



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Erasmus+

Vademécum para la planificación verde urbana sostenible





Este documento ha sido desarrollado dentro del proyecto Erasmus Plus “Viridis Loci” (2021 - 1 - IT01- KA220 - VET – 000025302).

El apoyo de la Comisión Europea a la producción de esta publicación no constituye una aprobación de su contenido, que refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en ella.

Tipo de resultado: Metodologías/directrices – Marco metodológico para la implementación



Vademécum para la planificación verde urbana sostenible

Índice:

1. Descripción del proyecto
2. Objetivos del documento
3. Servicios ecosistémicos – definición
4. Análisis y cuantificación de los servicios ecosistémicos
5. Conclusiones y próximos pasos
6. Apéndice

1. Descripción del proyecto

El proyecto Viridis Loci (VL) tiene como objetivo proporcionar formación profesional especializada y transferencia de competencias en la gestión correcta de zonas verdes y parques en municipios a técnicos públicos y privados que estén interesados en abordar una gestión profesional avanzada de la naturaleza urbana en tres islas europeas: Cerdeña, Islas Baleares y Madeira. La República Checa ha contribuido al desarrollo del proyecto como un país europeo donde "la cultura de las zonas verdes bien gestionadas en las ciudades como proveedoras de servicios sociales y ecosistémicos para toda la comunidad" está profundamente arraigada.

Los socios del proyecto proceden de cuatro países europeos: Italia, España, Portugal y la República Checa. Los socios italianos son ANCI Sardegna (líder del proyecto), Fito-consult y ATM Consulting; el socio español es FELIB (Federación de Municipios de las Islas Baleares); el socio portugués es AREAM (Agencia Regional de Energía y Medio Ambiente de la Región Autónoma de Madeira). El socio checo es ABA International (una asociación internacional de educación y organismo de certificación "sin ánimo de lucro").

El consorcio presentó este proyecto por tres razones principales:

- 1) Sostenibilidad ambiental y lucha contra el cambio climático: enfatiza el papel de las áreas verdes/parques bien gestionados dentro de las ciudades y municipios en general como proveedores de servicios ecosistémicos (beneficios que las personas obtienen de la naturaleza, por ejemplo, regulación del clima, captura de CO₂, mejora de la calidad del aire, valores culturales, salud pública y conservación de la biodiversidad).
- 2) Aumentar la inclusión. El proyecto se desarrollará en tres contextos insulares del sur de Europa que, por su geografía, tienden a estar aislados y en desventaja económica permanente en comparación con otras regiones del continente.



3) Superar la brecha de conocimiento con el uso de las tecnologías TIC para impartir una metodología de trabajo altamente tecnológica e innovadora.

4) El proyecto se desarrollará en tres contextos insulares del sur de Europa que, debido a su geografía, tienden a estar aislados y algunos de ellos, en desventaja económica permanente en comparación con otras regiones del continente.

Las islas tienden a quedarse rezagadas en algunos casos, en términos económicos y los procesos de innovación impactan negativamente en las comunidades que residen en las islas. Las tasas de desempleo con excepción de les Illes Balears son altas, con picos dramáticos entre los jóvenes y en todos los casos superiores a las medias nacionales respectivas.

2. Objetivos del documento

El «Vademécum para la planificación verde urbana sostenible» es un resultado clave dentro de la oferta del proyecto Viridis Loci. En efecto, el siguiente documento tiene como objetivo:

- Introducir nuevos conceptos y competencias dirigidos a los actores activos en la planificación urbana y territorial;
Proponer soluciones digitales capaces de cuantificar los beneficios ambientales (es decir, los servicios ecosistémicos) que ofrece la vegetación urbana;
- Mejorar la concienciación de las partes interesadas sobre los beneficios de la vegetación urbana y las soluciones basadas en la naturaleza.

Esto conducirá a una planificación y un mantenimiento urbano más consciente y, por tanto, a un aumento de la sostenibilidad en las zonas urbanas.

El Vademécum responde directamente a una necesidad creciente, como parece claro en el compromiso de las partes interesadas y de los ciudadanos, interesados en nuevas e innovadoras metodologías para evaluar y valorar la vegetación urbana, incluidas las digitales. El documento debe considerarse como una brújula para navegar a través de conceptos novedosos y como un punto de partida para aprender sobre las últimas soluciones digitales que se pueden aplicar a nivel urbano. Sin embargo, para aquellos especialmente interesados en aplicar las metodologías expuestas, podría ser útil explorar más a fondo la literatura relevante (ver Apéndice) y tener en cuenta que cada entorno tiene sus propias características específicas y, por lo tanto, también podría ser necesaria la calibración y validación en entornos específicos.

En general, la necesidad de proponer un Vademécum capaz de visualizar un nuevo enfoque para evaluar, gestionar y planificar la vegetación verde urbana surge de la creciente importancia y complejidad que hoy revisten las infraestructuras verdes urbanas. De hecho, es evidente que mejoran la calidad de vida de los habitantes urbanos y permiten alcanzar los objetivos de la Agenda 2030, entre ellos la sostenibilidad ambiental, social y económica.

Debido a esta creciente importancia y también a una mayor sensibilidad de los ciudadanos, en los últimos años muchos proyectos de desarrollo a nivel de ciudad tuvieron que considerar el papel ambiental y sociocultural de las áreas verdes urbanas bajo una luz renovada, ya que la "regeneración urbana" se convirtió en una prioridad. Sin embargo, hoy en día, no existen marcos aceptados para evaluar el valor de la vegetación urbana y los servicios ecosistémicos que proporciona. Esto da como resultado proyectos que a menudo no aportan mejoras tangibles de los entornos urbanos o, en el mejor de los casos, mejoras que no se pueden cuantificar.

