

EFFETTO DELLA VEGETAZIONE URBANA SU DISSIPAZIONE TERMICA E INQUINANTI GASSOSI

INFLUENCE OF THE URBAN VEGETATION ON THERMAL DISSIPATION AND GASEOUS POLLUTANTS

Teresa Milagros Defilippi Shinzato, Alexis Dueñas,
Julián Ccasani, Vanessa García, Gianinna Morales

ABSTRACT

Nell'ambiente urbano, la resilienza si evidenzia a seguito degli shock causati da inquinamento, rumore e modifiche di 'artificializzazione' che sono proprie della costruzione di una città. Poiché è impossibile immaginare una città senza componenti naturali, è importante studiare la tolleranza alla 'denaturalizzazione' del sistema urbanistico. L'obiettivo dell'articolo è determinare i benefici della vegetazione urbana sulla dissipazione termica e degli inquinanti gassosi. Attraverso indagini condotte su 13 parchi di Lima (Perù) vengono rilevati temperatura, umidità relativa, velocità del vento e gas inquinanti. I risultati restituiscono differenze significative su dissipazione termica e umidità relativa consentendo di confermare che la vegetazione urbana gioca un ruolo importante per raggiungere livelli sempre più sostenibili nel contesto urbano.

In the urban environment, resilience is a result of the shocks caused by pollution, noise and changes in land usage, through the process of 'artificialization', typical of the process of building a city. Since the city is unthinkable without natural elements, therefore, it is important to study the tolerance to the 'denaturalization' urban system. The main objective of the article is to determine the benefits of urban vegetation on thermal dissipation and gaseous pollutants. From studies carried out in 13 parks located in Lima (Peru), temperature, relative humidity, wind speed, and gaseous pollutants are measured. The outcomes show significant differences on thermal dissipation and relative humidity, allowing to confirm that urban vegetation plays an important role in reaching increasingly sustainable levels at city scale.

KEYWORDS

resilienza urbana, dissipazione ambientale, servizi ambientali, vegetazione urbana

urban resilience, environmental dissipation, environmental services, urban vegetation

Teresa Milagros Defilippi Shinzato, Architect and MSc, is a Full Professor at the Department of Architecture, Universidad Nacional Federico Villarreal (Peru). Member of the Research Institute at the Architecture Faculty, she carried out bioclimatic architectural courses, studies and consultancy for public and government agencies in the environmental field. E-mail: tdefilippi@unfv.edu.pe

Alexis Dueñas, Engineer and PhD, is a Full Professor at the Universidad Nacional Agraria 'La Molina', and Assistant Professor at the University Pontificia Universidad Católica del Perú. Member of the PELCAN (Peruvian Ecology Life Cycle Assessment Network), he carried out the environmental impact assessment and ecological economy and sustainable courses, consultancy for public and government agencies. E-mail: fduenas@puocp.edu.pe

Julián Ccasani, Engineer and MSc, is a Full Professor at the Department of Agroindustry Engineering, Universidad Nacional Federico Villarreal (Peru). Member of the Research and Innovation Institute at the Manufacturing and System Faculty, he carried out planning and programming process courses, studies and consultancy for public and government agencies. E-mail: jccasani@unfv.edu.pe

Vanessa García, Engineer, is a Full Professor at the Department of Agroindustry Engineering, Universidad Nacional Federico Villarreal (Peru). Member of the Research and Innovation Institute at the Manufacturing and System Faculty, she carried out auditor senior in quality consultancy, and consultancy for public agencies. E-mail: vgarcia@unfv.edu.pe

Gianinna Morales is an Assistance Teaching Practice at the Department of Architecture, and a Member of the Teaching Staff of the Architectural Faculty, North Private University (Peru). E-mail: gianina.morales@upn.pe

È impossibile immaginare una città senza quelle componenti ambientali che, in parte, ne costituiscono la resilienza, caratteristica misurabile con la tolleranza di una città all'effetto della 'denaturalizzazione urbana'. Con quest'ultima, il paesaggio subisce una sorta di sterilizzazione, risultato di una modifica delle condizioni ambientali spesso per migliorare la 'mobilità' (Meza Aguilar and Moncada Maya, 2010; Ravetz, 2001; Cabrero, Orihuela and Ziccardi, 2003). D'altra parte, la vegetazione urbana, oltre ad avere un'evidente resilienza, è un mezzo per integrare lo spazio naturale con quello costruito dall'uomo (habitat urbano). Ne risulta la costruzione di un paesaggio antropico, a cui l'uomo e la sua cultura assegnano una doppia dimensione, dove la cultura e l'ambiente diventano una risorsa (Sotomayor, 2003; Gómez Mendoza, 2003; Gauzin-Müller, 2000).

Il paesaggio come risorsa ambientale possiede tre aspetti: visibilità, qualità paesaggistica e resilienza, quest'ultima definita come la capacità di assorbire i cambiamenti. In tal senso, i fattori che caratterizzano la resilienza sono biofisici (suolo, vegetazione, cromatismo, ecc.), morfologici (bacino visivo, altezza relativa), e frequenza o percentuale di visite (Otero Pastor, 2005). La vegetazione è per sua natura eterogenea in estensione (Grey and Deneke, 1992) e composizione (Nowak and McPherson, 1993), aspetti che hanno effetti differenti sull'ambiente comprendendo, tra gli altri, la cattura del carbonio, la resilienza o la dissipazione di anomalie urbane, ovvero isole di calore e inquinamento dell'aria (Sahely, Dudding and Kennedy, 2003).

