generar mayores valores de escorrentía.

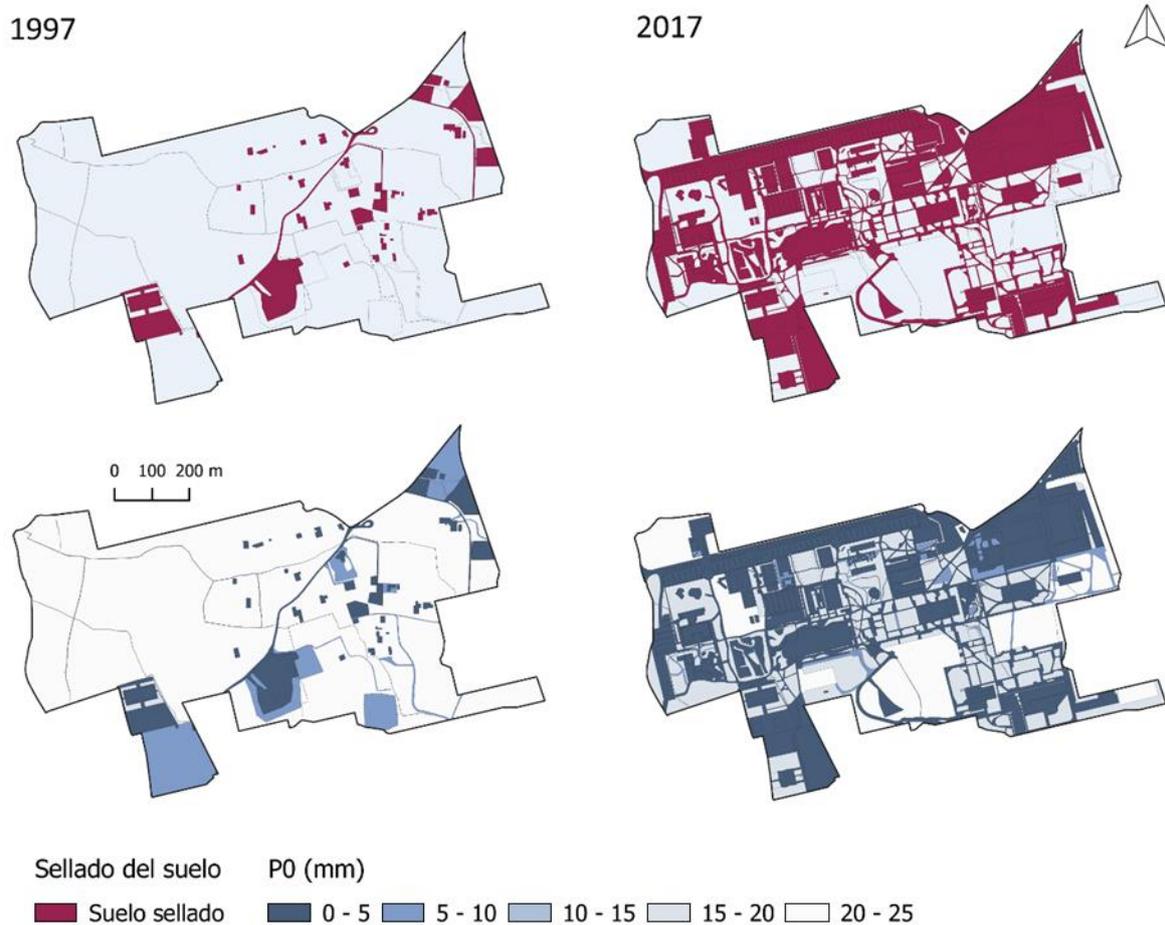


Figura 5. Distribución espacial del sellado del suelo y los umbrales de escorrentía entre 1997 y 2017.

La respuesta hidrológica depende de las propiedades del complejo suelo-vegetación, pero, además, de la duración e intensidad de la precipitación [17]. En áreas sujetas a condiciones climáticas extremas resulta imprescindible conocer los caudales y volúmenes máximos que habrán de gestionarse para diseñar infraestructuras de drenaje que prevengan las inundaciones y avenidas. Para ello, los umbrales medios calculados para cada escenario fueron calibrados para la región de estudio en función del periodo de retorno considerado (Tabla 9), y empleados en el Método Racional para la obtención del caudal pico asociado a una duración de la lluvia equivalente al tiempo de concentración.

Tabla 9. Umbral medio calibrado ($P_0 (w_c)$) obtenido mediante el método SCS-CN para cada escenario analizado y precipitaciones diarias de 42,4 mm (T=2), 62,4 mm (T=5) y 78 mm (T=10).

T (años)	β^{PM}	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
		$P_0 (w)$ (mm)	$P_0 (w_c)$ (mm)	$P_0 (w)$ (mm)	$P_0 (w_c)$ (mm)	$P_0 (w)$ (mm)	$P_0 (w_c)$ (mm)
2	1,407		26,44		13,87		19,46
5	1,806	18,79	33,93	9,86	17,81	13,83	24,98
10	2,100		39,46		20,71		29,04

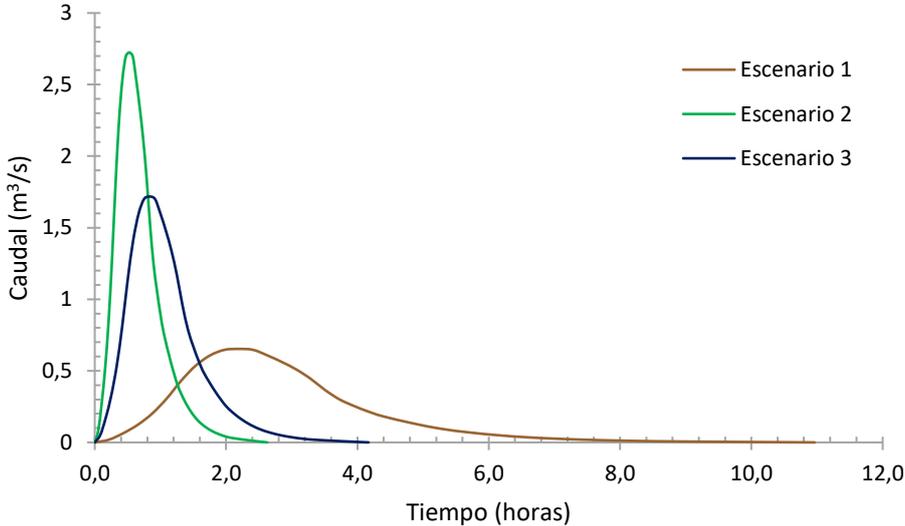
Los parámetros obtenidos al aplicar este procedimiento, así como los hidrogramas resultantes, se presentan en la Tabla 10 y la Figura 6. Como era de esperar, para cada uno de los periodos de retorno fijados, la escorrentía generada bajo condiciones de predesarrollo del campus (escenario 1) fue la más pequeña de todas debido, por un lado, a umbrales de escorrentía más elevados y, por otro, a una menor intensidad de precipitación condicionada por un mayor tiempo de concentración. En contraposición, el escenario 2 (situación de desarrollo del campus en 2017) registró los valores de escorrentía más altos, con un incremento del caudal pico del 317,23 % respecto al escenario 1 para un periodo de retorno de 2 años. Sin embargo, para periodos de retorno de 5 y 10 años, el incremento fue de 259,13 % y 237,32 %, respectivamente. Esto demuestra que la diferencia de los caudales máximos de escorrentía entre escenarios tiende a descender conforme aumenta el periodo de retorno.

Tabla 10. Intensidad (I), coeficiente de escorrentía (C) y caudal pico (Q) obtenidos mediante el Método Racional para cada escenario analizado y precipitaciones diarias de 42,4 mm (T=2), 62,4 mm (T=5) y 78 mm (T=10). *Tabla completa en Tabla A2.*

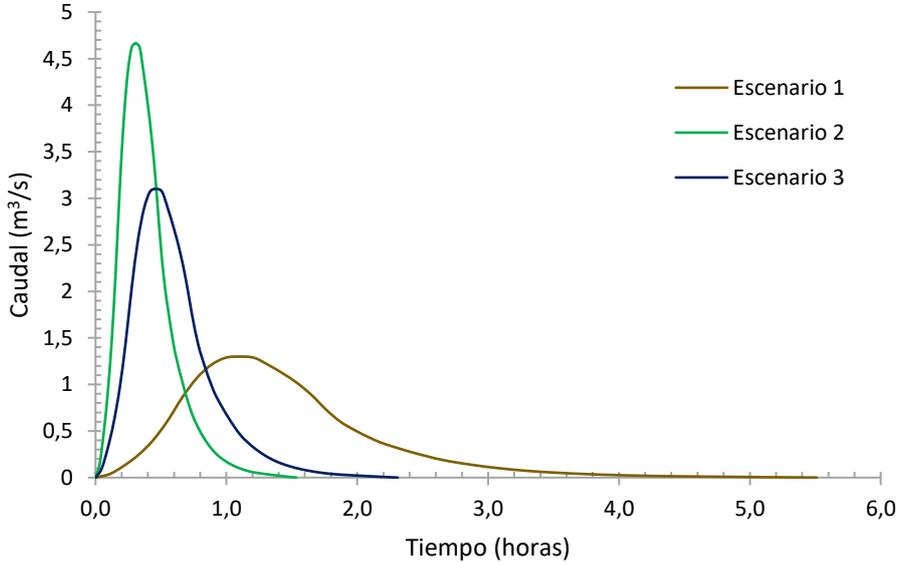
T (años)	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	I_1 (mm/h)	C_1	Q_1 (m ³ /s)	I_2 (mm/h)	C_2	Q_2 (m ³ /s)	I_3 (mm/h)	C_3	Q_3 (m ³ /s)
2	36,52	0,09	0,65	52,54	0,27	2,72	52,54	0,17	1,72
5	53,75	0,13	1,30	77,33	0,32	4,67	77,33	0,21	3,10
10	67,18	0,14	1,86	96,66	0,34	6,28	96,66	0,23	4,27