De hecho, los marcos de evaluación actualmente disponibles ofrecen resultados cualitativos y subjetivos, con números y un posible valor económico que dependen de un conjunto limitado de indicadores, a menudo derivados de otras ramas científicas y adaptados a los ecosistemas urbanos.

Por ello, es necesario un enfoque novedoso, con la característica de ser cuantitativo. En su núcleo, la cuantificación de la vegetación urbana y los servicios ecosistémicos. La vegetación urbana –que abarca todos los árboles, arbustos, césped y demás vegetación de las ciudades–, si se gestiona adecuadamente, puede desempeñar un papel importante para garantizar una buena calidad de vida y afrontar los retos fijados por la Agenda 2030, ayudando a alcanzar varios Objetivos de Desarrollo Sostenible: de hecho, en los entornos urbanos puede proporcionar varios servicios ecosistémicos, como la purificación del aire, la regulación del clima global, la regulación de la temperatura, la mitigación de la escorrentía, así como oportunidades recreativas, aumentando los valores estéticos. En pocas palabras, la vegetación urbana puede ayudar a que las ciudades sean más seguras, más sanas, más ricas y más atractivas, con beneficios agrupados en categorías sociales, comunales, ambientales y económicas.

A pesar de este papel central, la vegetación urbana no suele ser considerada una prioridad por los tomadores de decisiones, por lo que los recursos presupuestarios se asignan a otras áreas, percibidas como más importantes. Peor aún, la mayoría de las veces, se la ve simplemente como un costo, a pesar de que los estudios han demostrado que los beneficios de los árboles urbanos superan los costos en proporciones de entre 1,37 y 3,09,

con un valor estimado de los SE proporcionados de US\$3,8 mil millones por año en los Estados Unidos de América. Así, a pesar de años de investigaciones y debido a que el entorno urbano difiere del natural, la vegetación urbana vive en condiciones inhóspitas, por lo que su vida útil es limitada – un árbol urbano vive en promedio entre 19 y 28 años – lo que afecta su capacidad de proporcionar beneficios a largo plazo. Debido a esto, en los últimos años, muchos investigadores han comenzado a desarrollar estrategias para mejorar el impacto de la naturaleza en los asentamientos humanos, otorgando un papel científico primario – pero con muchas posibilidades de crecimiento – a la naturaleza urbana, su implementación y su gestión, lo cual es crucial para asegurar las contribuciones óptimas al bienestar fisiológico, sociológico y económico de las sociedades urbanas. La vegetación urbana debe estudiarse desde un enfoque integrado, interdisciplinario, participativo y estratégico para planificar y gestionar su presencia en las ciudades y sus alrededores. Por tanto, al tratarse de una cuestión interdisciplinaria, la planificación y gestión de la vegetación urbana es muy compleja y debe abordar diversos temas, como la ecología del paisaje, la arboricultura, la planificación urbana y las ciencias ambientales, al tiempo que satisface los diferentes intereses de las partes interesadas, principalmente los ciudadanos, las autoridades públicas, los investigadores y las industrias implicadas.

Hoy en día, estos temas necesitan un fuerte apoyo investigativo para lograr un desarrollo a largo plazo, que debe abordar cuatro componentes principales:

1. la conservación, implementación y adaptación de áreas naturales dentro de las ciudades, con el fin de mejorar su adecuación al entorno urbano, mejorando así los servicios ecosistémicos prestados;
2. la configuración espacial de las áreas verdes urbanas: sistemas bien diseñados y planificados pueden asegurar una mejor conservación de la biodiversidad, vinculando las áreas rurales y urbanas;
3. la gestión de la vegetación urbana – aspecto que aún necesita ser profundizado – desarrollando planes locales y personalizados, siendo así capaces de satisfacer necesidades peculiares;

4. Una mejora en los procesos de toma de decisiones debe ser más participativa y transparente con datos cuantitativos proporcionados por marcos confiables.

El siguiente documento quiere representar un primer ensayo en esta dirección, mostrando una metodología y herramientas que pueden implementarse en contextos urbanos para alcanzar un nivel de gestión más consciente.

3. Servicios ecosistémicos – definiciones

Los socios de Viridis Loci creen que es necesario introducir y definir adecuadamente el concepto de Servicios Ecosistémicos.

El término Servicios Ecosistémicos (SE) fue introducido a principios de los años 80 y desarrollado en la década siguiente, principalmente gracias a las investigaciones de Daily y Costanza. Este último realizó una de las primeras estimaciones globales para calcular el valor total de los SE proporcionados anualmente por la Tierra a la humanidad, con un monto resultante entre 16.000 y 54.000 billones de dólares. Estos estudios dieron lugar a investigaciones posteriores desarrolladas en campos limitados, que se integraron por primera vez a escala internacional gracias a la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. En ella, los SE se definen como los beneficios que la humanidad obtiene, o puede obtener, de los ecosistemas. Costanza propuso 17 tipos de SE, mientras que la MEA los reduce a 4 categorías principales, subrayando fuertemente las estrechas relaciones – con diferente potencialidad e intensidad – entre los SE y el bienestar humano en términos de seguridad, provisión material esencial, salud y relaciones sociales – todos aspectos fundamentales para garantizar la libertad en las elecciones y acciones. El MEA analiza el concepto de SE aplicando la idea de valor de uso directo (para indicar los beneficios derivados del uso directo, cuyo valor puede obtenerse mediante encuestas), o indirecto (para indicar los beneficios derivados de procesos, por tanto no directamente disponibles, como los procesos que conducen a la formación del suelo, la purificación del agua, la polinización...). Además, el MEA añade la declinación del valor de SE en diferentes niveles individuales y futuros (indicando el valor que estamos dispuestos a asignar a la necesidad de

conservación y transmisión a las próximas generaciones de los recursos naturales, por tanto, no utilizando una parte de los recursos naturales disponibles).

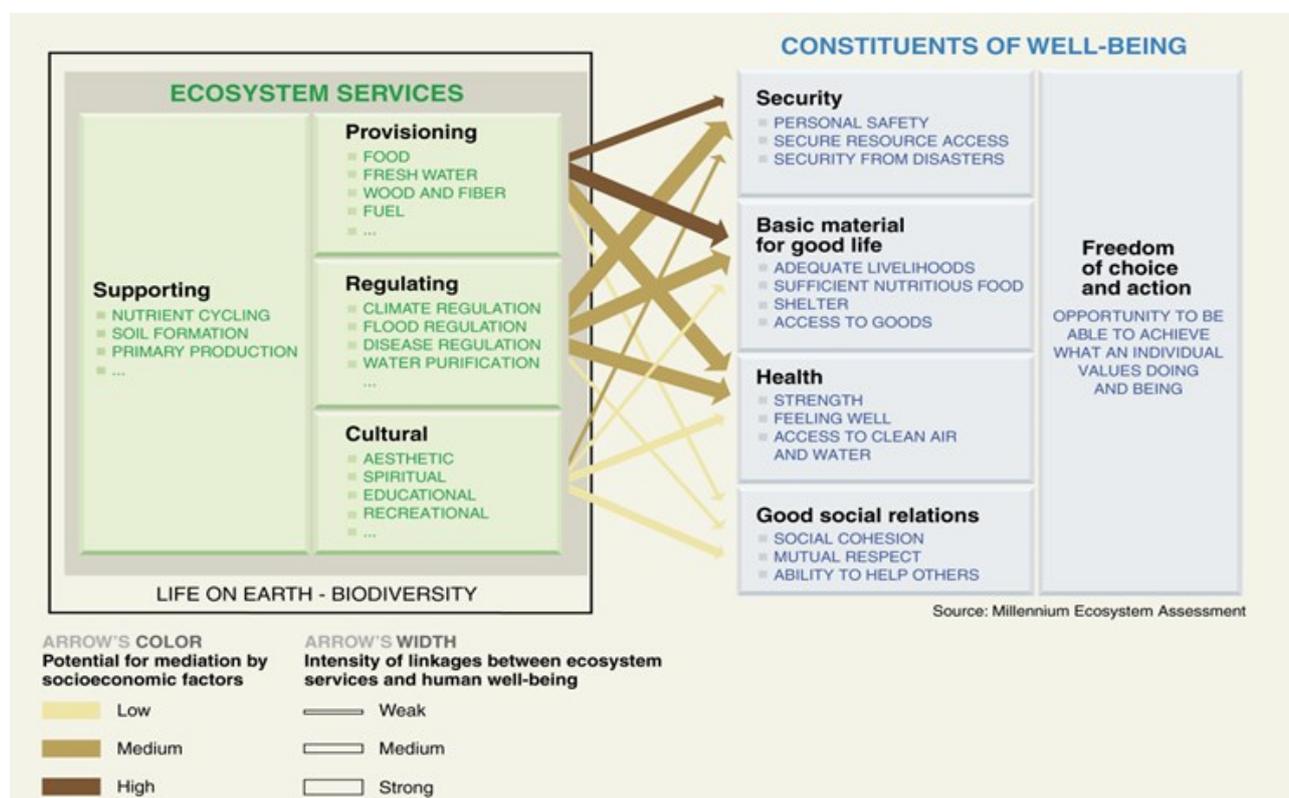


Fig. 1 Servicios ecosistémicos, su clasificación y relaciones con el bienestar humano. Fuente: Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005.

La MEA representa un hito fundamental: no sólo define las cuatro categorías de SE, sino que llama la atención de académicos y partes interesadas sobre el estado de degradación de los ambientes naturales, ya que más del 60% de los SE fueron clasificados como en riesgo.

Las cuatro categorías incluyen servicios de aprovisionamiento (por ejemplo, bienes materiales como alimentos, agua potable, madera, fibras, plantas medicinales); servicios de regulación (por ejemplo, procesos ambientales que tienen efectos sobre el capital natural, así como actividades antropogénicas), y servicios culturales (por ejemplo, principalmente no materiales, como enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, actividades recreativas, valores y experiencias estéticas, sistemas de conocimiento,

relaciones sociales). A estas tres categorías principales, se agregaron servicios de apoyo, para indicar procesos fundamentales –por ejemplo, la producción de oxígeno atmosférico, la formación y protección del suelo, el ciclo del agua, la formación y mantenimiento de hábitats– necesarios para mantener las tres primeras categorías.

En los últimos años, el concepto de SE ha ganado aún más importancia gracias a la Agenda 2030 y al logro de sus objetivos, que subrayan la importancia de proporcionar SE para el bienestar humano: por ejemplo, el objetivo 11 de la Agenda destaca la necesidad de sostenibilidad en nuestras ciudades, estableciendo objetivos precisos que deben alcanzarse en 2030:

- *11.6 Reducción del impacto ambiental negativo per cápita, prestando especial atención a la calidad del aire y a la gestión de residuos urbanos.*
- *11.7 Proporcionar acceso universal a espacios públicos verdes seguros, inclusivos y accesibles, especialmente para mujeres, niños, ancianos y personas con discapacidad.*
- *11.a Apoyar vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales, fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional.*
- *11.b Mejora considerable de las ciudades que adoptan e implementan políticas y planes integrados para fomentar la inclusión, la eficiencia de los recursos, la mitigación y adaptación al cambio climático y la resistencia a los desastres, que promuevan e implementen la gestión holística del riesgo de desastres a todos los niveles, siguiendo la Estrategia de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.*

Por ello, es fundamental preservar, mejorar e implementar áreas verdes en áreas urbanas y periurbanas, potenciando y evaluando la oferta de SE, para alcanzar los ambiciosos objetivos de la Agenda 2030 y garantizar entornos sostenibles y agradables para los ciudadanos habitantes.