Como alternativa para mitigar el aumento de la escorrentía superficial, las soluciones basadas en la naturaleza se han implementado en todo el mundo como un medio de transición hacia enfoques más sostenibles y holísticos en la gestión de las aguas pluviales [25]. Las prácticas LID (p.e. celdas de bioretención, jardines de lluvia, techos verdes o pavimentos permeables) aumentan la retención de los volúmenes de escorrentía superficial y son capaces de mantener o restaurar el ciclo hidrológico natural y sus funciones ecológicas en áreas urbanas semiáridas [73,74]. A raíz del escenario 3, se confirmó el hecho de que empleando superficies menos impermeables en el campus universitario se reduciría significativamente el volumen máximo de escorrentía generada, incrementándose el potencial de

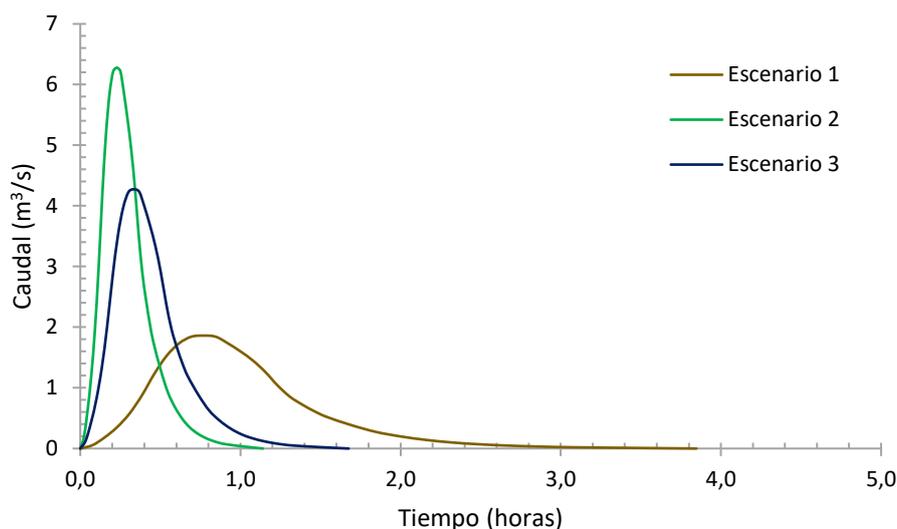
captación de agua de lluvia para su posterior reutilización. Concretamente, se produjo una disminución de entre el 31-37% en eventos de precipitación extrema asociados a periodos de retorno de 2, 5 y 10 años. Además, al introducir infraestructuras con una mayor capacidad de infiltración y retención de agua, se produce una disminución del caudal máximo y un retardo en el tiempo pico que da lugar a hidrogramas más achatados, tal y como se observa en la Figura 6.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Hidrogramas unitarios para cada escenario considerado y periodos de retorno de (a) 2 años, (b) 5 años y (c) 10 años.

La implantación de infraestructuras verdes en ambientes semiáridos requiere tener en consideración ciertas pautas de diseño; por ejemplo, las altas tasas de evapotranspiración limitan el almacenamiento del agua de lluvia recolectada a contenedores cerrados o subterráneos. Además, debido a la escasa frecuencia con la que suceden las precipitaciones, la carga contaminante arrastrada durante el primer flujo de descarga resulta más elevada, necesitando infraestructuras de mayor capacidad para su tratamiento [75]. En cuanto a la vegetación más apropiada, esta ha de ser autóctona y tolerante tanto a la sequía como a las inundaciones, con unas necesidades de riego mínimas o nulas [75]. En la región semiárida del oeste de EEUU se ha logrado implantar con éxito pavimentos permeables, jardines de lluvia, cunetas verdes, techos verdes y estanques de biorretención [76]. Estas infraestructuras no sólo permiten regular el ciclo hidrológico, sino que además aportan otra serie de beneficios ambientales, sociales y económicos. Los techos verdes poseen propiedades aislantes que permiten reducir cerca de un 0,7 % el consumo energético asociado a la climatización de los edificios [77], constituyendo una solución interesante en el área de estudio, donde las temperaturas pueden alcanzar los 38 °C en verano. Si bien es cierto que los pavimentos permeables son capaces de absorber las escorrentías repentinas procedentes de grandes tormentas, reemplazar todos los pavimentos tradicionales existentes en el campus sería extremadamente costoso. No obstante, pueden llevarse a cabo pequeñas modificaciones que mejoren la infiltración del terreno, por ejemplo, introduciendo cunetas verdes, drenes filtrantes o áreas de bioretención en las zonas de aparcamiento. En determinados casos, la acumulación de agua superficial se produce debido a la presencia de obstáculos como los que se muestran en la Figura 7; cuya solución reside en proporcionar amplias aperturas de paso y redireccionar el flujo hacia zonas ajardinadas, tratando las aguas pluviales como un recurso y no como un producto de desecho [75].



Figura 7. Acumulación de flujo en la zona de aparcamiento del sector norte tras una precipitación acumulada de 17,2 mm en 72 h (8 de enero de 2021) [78].

4.3. Fortalezas y limitaciones del estudio

La base de este trabajo se sustenta en la fotointerpretación de imágenes de alta resolución, y en la identificación de los tipos de coberturas terrestres que conforman el campus universitario, para el cual se identificaron ocho categorías con características superficiales bien diferenciadas. Algunos de los inconvenientes de trabajar a pequeñas escalas, se encuentran vinculados a la subjetividad del autor/a a la hora de definir las unidades urbanas que serán objeto de estudio; por un lado, debido a la falta de resolución que pueda existir en la imagen y, por otro, porque no se dispone a día de hoy de una clasificación común [27]; por lo que los tipos de coberturas de suelo empleados en los análisis difieren según el objetivo de cada estudio. Además, los materiales que componen la superficie terrestre no siempre pueden identificarse adecuadamente a partir de imágenes aéreas, por lo que los términos “uso del suelo” y “cobertura de suelo” se han ido empleando indistintamente a la hora de clasificar unidades urbanas. Uno de los propósitos de este trabajo es crear una base de datos maleable que pueda incorporar nuevos atributos, tanto físicos como ambientales, y ser utilizada en futuros trabajos de investigación. Por este motivo, se desarrolló una serie de mapas históricos de coberturas y usos del suelo (Figuras A10, A11, A12) con información espacial detallada de las unidades de suelo urbano que conforman el campus universitario. La clasificación de coberturas terrestres mencionada en el presente estudio se adapta a necesidades específicas y puede no ser factible para estudios a gran escala; sin embargo, podría aplicarse a otros campus universitarios y adaptarse progresivamente hasta crear una clasificación común.

Por otro lado, la gran simplicidad, estabilidad y aceptación de los métodos hidrometeorológicos seleccionados los convierten en aproximaciones aceptables para modelar el proceso de lluvia-escorrentía en el área de estudio. Dos de las mayores debilidades del método del número de curva del SCS residen en la fuerte dependencia de un único parámetro (el CN), que debe calibrarse para cada

región, y el valor fijo de 0,2 para la constante de abstracción inicial [79]. Seleccionar con precisión los valores de CN que caracterizan una zona no resulta nada fácil; por ello, para este trabajo se emplearon tanto las tablas tabuladas españolas como las americanas, priorizando las primeras y reservando las segundas para aquellas coberturas de suelo que no encajaron con las descripciones proporcionadas por la Norma 5.2-IC de drenaje superficial. Posteriormente, se calculó un valor medio de P_0 para todo el campus que fue calibrado para estimar la escorrentía superficial generada. La escorrentía obtenida a partir de un umbral medio puede subestimarse o sobreestimarse si los rangos de P_0 o CN son amplios [49]; pero dado que el propósito de este trabajo no residía en adquirir resultados precisos sino en evaluar diferentes comportamientos hidrológicos bajo diferentes condiciones del terreno, no se consideraron estas variaciones. En cuanto a la tasa de abstracción inicial, podría interpretarse como una variable regional, ya que se ha podido observar que este valor se mueve entre rangos de 0-0,3 [80], ajustándose mejor a λ comprendidos entre 0,05 y 0,10 en lugar del valor de 0,20 supuesto inicialmente [48,81]. A tal efecto, se necesitará un mayor número de investigaciones que respalden el cambio de las actuales tablas de CN.

5. Conclusiones

A lo largo de los años, el sellado del suelo se ha ido haciendo hueco como parámetro de medición de la calidad ambiental, la huella ecológica y la sostenibilidad urbana [82,83]. En este sentido, las universidades se enfrentan a un reto de planificación urbana en el que el reciclaje del suelo y la integración de la ecología en el diseño de nuevas infraestructuras en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, desempeñarán un papel fundamental a la hora de limitar el sellado del suelo. No cabe duda de que la impermeabilización del terreno repercute negativamente en el ciclo hidrológico y, por ende, cuantificar la magnitud de estos impactos resulta indispensable para formular estrategias de gestión y planificación integral que mejoren la resiliencia urbana a eventos climáticos extremos, especialmente en regiones semiáridas.