4. Análisis y cuantificación de los servicios ecosistémicos

Desde este punto de partida académico, los socios de Viridis Loci pretenden traducir en una guía práctica y aplicable a las situaciones de trabajo cotidianas, centrándose en lo que la vegetación urbana puede ofrecer en términos de servicios ecosistémicos. En las últimas décadas, muchos estudios han demostrado la importancia de la vegetación urbana y los árboles urbanos en la prestación de servicios ecosistémicos, como la captación de agua de lluvia y la refrigeración del entorno construido, así como la captura de contaminantes del aire. Como se ha dicho, hasta hace poco no era posible medir y dar un valor financiero a estos servicios ecosistémicos. Había muy poco conocimiento concreto sobre los beneficios de los espacios verdes para nuestras ciudades.

Actualmente, existen diferentes metodologías para realizar un análisis del arbolado urbano. La mayoría de las veces, el objetivo de la evaluación es establecer los valores económicos de los árboles y/o la evaluación del riesgo de los árboles. Por ejemplo, un sistema muy extendido en Italia se basa en la evaluación de factores fijos -cuya definición se deja en parte a la subjetividad del evaluador- multiplicado por un coeficiente de precio, llamado "precio unitario", que es una décima parte del precio de un árbol con diez cm² de área basal (por ejemplo, que tenga 3,57 cm de diámetro u 11 cm de circunferencia), tomado de una lista de precios de vivero. Esta metodología considera diferentes parámetros del árbol (valor estético, estado fitosanitario, tamaño y posición) multiplicados por el valor económico para llegar a un valor económico global del árbol. Sin embargo, la mayoría de las veces, el valor final es muy bajo en comparación con los tamaños y dimensiones reales de los árboles: por ejemplo, está claro que un árbol con una circunferencia de 11 cm no puede considerarse igual a un ejemplar maduro con una circunferencia de más de 200 cm. Por lo tanto, la información que surge de este tipo de evaluación suele ser engañosa y no precisa.

En cuanto a la evaluación de riesgos de los árboles, por lo general, los evaluadores siguen protocolos específicos –por ejemplo, el protocolo ISA– para evaluar las condiciones estáticas de los árboles y luego decidir las intervenciones necesarias según un proceso lógico basado en cuatro fases fundamentales: anamnesis, diagnóstico, pronóstico y prescripción. El objetivo es, por tanto, diferente y no incluye la cuantificación de los servicios ecosistémicos, sino que se refiere principalmente a la gestión de riesgos. En los protocolos más comunes, el primer paso fundamental es evaluar individualmente cada árbol, completando un formulario VTA (Visual Tree Assessment), que informa sobre las características del árbol y los defectos visibles, con información general sobre el entorno en el que está enraizado. De ser necesario, el evaluador puede profundizar el análisis con herramientas y técnicas adecuadas (por ejemplo, dendrodensímetro, tomografía sónica, pruebas de tiro con método SIM) con el fin de investigar más a fondo la estabilidad de un árbol, con la atribución final de una calificación (A, B, C, C/D, D), que representa la propensión a la falla, estableciendo controles en los años siguientes, o bien mantenimientos o remociones del árbol (calificación C/D y D) a realizar de forma inmediata.

Entonces, ¿cómo es posible evaluar y cuantificar los servicios ecosistémicos que ofrecen los árboles urbanos?