Con ayuda de herramientas SIG y teledetección se llevó a cabo un análisis espaciotemporal de las coberturas terrestres existentes en el campus universitario de Elche y se cuantificó la escorrentía superficial generada bajo tres escenarios de desarrollo urbano. De los resultados se puede concluir que, en primer lugar, el campus de la UMH responde a un modelo de asentamiento de campus compacto urbano (UCC) [36], cuyo grado de impermeabilidad y respuesta hidrológica se asemeja a los de las áreas residenciales de baja densidad. Segundo, al cuantificar la escorrentía directa derivada del desarrollo del campus (transformación del escenario 1 al escenario 2), queda de manifiesto el impacto que conlleva el sellado del suelo en un proceso de urbanización. En tercer y último lugar, gracias al escenario 3 se ha podido confirmar los beneficios asociados a la implantación de prácticas LID, una estrategia local

eficiente, generalmente compatible con las infraestructuras grises preexistentes y adaptables a condiciones semiáridas. Además, este trabajo proporciona una base de datos espaciales (mapas históricos de cobertura y uso del suelo) que puede ser progresivamente ampliada y empleada en otro tipo de estudios.

6. Bibliografía

1. Maharjan, M.; Babel, M.S. Impact of the uncertainty of future climates on discharge in the Nam Ou river basin, LAO PDR. In *Managing Water Resources Under Climate Uncertainty: Examples from Asia, Europe, Latin America, and Australia*; 2015; pp. 65–88 ISBN 9783319104676.
2. Scalenghe, R.; Ajmone-Marsan, F. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landsc. Urban Plan.* **2009**, *90*, 1–10, doi:10.1016/j.landurbplan.2008.10.011.
3. Artmann, M. Managing urban soil sealing in Munich and Leipzig (Germany)-From a wicked problem to clumsy solutions. *Land use policy* **2015**, *46*, 21–37, doi:10.1016/j.landusepol.2015.02.004.
4. Recanatesi, F.; Petroselli, A.; Ripa, M.N.; Leone, A. Assessment of stormwater runoff management practices and BMPs under soil sealing: A study case in a peri-urban watershed of the metropolitan area of Rome (Italy). *J. Environ. Manage.* **2017**, *201*, 6–18, doi:10.1016/j.jenvman.2017.06.024.
5. Nestroy, O. Soil sealing in Austria and its consequences. *Ecohydrol. Hydrobiol.* **2006**, *6*, 171–173, doi:10.1016/S1642-3593(06)70139-2.
6. Novák, T.J.; Balla, D.; Kamp, J. Changes in anthropogenic influence on soils across Europe 1990–2018. *Appl. Geogr.* **2020**, *124*, doi:10.1016/j.apgeog.2020.102294.
7. Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) *World Soil Day- 5 December 2019 Overview and key results*; Rome, Italy, 2020; p. 34; ISBN 9788578110796.
8. Rio, M.; Salles, C.; Cernesson, F.; Marchand, P.; Tournoud, M.G. An original urban land cover representation and its effects on rain event-based runoff and TSS modelling. *J. Hydrol.* **2020**, *586*, 124865, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124865.
9. Fox, D.M.; Witz, E.; Blanc, V.; Soulié, C.; Penalver-Navarro, M.; Dervieux, A. A case study of land cover change (1950–2003) and runoff in a Mediterranean catchment. *Appl. Geogr.* **2012**, *32*, 810–821, doi:10.1016/j.apgeog.2011.07.007.
10. Vanderhaegen, S.; De Munter, K.; Canters, F. High resolution modelling and forecasting of soil sealing density at the regional scale. *Landsc. Urban Plan.* **2015**, *133*, 133–142, doi:10.1016/j.landurbplan.2014.09.016.
11. Añó Vidal, C.; Pascual Aguilar, J.A.; Sánchez Díaz, J. Capacidad de uso y sellado antropogénico del suelo en la franja litoral de la provincia de Castellón. *Investig. Geográficas* **2005**, *38*, 65, doi:10.14198/ingeo2005.38.04.
12. Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) *Documento de trabajo de los servicios de la Comisión. Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo*; Comisión Europea: Bruselas, 15.5.2012, SWD, 2012;101 final/2; p. 69.
13. Mahmoud, S.H.; Alazba, A.A. Hydrological response to land cover changes and human activities in arid regions using a geographic information system and remote sensing. *PLoS One* **2015**, *10*, 1–19, doi:10.1371/journal.pone.0125805.
14. Hörmann, G.; Horn, A.; Fohrer, N. The evaluation of land-use options in mesoscale catchments: Prospects and limitations of eco-hydrological models. *Ecol. Modell.* **2005**, *187*, 3–14, doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.01.022.
15. Pauleit, S.; Duhme, F. Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landsc. Urban Plan.* **2000**, *52*, 1–20, doi:10.1016/S0169-2046(00)00109-2.
16. Prokop, G.; Jobstmann, H.; Schönbauer, A. *Overview of best practices for limiting soil sealing or mitigating its effects in EU-27*; Environment Agency Austria-European Commission: Wien, Austria, 2011; p. 227; ISBN 9789279206696.
17. Fletcher, T.D.; Andrieu, H.; Hamel, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Adv. Water Resour.* **2013**, *51*, 261–279, doi:10.1016/j.advwatres.2012.09.001.
18. Getter, K.L.; Rowe, D.B.; Andresen, J.A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof

- stormwater retention. *Ecol. Eng.* **2007**, *31*, 225–231, doi:10.1016/j.ecoleng.2007.06.004.
19. Xu, C.; Rahman, M.; Haase, D.; Wu, Y.; Su, M.; Pauleit, S. Surface runoff in urban areas: The role of residential cover and urban growth form. *J. Clean. Prod.* **2020**, *262*, 121421, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121421.
 20. German League for Nature and Environment (DNR); European Environmental Bureau (EEB) *Soil: worth standing your ground for*; European Environmental Bureau (EEB): Brussels, Belgium, 2011; p. 16.
 21. Zhou, L.; Shen, G.; Li, C.; Chen, T.; Li, S.; Brown, R. Impacts of land covers on stormwater runoff and urban development: A land use and parcel based regression approach. *Land use policy* **2021**, *103*, 105280, doi:10.1016/j.landusepol.2021.105280.
 22. Perera, T.; McGree, J.; Egodawatta, P.; Jinadasa, K.B.S.N.; Goonetilleke, A. Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban stormwater runoff. *Water Res.* **2019**, *166*, doi:10.1016/j.watres.2019.115075.
 23. Camarasa, A.M.; García, M.J.; Pascual, J.A. Análisis mediante SIG de los parámetros de producción de escorrentía. *El acceso a la Inf. Espac. y las nuevas Tecnol. Geográficas* **2006**, *1*, 49–63.
 24. Camarasa-Belmonte, A.M.; López, M.P.C.; García, E.I. Land use change, runoff generation and soil loss. Synergies and compensations in a Mediterranean ephemeral stream (Barranc del Carraixet, 1956-2011). *Bol. la Asoc. Geogr. Esp.* **2018**, *2018*, 127–153, doi:10.21138/bage.2714.
 25. Andrés-Doménech, I.; Hernández-Crespo, C.; Martín, M.; Andrés-Valeri, V.C. Characterization of wash-off from urban impervious surfaces and SuDS design criteria for source control under semi-arid conditions. *Sci. Total Environ.* **2018**, *612*, 1320–1328, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.011.
 26. Seco, R.I.; Gomez, M. Aplicación del modelo SWMM 5.0 para la estimación del arrastre de depósitos de sedimentos y contaminantes asociados en sistemas de alcantarillado unitario. In Proceedings of the 2nd IWA Spain National Young Water Professionals Conference; Madrid, Spain, 2011.
 27. Garcia Alvarado, J.M.; Perez Gonzalez, M.E.; Garcia Rodriguez, M.P. Revisión del concepto de sellado de suelos y propuesta de tipología urbana. *An. Geogr. la Univ. Complut.* **2014**, *34*, 87–103, doi:10.5209/rev_AGUC.2014.v34.n1.45193.
 28. IPCC *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Core Writing Team, R.K.P. and L.A.M., Ed.; Geneva, Switzerland, 2014; p. 157; ISBN 9781139177245.
 29. Observatorio de la sostenibilidad *Aproximación a la evolución de las precipitaciones en España*; 2019.
 30. Eastman, J.R. *TerrSet geospatial monitoring and modeling system*; Clark Labs, Clark University: Worcester, MA, USA, 2016; p. 393.
 31. Verbeiren, B.; Van De Voorde, T.; Canters, F.; Binard, M.; Cornet, Y.; Batelaan, O. Assessing urbanisation effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modelling strategy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2012**, *21*, 92–102, doi:10.1016/j.jag.2012.08.011.
 32. Xiao, B.; Wang, Q.H.; Fan, J.; Han, F.P.; Dai, Q.H. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. *Pedosphere* **2011**, *21*, 738–749, doi:10.1016/S1002-0160(11)60177-X.
 33. Hernandez, M.; Miller, S.N.; Goodrich, D.C.; Goff, B.F.; Kepner, W.G.; Edmonds, C.M.; Bruce Jones, K. Modeling Runoff Response To Land Cover And Rainfall Spatial Variability In Semi-Arid Watersheds. *Monit. Ecol. Cond. West. United States* **2000**, 285–298.
 34. Michel, C.; Andréassian, V.; Perrin, C. Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resour. Res.* **2005**, *41*, 1–6, doi:10.1029/2004WR003191.
 35. Témez Peláez, J.R. *Calculo Hidrometeorológico de Caudales Maximos en Pequeñas Cuencas Naturales*; MOPU Dirección General de Carreteras, 1978; p. 113.
 36. Marrone, P.; Orsini, F.; Asdrubali, F.; Guattari, C. Environmental performance of universities: Proposal for implementing campus urban morphology as an evaluation parameter in Green Metric. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *42*, 226–239, doi:10.1016/j.scs.2018.07.012.