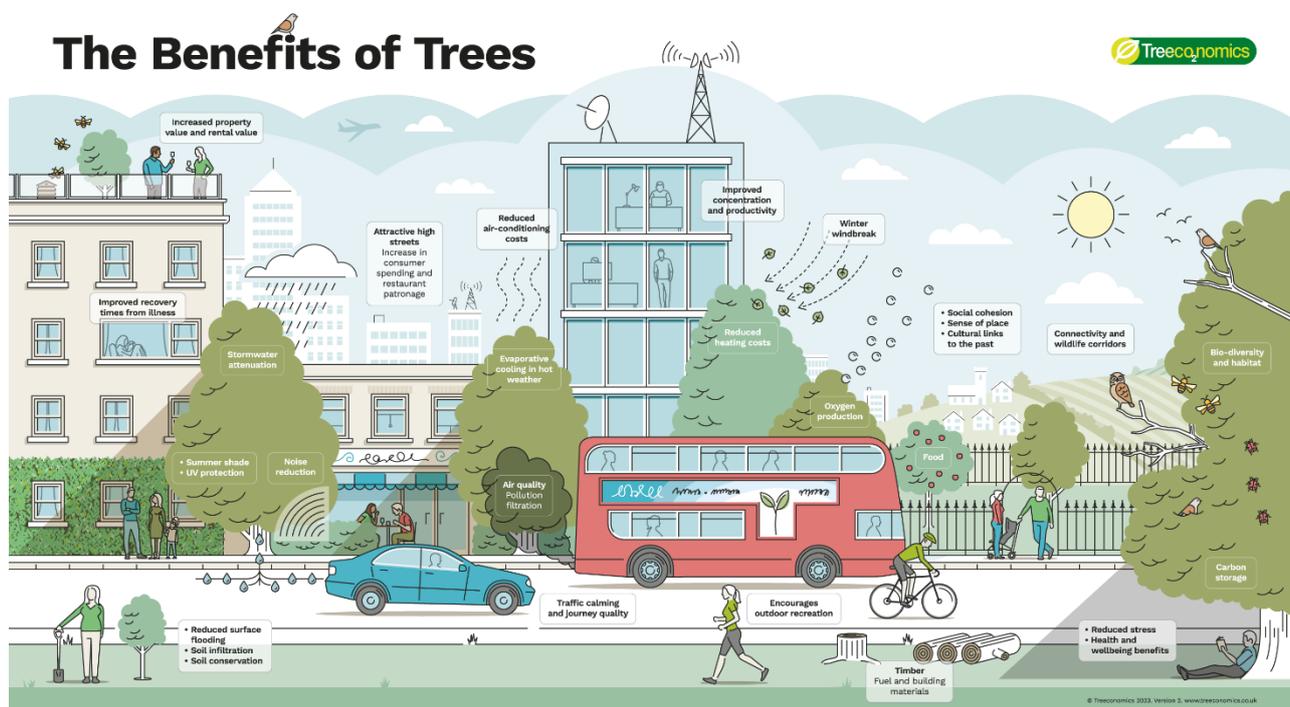


Fig. 2 Los diversos beneficios que ofrecen los árboles en las zonas urbanas. Crédito: Treeconomics

Entre las diferentes herramientas que se han desarrollado en los últimos años, la más precisa y extendida es I-Tree, desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Este software puede calcular los diferentes beneficios que proporcionan los árboles y arbustos en entornos urbanos. Una asociación entre el Servicio Forestal del USDA y varios colaboradores (entre ellos The Davey Tree Expert Company, The Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International Society of Arboriculture y Casey Trees) lanzó I-Tree en 2006. I-Tree, que tiene sus raíces en el programa Urban Forest Effects (UFORE) utilizado por el Servicio Forestal del USDA para evaluar los diversos beneficios de los árboles en lugares específicos, se destaca como una herramienta revisada por pares, accesible para todos sin cargo. Los usuarios contribuyen activamente a su evolución continua. I-Tree extendió su alcance a numerosos países europeos, incorporando especies de árboles locales y aprovechando datos meteorológicos y de contaminación provenientes de estaciones de monitoreo europeas, facilitadas por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). Los datos recientes, que abarcan desde 2015

hasta 2020 para determinadas estaciones de monitoreo del clima y la contaminación, respaldan los cálculos de los servicios ecosistémicos dentro de I-Tree. Esta integración de datos europeos permite a los usuarios adaptar los análisis a sus localidades específicas mediante la selección de las estaciones de monitoreo correspondientes: en 2021, la comunidad global de usuarios de I-Tree superó los 622 000, con más de 93 000 usuarios que operan fuera de los EE. UU.

I-Tree se compone de 11 programas diferentes, como Landscape, County, Design, Hydro, etc.

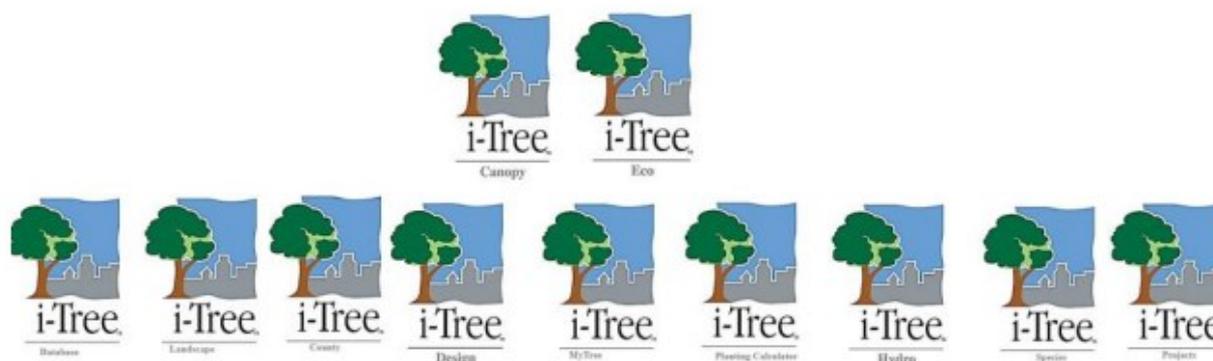


Figura 3: Vista general de la suite I-Tree, con los distintos programas de software disponibles de forma gratuita. Fuente: I-Tree.

Cada uno de ellos se centra en aspectos distintos, ya sean servicios ecosistémicos específicos como Hydro, que profundiza en los efectos del uso del suelo en la gestión del agua, o escalas variadas como el paisaje de I-Tree. I-Tree Canopy y Eco se destacan como los más utilizados y adecuados para los contextos europeos, ya que integran datos meteorológicos y de contaminación del aire. I-Tree Canopy funciona en línea y se adapta a áreas más grandes, como vecindarios, distritos y ciudades. Por otro lado, I-Tree Eco, disponible como descarga gratuita para escritorio, abarca desde árboles individuales hasta existencias completas de árboles dentro de un área designada. I-Tree Eco es, con diferencia, el software más utilizado, ya que ofrece información sobre tres facetas cruciales del inventario de árboles de una ciudad o zona: estructura, función y valor económico. Los

cálculos con I-Tree Eco pueden derivar de un inventario completo o de un estudio de parcelas.

El segundo método, que emplea una selección de parcelas distribuidas aleatoriamente de 22,6 metros de diámetro en toda la zona del proyecto, ofrece una visión general holística de la estructura, la función y el valor de las existencias de árboles locales, tanto públicos como privados. Un estudio de parcelas resulta especialmente adecuado para implementar I-Tree Eco en regiones extensas, como ciudades enteras o zonas boscosas. Al examinar un mínimo de 200 parcelas, surge una descripción precisa de los servicios ecosistémicos en toda la zona del proyecto. Por el contrario, un inventario completo abarca todos los árboles dentro del área designada, ejemplificado por el Proyecto del Millón de Árboles en la ciudad de Nueva York, que inventarió los 592.130 árboles municipales, lo que marcó una implementación pionera a gran escala de I-Tree Eco. Para realizar un cálculo de I-Tree Eco, se requieren datos esenciales como las especies y el diámetro del tronco a nivel de árbol individual.

Luego, I-Tree utiliza esta información para modelar cada árbol, lo que facilita los cálculos del área foliar. Para lograr una mayor precisión, se recomienda introducir datos adicionales, como el uso de la tierra, la altura de los árboles, las dimensiones de las copas, el estado de salud y la exposición a la luz. La precisión y la exhaustividad de estos datos influyen significativamente en los cálculos de los servicios ecosistémicos resultantes. Los datos se pueden importar a la aplicación a través de diversos medios, como Excel, o se pueden introducir directamente. Después de garantizar la integridad y la precisión de los datos, se envían al servidor con sede en EE. UU. para los cálculos de i-Tree. En un breve plazo de tiempo, normalmente unas pocas horas, los usuarios reciben una notificación para recuperar los resultados de la aplicación.

Los parámetros que utiliza I-Tree como entrada son diversos y numerosos. El software, gracias a estas entradas, puede calcular las siguientes salidas:

- Estructura y composición del bosque urbano,
- Almacenamiento de carbono y secuestro de carbono,

- Producción de oxígeno,
- Eliminación de contaminantes atmosféricos (PM 2,5; O₃; NO₂; CO),
- Efectos sobre el ciclo del agua (evitación de escorrentías).

Para cada uno de estos resultados, el software, además de cuantificarlos, puede calcular un valor económico, correspondiente a las cantidades extraídas multiplicadas por coeficientes monetarios. Cada resultado se cuantifica gracias al uso de diferentes modelos matemáticos calibrados y validados para cada simulación, con una alta fiabilidad, certificada por múltiples artículos científicos revisados por pares, así como por otros estudios de caso sobre el análisis de bosques urbanos en diferentes partes del mundo.

Estructura y composición del bosque urbano

El conjunto de árboles urbanos forma el denominado bosque urbano. Conocer la composición real del bosque urbano es crucial para evaluar y cuantificar adecuadamente los servicios ecosistémicos que proporciona. En esta perspectiva, la base de datos tiene una gran importancia: cuanto más detallados sean los datos, mayor será la precisión del análisis. I-Tree puede analizar el bosque urbano, proporcionando, por ejemplo, un marco completo de las especies presentes, las clases de diámetro más comunes y su origen. Además de estos resultados puramente informativos, I-Tree puede calcular el área foliar y la cobertura vegetal, que se utilizan como metadatos para cuantificar los beneficios ambientales.

Almacenamiento de carbono y secuestro de carbono

El papel de los árboles en la mitigación del cambio climático es bien conocido, gracias a su capacidad de secuestrar y almacenar carbono atmosférico. En particular, los árboles reducen los niveles de carbono, secuestrándolo de la atmósfera y almacenándolo en el nuevo crecimiento que se desarrolla año tras año. Para estimar la cantidad de carbono secuestrado, el modelo basa su análisis en los diámetros de cada árbol –proporcionados como entrada, en el año considerado 0– y luego calcula el crecimiento anual medio

estimado, utilizando parámetros específicos de género y especie y las condiciones de salud proporcionadas. Por tanto, I-Tree estima el diámetro de los árboles y el secuestro relativo en el año 0 + 1.

En cambio, el almacenamiento de carbono puede definirse como la cantidad de carbono presente en la biomasa de los árboles, tanto aérea como subterránea. Para calcular el almacenamiento de carbono, el modelo estima la biomasa total de cada árbol, a partir de los datos medidos y de referencias bibliográficas. Dado que los árboles con copa expandida y sometidos a mantenimiento, como los analizados, tienden a tener menos biomasa que los árboles en entornos naturales, donde están calibrados la mayoría de los modelos, I-Tree resuelve este problema multiplicando los resultados por un coeficiente estándar de 0,8. Este ajuste no se realiza en los árboles considerados como cultivados en condiciones naturales. Finalmente, el modelo multiplica la biomasa seca por 0,5 obteniendo así el carbono almacenado en cada árbol.

Producción de oxígeno

La producción de oxígeno es uno de los principales y más conocidos beneficios que garantiza el bosque urbano. El oxígeno producido cada año está directamente relacionado con la actividad de secuestro de carbono. Por tanto, el oxígeno total producido se calcula gracias al carbono secuestrado y a su peso atómico:

$$O_2 \text{ producido (kg/año)} = C \text{ neto secuestrado (kg/año)} / 32 / 12$$

Es interesante destacar que la producción de oxígeno por la vegetación tiene un impacto relativamente menor desde un punto de vista global: de hecho, nuestra atmósfera contiene niveles de oxígeno elevados y estables, principalmente gracias al componente acuático del planeta.