37. Amaral, A.R.; Rodrigues, E.; Gaspar, A.R.; Gomes, Á. A review of empirical data of sustainability initiatives in university campus operations. *J. Clean. Prod.* **2020**, *250*, doi:10.1016/j.jclepro.2019.119558.
38. Rivera, D.; Obón, C.; Alcaraz, F.; Laguna, E.; Johnson, D. Date-palm (Phoenix, Arecaceae) iconography in coins from the Mediterranean and West Asia (485 BC–1189 AD). *J. Cult. Herit.* **2019**, *37*, 199–214, doi:10.1016/j.culher.2018.10.010.
39. Climate-data Available online: <https://es.climate-data.org/europe/espana/comunidad-valenciana/elche-1999/> (accessed on 4 August, 2021).
40. Pérez Cueva, A.J. *Atlas climático de la Comunidad Valenciana*; 1st ed.; Conselleria de Política Territorial, Obras Públicas y Movilidad (Generalitat Valenciana), 1994; ISBN 978-84-482-0310-8.
41. Valdes-Abellan, J.; Pardo, M.A.; Tenza-Abril, A.J. Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 1285–1296, doi:10.1002/joc.4984.
42. Ministerio para la Transición Ecológica *Inundaciones y cambio climático*; Madrid, 2018; p. 105.
43. Santos, G.M. Dos; Melendez-Pastor, I.; Navarro-Pedreño, J.; Koch, M. Assessing water availability in Mediterranean regions affected by water conflicts through MODIS data time series analysis. *Remote Sens.* **2019**, *11*, doi:10.3390/rs11111355.
44. Instituto Geográfico Nacional (IGN) Available online: <https://www.ign.es/web/ign/portal> (accessed on 9 March, 2021).
45. Zhao, J.; Zhao, X.; Liang, S.; Zhou, T.; Du, X.; Xu, P.; Wu, D. Assessing the thermal contributions of urban land cover types. *Landsc. Urban Plan.* **2020**, *204*, 103927, doi:10.1016/j.landurbplan.2020.103927.
46. Pontius, R.G.; Shusas, E.; McEachern, M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2004**, *101*, 251–268, doi:10.1016/j.agee.2003.09.008.
47. Farfán G., M.; Rodríguez-Tapia, G.; Mas, J.F. Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investig. Geográficas* **2016**, *2016*, 89–104, doi:10.14350/rig.48600.
48. Sánchez, F.J. *Hidrología Superficial y Subterránea*; 1st ed.; Createspace Independent Pub., 2017; p. 414; ISBN 978-1975606602.
49. U.S. Department of Agriculture, N.R.C.S. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. In *National Engineering Handbook, part 630, Hydrology*; U.S. Department of Agriculture, 2004.
50. Hayes, D.C.; Young, R.L. *Comparison of Peak Discharge and Runoff Characteristic Estimates from the Rational Method to Field Observations for Small Basins in Central Virginia*; 2005; p. 44; ISBN 0203667530.
51. Chow, V. Te; Maidment, D.R.; Mays, L.W. *Hidrología aplicada*; McGraw Hill: Nueva York, NY, USA, 1994; p. 597; ISBN 0070108102.
52. U.S. Department of Agriculture, N.R.C.S. Hydrographs. In *National Engineering Handbook, part 630, Hydrology*; U.S. Department of Agriculture, 2007; pp. 1–23.
53. Témez Peláez, J.R. Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales. *Revista Obras Publicas* 2003, *150*, 47–51.
54. Pardo i Marín, R. *Guía de aplicación del Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA)*; Diario Oficial de la Comunitat Valenciana 2019, p.115.
55. Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*; Madrid, Spain, 1999; p. 55; ISBN 8449804191.
56. Ministerio de Fomento Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. *BOE* **2016**, 18882–19023.
57. U.S. Department of Agriculture, N.R.C.S. Hydrologic Soil-Cover Complexes. In *National Engineering Handbook, part 630, Hydrology*; U.S. Department of Agriculture, 2004.
58. Durán-Barroso, P.; González, J. Variabilidad de los grupos hidrológicos del método del número de curva del NRCS (NRCS-CN). In Proceedings of the IV Jornadas de Ingeniería del Agua. La

- precipitación y los procesos erosivos, Córdoba, Spain, 21-22 October 2015; p. 10.
59. Institut Cartogràfic Valencià (ICV) Available online: <https://icv.gva.es/es> (accessed on 12 July, 2021).
 60. Instituto Geográfico Nacional (IGN) Mapa de suelos de España: Escala 1:1000000 Available online: <https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/resources/html/030769.html> (accessed on 12 July, 2021).
 61. Zachary Bean, E.; Frederick Hunt, W.; Alan Bidelspach, D. Evaluation of Four Permeable Pavement Sites in Eastern North Carolina for Runoff Reduction and Water Quality Impacts. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2007**, *133*, 583–592, doi:10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:6(583).
 62. Hunt, W.F.; Collins, K.A. Permeable Pavement: Research Update and Design Implications. *North Carolina Coop. Ext. Serv.* **2008**, *12*.
 63. Liu, W.; Feng, Q.; Chen, W.; Wei, W. Assessing the runoff retention of extensive green roofs using runoff coefficients and curve numbers and the impacts of substrate moisture. *Hydrol. Res.* **2020**, *51*, 635–647, doi:10.2166/NH.2020.167.
 64. Robredo, J.C. *Cálculo de Caudales de Avenida*; p. 55. Available online: <https://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/CALCULO-DE-CAUDALES-DE-AVENIDA.pdf> (accessed on 20 March, 2021).
 65. Gómez Valentín, M. *Hidrología urbana*; Barcelona, 2007; p. 332; ISBN 978-607-477-269-2.
 66. Valentín, M.G. *Hidrología urbana*. **2007**.
 67. Mark, A.; Marek, P. *Hydraulic Design Manual*; Texas Department of Transportation, 2019; p. 604.
 68. Ramke, H.-G. Collection of Surface Runoff and Drainage of Landfill Top Cover Systems. In *Solid Waste Landfilling*; Elsevier Inc., 2018; pp. 373–416.
 69. Polo Forner, S.J.; Navarro-Pedreño, J.; Meléndez-Pastor, I.; Gómez-Lucas, I.; Mataix Beneyto, J.J. *El canal del desvío del pantano de Elche: primer centenario*; Limencop: España, 2015; p. 177; ISBN 978-84-606-5900-6.
 70. Navarro Pedreño, J.; Meléndez-Pastor, I.; Gómez Lucas, I. Impact of three decades of urban growth on soil resources in Elche (Alicante, Spain). *Spanish J. Soil Sci.* **2012**, *2*, 55–69, doi:10.3232/SJSS.2012.V2.N1.04.
 71. Schirmer, M.; Leschik, S.; Musolff, A. Current research in urban hydrogeology - A review. *Adv. Water Resour.* **2013**, *51*, 280–291, doi:10.1016/j.advwatres.2012.06.015.
 72. Rietz, D.A.; Hawkins, R.H. Effects of land use on runoff Curve Number. *Watershed Manag. Oper. Manag.* **2004**, *105*, doi:10.1061/40499(2000)110.
 73. Lizárraga-Mendiola, L.; Vázquez-Rodríguez, G.A.; Lucho-Constantino, C.A.; Bigurra-Alzati, C.A.; Beltrán-Hernández, R.I.; Ortiz-Hernández, J.E.; López-León, L.D. Hydrological design of two low-impact development techniques in a semi-arid climate zone of central Mexico. *Water (Switzerland)* **2017**, *9*, doi:10.3390/w9080561.
 74. Bigurra-Alzati, C.A.; Ortiz-Gómez, R.; Vázquez-Rodríguez, G.A.; López-León, L.D.; Lizárraga-Mendiola, L. Water conservation and green infrastructure adaptations to reduce water scarcity for residential areas with semi-arid climate: Mineral de la reforma, Mexico. *Water (Switzerland)* **2021**, *13*, 1–17, doi:10.3390/w13010045.
 75. U.S. Environmental Protection Agency *Green streets handbook*; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, 2021.
 76. Lee, J.G.; Fisher, C.; Schumacher, B. *Arid Green Infrastructure for Water Control and Conservation: State of the Science and Research Needs for Arid / Semi-Arid Regions State of the Science and Research Needs*; U.S. Environmental Protection Agency, 2016.
 77. United States Environmental Protection Agency (EPA) Using Green Roofs to Reduce Heat Islands Available online: <https://www.epa.gov/heatislands/using-green-roofs-reduce-heat-islands> (accessed on Aug 12, 2021).
 78. Meteoeelche Available online: <http://www.meteoeelche.com/hysnoaa.php?select=ENE-2021.TXT> (accessed on 14 August, 2021).
 79. Walega, A.; Salata, T. Influence of land cover data sources on estimation of direct runoff

- according to SCS-CN and modified SME methods. *Catena* **2019**, *172*, 232–242, doi:10.1016/j.catena.2018.08.032.
80. Ponce, V.M.; Hawkins, R.H. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *J. Hydrol. Eng.* **1996**, *1*, 11–19, doi:10.1061/(asce)1084-0699(1996)1:1(11).
 81. Woodward, D.E.; Hawkins, R.H.; Jiang, R.; Hjelmfelt, A.T.; Van Mullem, J.A.; Quan, Q.D. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. *World Water Environ. Resour. Congr.* **2003**, *40685*, 691–700, doi:10.1061/40685(2003)308.
 82. García Alvarado, J.M.; García Rodríguez, M.P.; Pérez Gonzalez, M.E. Sellado de suelos a partir de teledetección y SIG en el Programa de Actuación Urbanística (PAU) del sudeste de Madrid (España). *Cuad. Geográficos* **2018**, *57*, 39–60, doi:10.30827/cuadgeo.v57i1.5360.
 83. Rodríguez-Espinosa, T.; Navarro-Pedreño, J.; Gómez Lucas, I.; Almendro-Candel, M.B. Land Recycling , Food Security and Technosols. *J. Geogr. Res.* **2021**, *04*, 44–50, doi:https://doi.org/10.30564/jgr.v4i3.3415.

7. Anexos

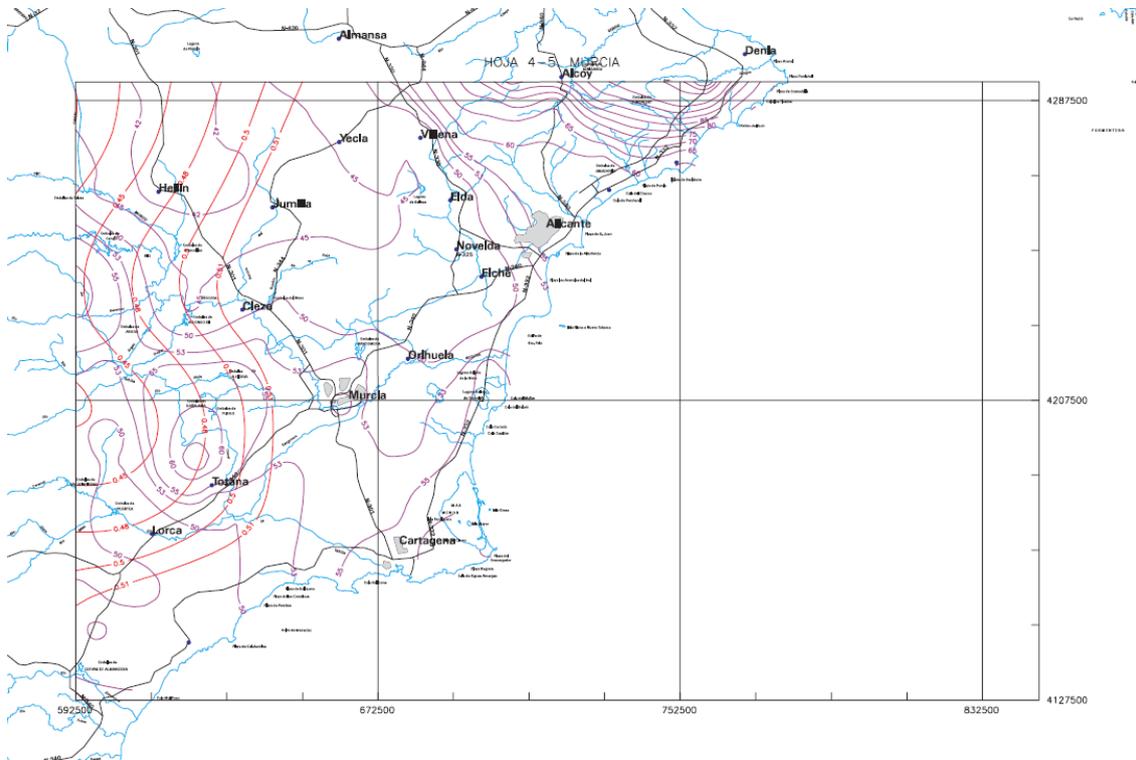


Figura A1. Mapa de isolíneas de coeficientes de variación y valores medios de la máxima precipitación diaria anual. Hoja 4-5. Murcia. [55]

C_v	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.915	2.220	2.556	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.610	2.052	2.403	2.785	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.625	2.068	2.434	2.815	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Tabla 7.1 - Cuantiles Y_t de la Ley SQRT-ET max, también denominados Factores de Amplificación K_T , en el "Mapa para el Cálculo de Máximas Precipitaciones Diarias en la España Peninsular" (1997).

Figura A2. Tabla predefinida de Cuantiles Y_t [55].

Tabla 1. Propuesta de asignación de grupo hidrológico de suelo

LITOLOGÍA	TIPO DE SUELO						
	Arenosol	Fluvisol	Calcisol	Cambisol	Luvisol	Regosol	Leptosol
Arenas y gravas no consolidadas	A	A	A	A	A	A	A
Roquedo calcáreo	A	B	B	B	B	B	C
Areniscas (rodano)	A	B	B	B	B	B/C*	C
Areniscas <i>facies Röt</i>	A	B	B	B	C	C	C/D*
Abanicos encostrados	A	B	B	B	C	C	D
Abanicos sin encostrar	A	B*/C	B/C*	B/C*	C	C	D
Arcillas y limos	B	C	C/D*	C/D*	D	D	D

(*) Grupo propuesto para este estudio (de los dos posibles), tras el análisis de campo

Figura A3. Asignación del grupo hidrológico de suelo propuesta por Camarasa *et al.* [23].

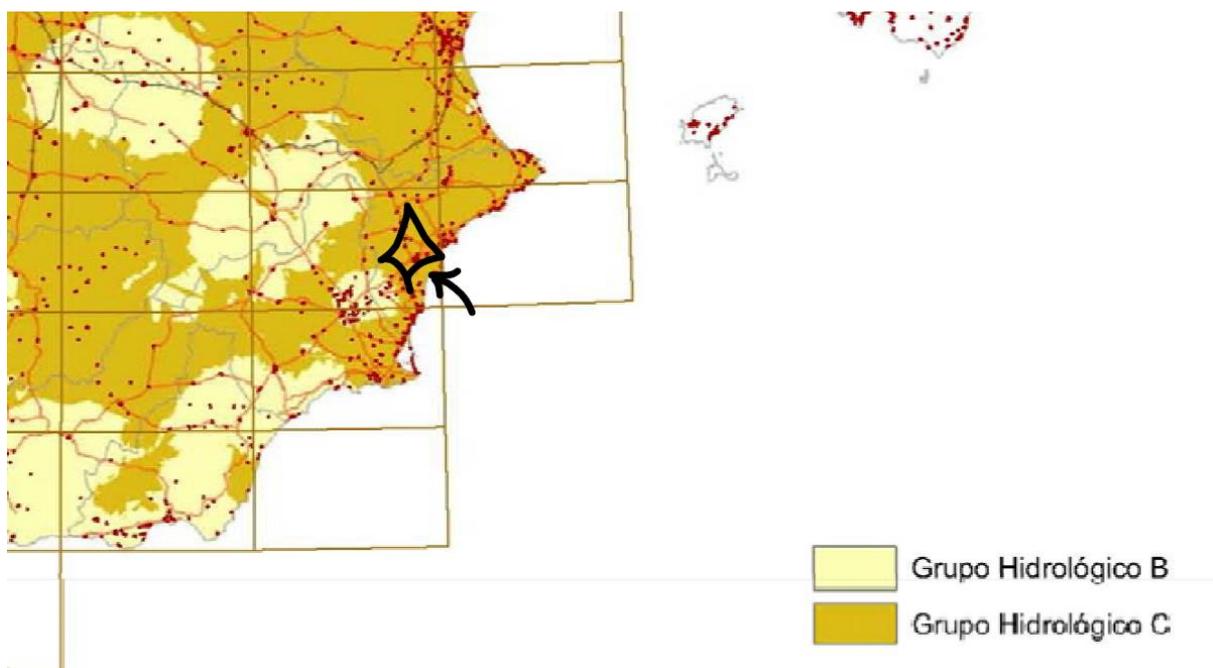


Figura A4. Extracto del mapa de grupos hidrológicos de suelo proporcionado por la Norma 5.2-IC [56].