Eliminación de la contaminación del aire

La mala calidad del aire es un problema común en muchas áreas urbanas y puede causar diversos problemas a la salud humana y a los procesos de los ecosistemas naturales. La

vegetación, especialmente en entornos urbanos donde la presión antropogénica es máxima, puede conducir a mejoras en la calidad del aire, por ejemplo, reduciendo su temperatura, eliminando directamente los contaminantes y disminuyendo el consumo de energía en los edificios cercanos, lo que en consecuencia reduce las emisiones de contaminantes del aire debido al consumo de energía. I-Tree considera el impacto de la vegetación en la eliminación de los contaminantes urbanos más comunes: ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y material particulado (PM) de 2,5 micras.

Estas estimaciones sobre la eliminación de la contaminación atmosférica se derivan de diferentes modelos, que consideran las resistencias foliares horarias, calculadas con un modelo foliar híbrido. Además, dado que la eliminación de monóxido de carbono y PM no está directamente relacionada con la transpiración, las tasas de eliminación de estos contaminantes se han calculado a partir de valores promedio obtenidos de la literatura, ajustados en función de la fenología y el área foliar. En cuanto a la eliminación de partículas atmosféricas finas, el modelo considera una tasa de resuspensión igual al 50% de las partículas depositadas, que luego regresan a la atmósfera, debido al clima adverso, que en casos particulares también puede conducir a un aumento en la concentración de PM 2,5 en la atmósfera.

Simulación de los servicios ecosistémicos futuros

Para cuantificar la provisión de servicios ecosistémicos en el futuro, es posible aprovechar la herramienta I-Tree Forecast. Esta herramienta simula el crecimiento y desarrollo de los árboles urbanos en un período futuro. Basándose en la evaluación I-Tree Eco realizada previamente, el modelo puede simular la evolución anual de la comunidad, teniendo en cuenta posibles factores perturbadores (parásitos, eventos climáticos adversos) que pueden alterar el desarrollo de los árboles. Además, la herramienta permite establecer algunos parámetros relacionados con la vitalidad de los árboles, incluida la tasa de muerte y la tasa de nuevas plantas/año, que afectan la consistencia y la composición de la forestación urbana. De este modo, la herramienta puede simular la provisión de los

siguientes servicios: almacenamiento de carbono; secuestro de carbono; eliminación de la contaminación del aire (NO₂, O₃ y SO₂ eliminados).

Resultados

Con el respaldo de esta sólida metodología y la necesidad de contar con un conjunto completo de datos, I-Tree puede presentar sus resultados de diversas maneras, según las necesidades e intereses del usuario. Se proporciona un informe escrito en formato pdf, en el que se informan los principales resultados y gráficos de todos los servicios ecosistémicos mencionados anteriormente. Además, es posible profundizar el análisis, por ejemplo, para evaluar la contribución de especímenes y/o especies singulares. Esto está pensado específicamente para facilitar la comprensión y el uso por parte de un público más amplio de partes interesadas y, por lo tanto, hacer que los beneficios de la vegetación urbana sean más comunes.

Los datos se pueden utilizar para campañas de sensibilización y difusión personalizadas. Un ejemplo positivo de ello es la campaña TreeTag, que se inició en los Países Bajos y que ahora se está llevando a cabo en diferentes países europeos (más información en www.treetags.eu). Pius Floris Tree Care desarrolló un cartel informativo (el TreeTag) y lo aplicó en 150 árboles urbanos. Cada cartel ofrece información sobre los beneficios de ese árbol en particular, basándose en los cálculos de I-Tree Eco, con el objetivo de implicar a los habitantes locales en la protección de los árboles. Los datos de I-Tree se hicieron aún más accesibles gracias a una conversión en métricas más comprensibles, como el número de kilómetros en coche que se ahorran en CO₂ o el número de días de oxígeno para una persona que produce ese árbol.



Fig. 4 Un ejemplo de TreeTag instalado en *Quercus rubra* en los Países Bajos. Crédito: Pius Floris Boomverzorging.

5. Conclusiones y próximos pasos

El presente documento tiene como objetivo mostrar una de las soluciones actualmente disponibles para evaluar y cuantificar los servicios ecosistémicos que proporciona la vegetación urbana, con especial referencia a los árboles urbanos.

La asociación Viridis Loci considera que, con la aplicación de este enfoque y otros similares, se puede lograr una mayor conciencia de los beneficios de la vegetación urbana, con consecuencias positivas en la planificación y la gestión territorial y durante el proceso de toma de decisiones. La metodología aquí presentada no pretende ofrecer una respuesta completa ni proporcionar soluciones "universales". De hecho, se podrían añadir varios puntos al análisis, empezando por los servicios ecosistémicos culturales hasta la creación de hábitats para animales y otras capas de vegetación y suelo.

Gracias a varios proyectos en curso y a investigaciones pasadas y actuales, existe una conciencia más generalizada dentro del mundo académico y profesional sobre estas necesidades y los esfuerzos por tener una vegetación urbana valorada para ciudades habitables y saludables.

Por ello, es importante mantener a los actores locales informados y actualizados sobre esta temática, mejorando su perfil profesional con el uso de nuevas metodologías que puedan facilitar su trabajo diario.