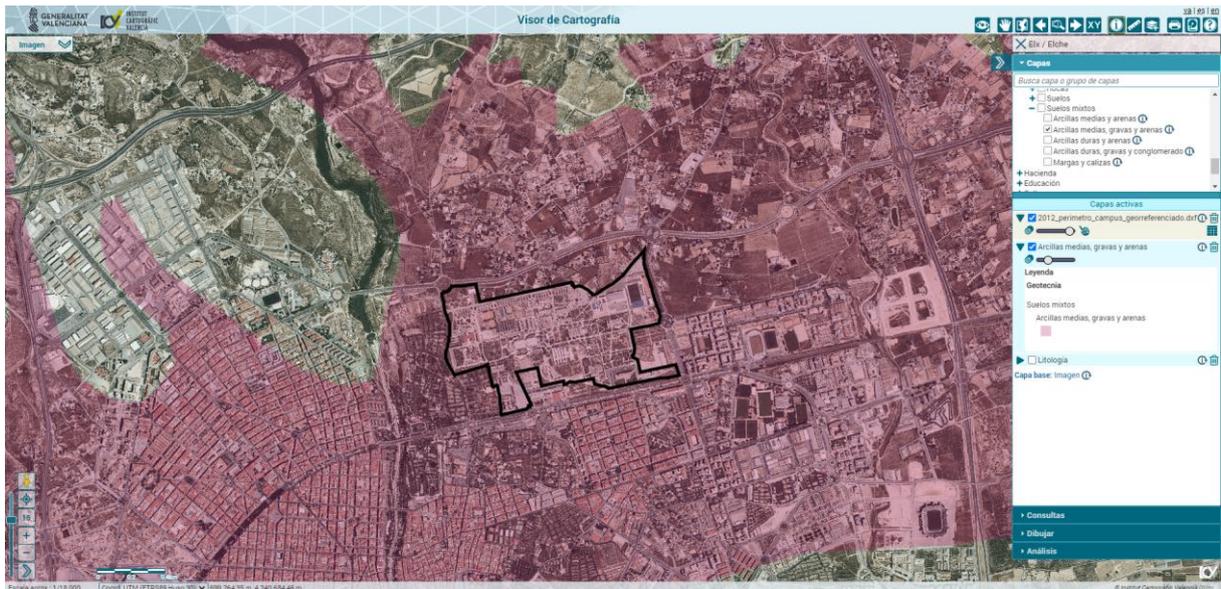
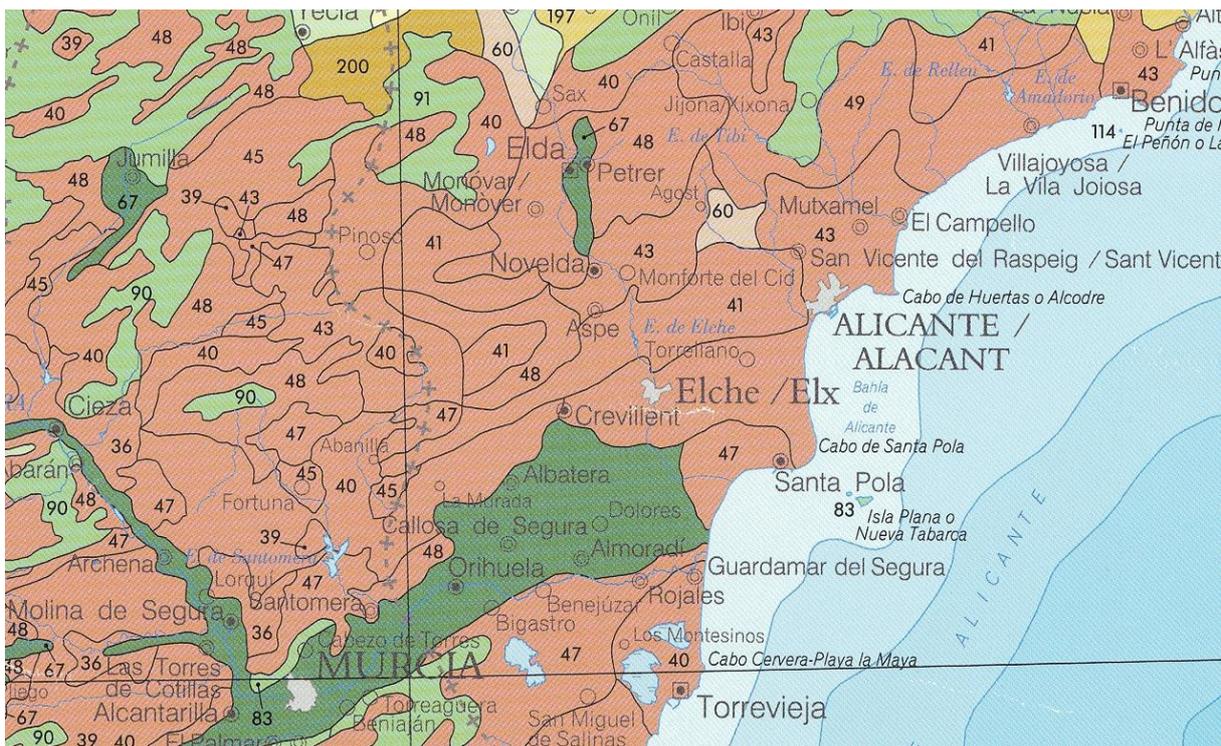


Figura A5. Litología de los suelos presentes en el área de estudio. Fuente: Visor Cartográfico de la Generalitat Valenciana [59].



CALCID								
36	37	38	39	40	41	42	43	44
HAPLOCALCID	HAPLOCALCID Calcigypsid Haplogypsid	HAPLOCALCID Petrocalcid	HAPLOCALCID CALCIGYPSID HAPLOSALID Haplogypsid	HAPLOCALCID HAPLARGID	HAPLOCALCID HAPLARGID Haplosalid Torriorthent	HAPLOCALCID HAPLOCAMBID	HAPLOCALCID HAPLOCAMBID Haplargid	HAPLOCALCID HAPLOCAMBID Haplargid Haplosalid

Figura A6. Extracto del Mapa de Suelos de España a Escala 1:1000000. Fuente: IGN [60].

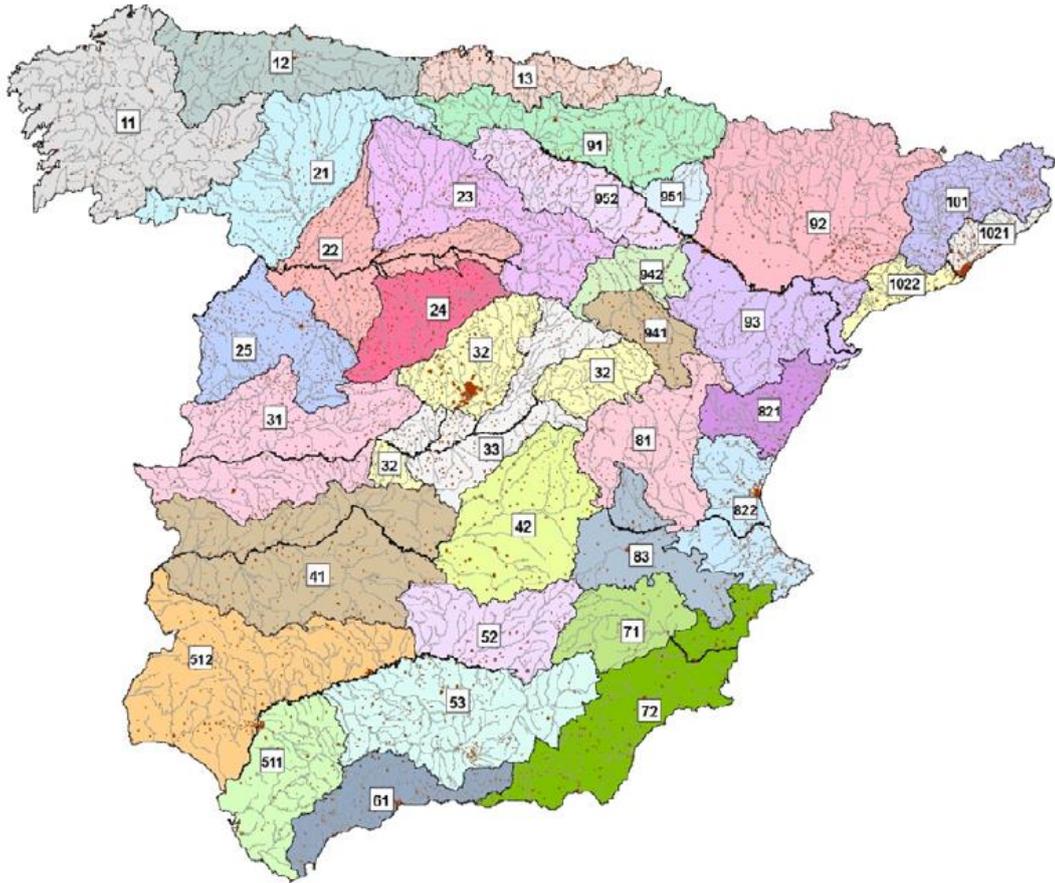


FIGURA 2.9.- REGIONES CONSIDERADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL COEFICIENTE CORRECTOR DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA

Figura A7. Mapa de regiones consideradas para la caracterización del coeficiente corrector del umbral de escorrentía. Fuente: Norma 5.2-IC [56].

TABLA 2.5.- COEFICIENTE CORRECTOR DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA:
VALORES CORRESPONDIENTES A CALIBRACIONES REGIONALES

Región	Valor medio, β_m	Desviación respecto al valor medio para el intervalo de confianza del			Período de retorno T (años), F_T				
		50% Δ_{50}	67% Δ_{67}	90% Δ_{90}	2	5	25	100	500
11	0,90	0,20	0,30	0,50	0,80	0,90	1,13	1,34	1,59
12	0,95	0,20	0,25	0,45	0,75	0,90	1,14	1,33	1,58
13	0,60	0,15	0,25	0,40	0,74	0,90	1,15	1,34	1,55
21	1,20	0,20	0,35	0,55	0,74	0,88	1,18	1,47	1,90
22	1,50	0,15	0,20	0,35	0,74	0,90	1,12	1,27	1,37
23	0,70	0,20	0,35	0,55	0,77	0,89	1,15	1,44	1,82
24	1,10	0,15	0,20	0,35	0,76	0,90	1,14	1,36	1,63
25	0,60	0,15	0,20	0,35	0,82	0,92	1,12	1,29	1,48
31	0,90	0,20	0,30	0,50	0,87	0,93	1,10	1,26	1,45
32	1,00	0,20	0,30	0,50	0,82	0,91	1,12	1,31	1,54
33	2,15	0,25	0,40	0,65	0,70	0,88	1,15	1,38	1,62
41	1,20	0,20	0,25	0,45	0,91	0,96	1,00	1,00	1,00
42	2,25	0,20	0,35	0,55	0,67	0,86	1,18	1,46	1,78
511	2,15	0,10	0,15	0,20	0,81	0,91	1,12	1,30	1,50
512	0,70	0,20	0,30	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
52	0,95	0,20	0,25	0,45	0,89	0,94	1,09	1,22	1,36
53	2,10	0,25	0,35	0,60	0,68	0,87	1,16	1,38	1,56
61	2,00	0,25	0,35	0,60	0,77	0,91	1,10	1,18	1,17
71	1,20	0,15	0,20	0,35	0,82	0,94	1,00	1,00	1,00
72	2,10	0,30	0,45	0,70	0,67	0,86	1,00	-	-
81	1,30	0,25	0,35	0,60	0,76	0,90	1,14	1,34	1,58
821	1,30	0,35	0,50	0,85	0,82	0,91	1,07	-	-
822	2,40	0,25	0,35	0,60	0,70	0,86	1,16	-	-
83	2,30	0,15	0,25	0,40	0,83	0,85	1,21	1,51	1,85
91	0,85	0,15	0,25	0,40	0,72	0,88	1,19	1,52	1,95
92	1,45	0,30	0,40	0,70	0,82	0,94	1,00	1,00	1,00
93	1,70	0,20	0,25	0,45	0,77	0,92	1,00	1,00	1,00
941	1,80	0,15	0,20	0,35	0,68	0,87	1,17	1,39	1,64
942	1,20	0,15	0,25	0,40	0,77	0,91	1,11	1,24	1,32
951	1,70	0,30	0,40	0,70	0,72	0,88	1,17	1,43	1,78
952	0,85	0,15	0,25	0,40	0,77	0,90	1,13	1,32	1,54
101	1,75	0,30	0,40	0,70	0,76	0,90	1,12	1,27	1,39
1021	1,45	0,15	0,25	0,40	0,79	0,93	1,00	1,00	1,00
1022	2,05	0,15	0,25	0,40	0,79	0,93	1,00	1,00	1,00

En Ceuta y Melilla se adoptarán valores similares a los de la región 81.
Pueden obtenerse valores intermedios por interpolación adecuada a partir de los datos de esta tabla
En todos los casos $F_{10}=1,00$

Figura A8. Coeficientes correctores del umbral de escorrentía. Fuente: Norma 5.2-IC [56].

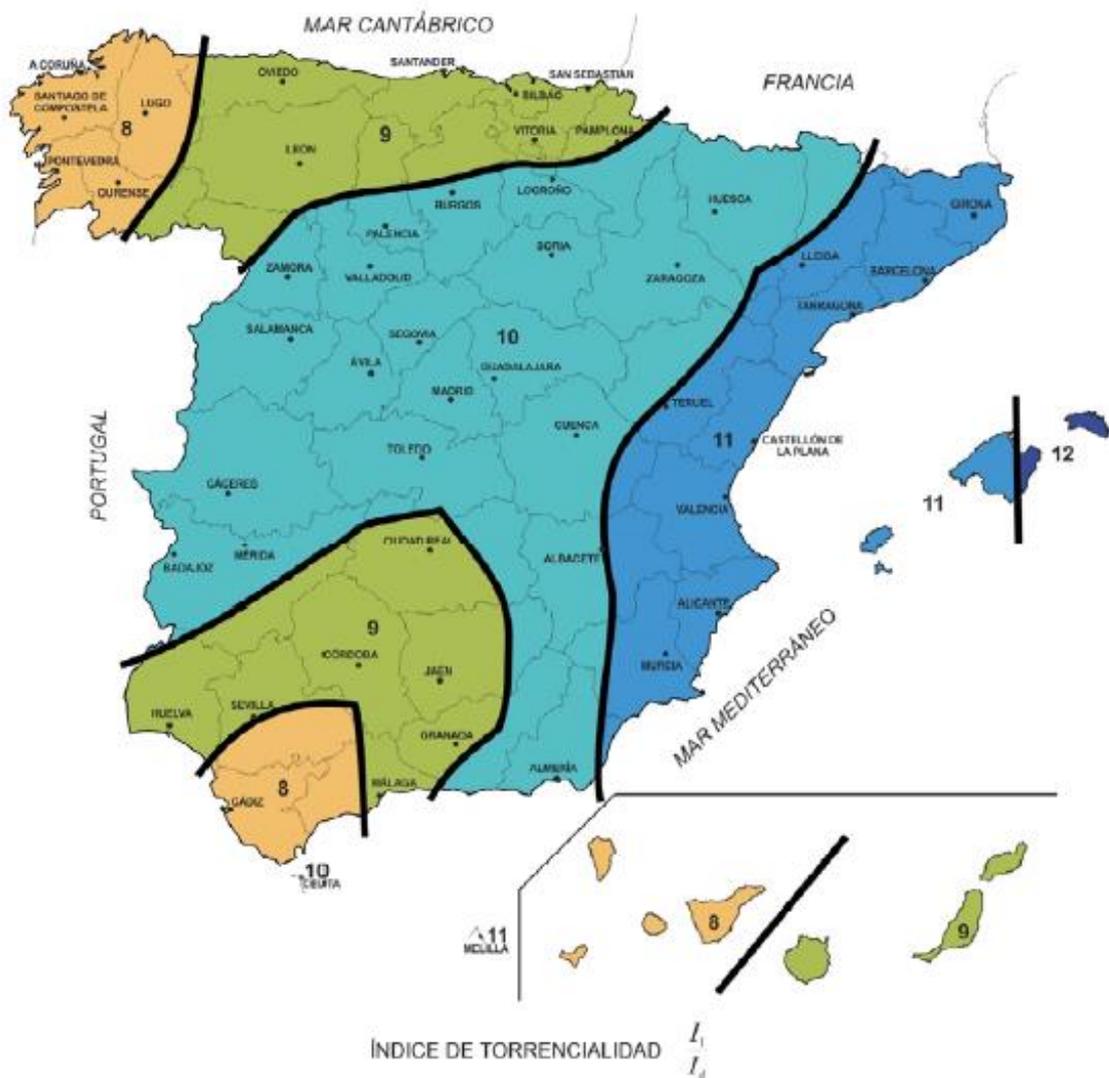


FIGURA 2.4.- MAPA DEL ÍNDICE DE TORRENCIALIDAD (I_1/I_a)

Figura A9. Mapa del índice de torrencialidad proporcionado por la Norma 5.2-IC [56].

Tabla A1. Matriz de cambio de coberturas de suelo para el periodo 1997-2017.

Category	1997								Total (%)	Ganancias (%)
	Asfalto	Cemento/ Hormigón	Pavimento terrizo	Suelo con cubierta natural	Suelo con cubierta mixta	Suelo desnudo	Cuerpo de agua	Césped artificial		
Asfalto	0,691	0,181	0,000	10,616	0,000	3,242	0,068	0,000	14,798	14,107
Cemento/Hormigón	0,331	3,034	0,000	24,838	0,000	1,968	0,119	0,000	30,289	27,255
Pavimento terrizo	0,038	0,062	0,000	1,474	0,000	0,076	0,007	0,000	1,657	1,657
Suelo con cubierta natural	0,591	2,851	0,000	39,539	0,000	4,261	0,179	0,000	47,421	7,882
Suelo con cubierta mixta	0,014	0,186	0,000	3,166	0,000	0,073	0,021	0,000	3,460	3,460
Suelo desnudo	0,108	0,195	0,000	0,982	0,000	0,020	0,001	0,000	1,307	1,286
Cuerpo de agua	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,067	0,000	0,110	0,043
Césped artificial	0,000	0,000	0,000	0,956	0,000	0,000	0,001	0,000	0,957	0,957
Total (%)	1,772	6,509	0,000	81,615	0,000	9,641	0,463	0,000	100,000	
Pérdidas (%)	0,744	2,393	0,000	28,969	0,000	6,623	0,273	0,000		
Cambio neto (%)	13,026	23,780	1,657	34,194	3,460	8,334	0,353	0,957		
Intercambio (%)	2,162	6,950	0,000	15,764	0,000	2,573	0,085	0,000		

2017

Tabla A2. Parámetros hidrológicos de entrada y salida aplicados en el Método Racional para cada escenario y tiempo de retorno considerado.