6. Apéndice

Para mayor información y profundizar en el tema, se sugieren como fuente los siguientes materiales:

- Agencia Europea de Medio Ambiente, 2014. Programa de trabajo plurianual 2014-2018: Ampliación de la base de conocimientos para la implementación de políticas y la transición a largo plazo. Agencia Europea de Medio Ambiente, Copenhague, Dinamarca
- Centro de Noticias de las Naciones Unidas . *La ONU adopta nuevos objetivos mundiales para trazar un desarrollo sostenible para las personas y el planeta en 2030* ; Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas: Nueva York, NY, EE. UU., 2015; doi:10.1080/02513625.2015.1038080
- FAO, 2016. Directrices sobre silvicultura urbana y periurbana, por F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro e Y. Chen. FAO Forestry Paper No. 178, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Sociedad Internacional de Arboricultura, 2011. Beneficios de los árboles, disponible en: https://www.treesaregood.org/portals/0/docs/treecare/benefits_trees.pdf
- McPherson, E., Van Doorn, N., De Goede, J., 2016. Estructura, función y valor de los árboles callejeros en California, EE. UU., *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 104-115.
- Nowak, DJ 2006. Institucionalización de la forestación urbana como una "biotecnología" para mejorar la calidad ambiental. *Urban Forestry & Urban Greening* 5: 93–100.
- Roman, LA, Scatena, FN, 2011. Ratas de supervivencia de árboles callejeros: metaanálisis de estudios previos y aplicación a una encuesta de campo en Filadelfia, PA, EE. UU., *Urban Forestry & Urban Greening*, 10.
- Polomski, F., 2017. Cultivar la biodiversidad en la búsqueda de árboles resistentes para sitios urbanos difíciles, *Arborist News*, Vol. 26, N. 4, 44-49
- Daily, Gretchen C.. "Los servicios de la naturaleza: dependencia social de los ecosistemas naturales (1997)". *El futuro de la naturaleza*, editado por Libby Robin, Sverker Sörlin y Paul Warde, New Haven: Yale University Press, 2013, págs. 454-464. <https://doi.org/10.12987/9780300188479-039>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R. et al. El valor de los servicios ecosistémicos y el capital natural del mundo. *Nature* 387, 253–260 (1997). <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005. *Ecosistemas y bienestar humano: síntesis*. Island Press, Washington, DC.
- Instituto de Recursos Mundiales, 2008. *Servicios ecosistémicos: una guía para los tomadores de decisiones*. ISBN 978-1-56973-669-2



- Comune di Milano, 2017. Regolamento d'uso e tutela del verde pubblico e privato. Disponible en: <https://www.comune.milano.it/documents/20126/1003516/Regolamento+d%27uso+e+tutela+del+verde+pubblico+e+privato.pdf/686eb7d4-f765-4c8e-a9d3-ce59e034181a?t=1551271304040>
- Sociedad Internacional de Arboricultura, 2017. Uso del formulario de evaluación básica de riesgos de árboles de la ISA, disponible en: https://www.isa-arbor.com/education/resources/ISABasicTreeRiskAssessmentForm_Instructions.pdf
- Manual del usuario de I-Tree. 2008. Herramientas para la evaluación y gestión de bosques comunitarios. Paquete de software. Disponible en: <http://www.itreetools.org>.
- Nowak, DJ, Crane, DE, 2000. El modelo de efectos forestales urbanos (UFORE): cuantificación de la estructura y las funciones de los bosques urbanos. En Herramientas integradas para los inventarios de recursos naturales en el siglo XXI, ed. M. Hansen y T. Burk, págs. 714-720. St. Paul: North Central Research Station.
- Pataki, DE, Alig, RJ, 2006. Ecosistemas urbanos y el ciclo del carbono en América del Norte, *Global Change Biology*, Vol. 12, Número 11, 2092-2102.
- Nowak, DJ, Crane, DE, Stevens, JC, Hoehn, RE, Walton, JT, 2008a. Un método basado en el terreno para evaluar la estructura de los bosques urbanos y los servicios ecosistémicos. *Arboricultura y silvicultura urbana* 34: 347–358.
- Nowak, DJ, 1994. Eliminación de la contaminación del aire por el bosque urbano de Chicago. En *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*, ed. EG McPherson, DJ Nowak y RA Rowntree, págs. 63–81. Radnor: Informe técnico general NE-186 del Servicio Forestal del USDA.
- Nowak, DJ, Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R. 2013. Eliminación modelada de PM2.5 por árboles en diez ciudades de EE. UU. y efectos asociados en la salud. *Contaminación ambiental*. 178: 395-402.
- I-Tree Eco: Uso del modelo de pronóstico Disponible en: https://www.itreetools.org/documents/273/ECOV6Guide_UsingForecast.pdf
- Ditto D. et al., 2016, Desarrollo paso a paso de HIRM-KW: un modelo de escorrentía a escala de campo, *Revista Italiana de Agrometeorología*.
- Donatelli M., Acutis M., 2001. SOILPAR 2.00: software para estimar parámetros y funciones hidrológicas del suelo, *European Journal of Agronomy*, Volumen 18, Números 3-4, 2003, Páginas 373-377, ISSN 1161-0301, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00128-4).
- Collins C., Cook-Monie I., Raum S., 2019. ¿Qué sabe la gente? Servicio ecosistémico, percepción pública y gestión sostenible de los árboles de los parques urbanos en Londres, Reino Unido *Urban Forestry & Urban Greening*, 43, 126362



- Comisión Europea, Servicio de Cambio Climático – Demostración de educación sobre clima y energía del C3S. Disponible en: <https://edudemo.climate.copernicus.eu/>
- Consejo de Tasadores de Árboles y Paisajes (CTLA), 1992, Guía para la evaluación de plantas, Sociedad Internacional de Arboricultura, Savoy, IL
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2015, Grupo de trabajo interinstitucional sobre el costo social del carbono, 2015. Disponible en: <https://archive.epa.gov/epa/production/files/2016-07/documents/social-cost-carbon.pdf>
- I-Tree en Europa, Pius Floris Boomverzorging, Jahrbuch der Deutsche Baumpflege 2024