T	(años)	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
		2	5	10	2	5	10	2	5	10
P_a	(mm)	42,40	62,40	78,00	42,40	62,40	78,00	42,40	62,40	78,00
I_a	(mm/h)	1,77	2,60	3,25	1,77	2,60	3,25	1,77	2,60	3,25
I_a/P_a			11			11			11	
t_c	(h)		0,33			0,17			0,17	
I_t	(mm/h)	36,52	53,75	67,18	52,54	77,33	96,66	52,54	77,33	96,66
P₀ (w_c)		26,44	33,93	39,46	13,87	17,81	20,71	19,46	24,98	29,04
C		0,09	0,13	0,14	0,27	0,32	0,34	0,17	0,21	0,23
A	(km²)		0,69			0,69			0,69	
Q	(m³/s)	0,65	1,30	1,86	2,72	4,67	6,28	1,72	3,10	4,27
E	(mm)	1,14	2,26	3,24	2,37	4,07	5,47	1,50	2,70	3,72
V	(m³)	783,69	1558,97	2233,46	1634,91	2799,33	3766,99	1030,42	1860,41	2563,89
T_p	(h)	2,19	1,10	0,77	0,53	0,31	0,23	0,83	0,46	0,34
T_p	(min)	131,56	66,13	46,16	31,53	18,42	13,68	50,03	27,71	20,11



Figura A10. Cartografía histórica de coberturas de suelo en el campus universitario (1997-2017).

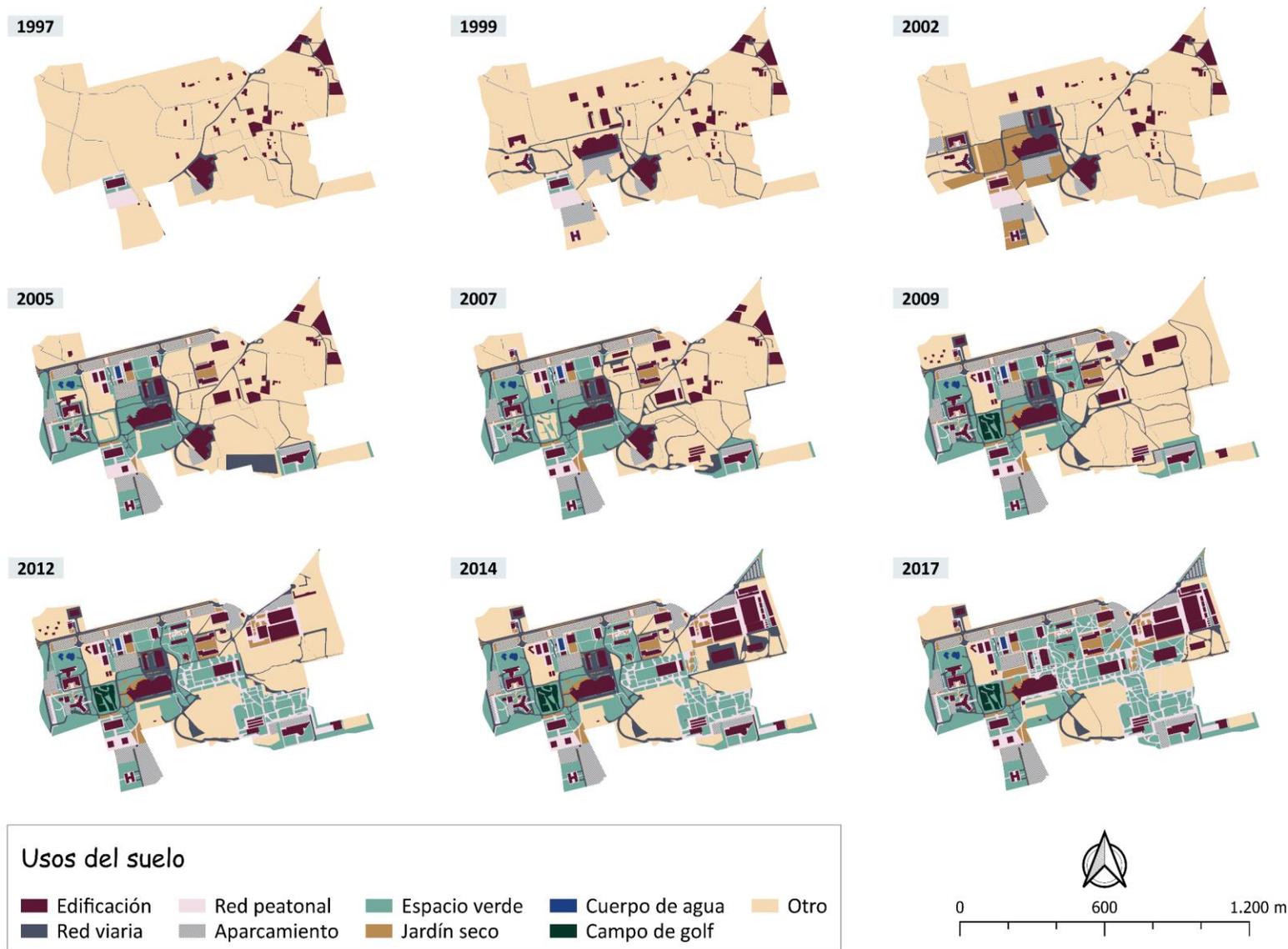


Figura A11. Cartografía histórica de usos del suelo en el campus universitario (1997-2017).

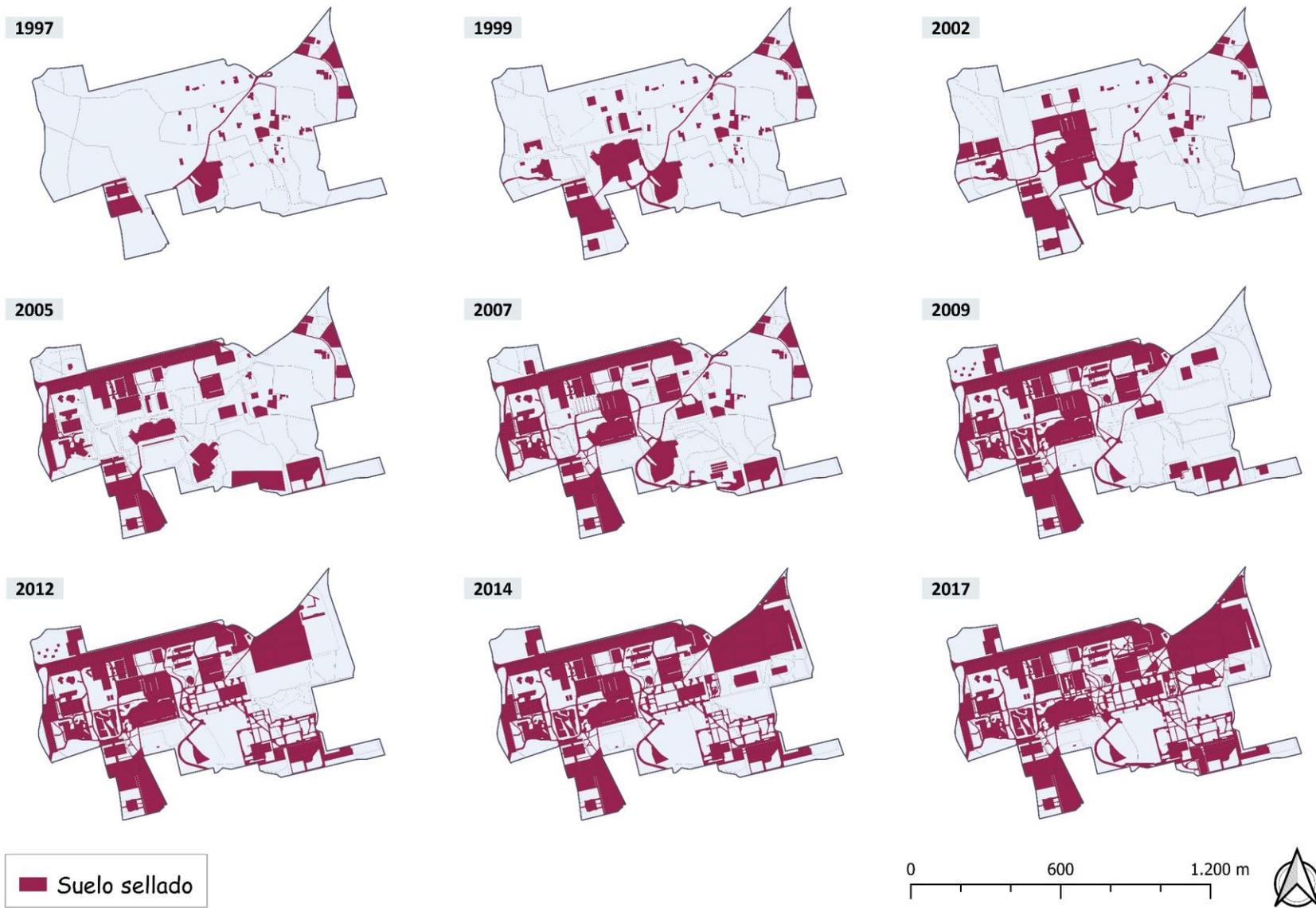


Figura A12. Cartografía histórica del sellado del suelo en el campus universitario (1997-2017).