Nowak e McPherson (1993) riportano i principali effetti diretti che la vegetazione ha sull'ambiente urbano, in relazione a: 1) clima, 2) consumo d'energia, 3) qualità dell'aria, 4) CO₂, 5) dissipazione dell'inquinamento atmosferico. Dal canto loro, Reyes-Avilés e Gutiérrez Chaparro (2010) considerano che la vegetazione urbana, e in particolare l'albero, fornisce dei benefici ambientali aggiuntivi rispetto a quelli già menzionati, quali: regolazione della temperatura, produzione di ossigeno, stabiliz-

zazione del suolo, barriera acustica e riqualificazione. È da segnalare inoltre che diverse tecnologie sono già state sviluppate per mitigare gli effetti del cambiamento climatico, e tra queste la cosiddetta 'geo-ingegneria', una tecnica che permette di diminuire la quantità di radiazione solare che penetra nel Pianeta, di imbrigliare la CO₂ atmosferica in strati geologici profondi o accrescere il volume del fitoplankton marino per aumentare le doline, il tutto su scala planetaria (Bravo, 2013). Alle piante di città, con le loro altezze e dimensioni varie, va quindi delegato il compito di assorbire la CO₂ atmosferica.

Il verde urbano della metropoli di Lima: un problema di dati | Un primo problema con cui ogni ricerca sul paesaggio urbano deve confrontarsi riguarda la conoscenza dell'estensione di una delle sue componenti principali, il verde urbano. A partire da questo dato è sempre possibile mettere a confronto diverse città e agglomerati urbani; ad esempio, il parametro di Verde Urbano pro capite (VU/pc), che riporta la superficie di verde, pubblico o privato, per abitante, consente di collegare la variabile di dissipazione ambientale (VU/pc) con la variabile della pressione ambientale (numero di abitanti). Esistono vari dati che illustrano questo rapporto (VU/pc) il quale nel tempo, ovviamente, è diminuito progressivamente a causa del processo di urbanizzazione e dell'aumento della popolazione; se combinato con il parametro 'erosione urbana', cioè la conversione del suolo urbano in suolo urbanizzato (quindi costruito), si ottiene la misura di quanto sia pregiudicata la capacità di dissipazione ambientale del paesaggio urbano.

Per l'analisi sul contesto di Lima, sono state prese in considerazione quattro importanti fonti. La prima è l'inventario delle aree a verde pubblicato nel 2010 dall'Istituto Metropolitano Planificación (IMP, 2010); la seconda è il Report pubblicato dal Comune di Lima del 2012 (MML, 2012); una terza fonte proviene da una ONG (con sede nell'Osservatorio Ciudadano di

Lima) che ha reso noto nel 2014 un rapporto intitolato *Cómo vemos el ambiente en Lima?* (Lima *Cómo Vemos*, 2014); infine, l'inchiesta metropolitana dell'IPSOS-Peru, commissionata nel marzo 2015 dal quotidiano *El Comercio* (2015). Una costante di tutte queste fonti è l'eterogeneità dei dati. Per esempio, i valori di VU/pc dell'IPSOS-Peru e del *Cómo vemos el ambiente en Lima?* sono molto simili, essendo rispettivamente 6,26 e 6,32 mq/ab. Un valore più basso è riportato dalla MML (2012), 4,29 mq/ab, mentre per l'IMP (2010) il VU/pc è pari a 1,42 mq/ab; quest'ultimo valore si deve al fatto che l'Istituto Metropolitano Planificación ha considerato solo 16 Distretti e non 45 come le altre fonti.

Lo studio è stato condotto prendendo in esame 13 parchi come campione significativo dei Distretti di San Isidro e Miraflores (Strat A), Magdalena e San Miguel (Strat B), Jesús María e Lince (Strat C) della città di Lima (Table 1). Il numero dei parchi presi in esame (13) è pari al 10% del totale dei parchi di Lima e al contempo pari al 10% dei parchi presenti in ciascun Distretto (Table 2). Come prima attività, si è proceduto all'acquisizione di dati georeferenziati e di mappe satellitari (2012-2016), per valutare sia la copertura e la densità della vegetazione urbana, sia la densità urbana, i nodi stradali e la viabilità principale (Fig. 1). Poi è stato rilevato il profilo della vegetazione urbana di ciascun parco e/o spazio pubblico per classificare composizione, densità, estensione e specie. Infine, sono state acquisite le misurazioni dei parametri climatici (temperatura, umidità relativa dell'aria, velocità del vento, precipitazioni, luminosità, radiazione solare) e degli inquinanti gassosi (CO, NO_x e SO_x), utilizzando apparecchiature ad alta precisione in quattro diverse postazioni di monitoraggio: tre senza vegetazione denominate A, B e C, e una con vegetazione denominata D (Fig. 2).

Dal punto di vista metodologico, la procedura impiegata nello studio prevede, per ciascun Distretto campione, dapprima l'analisi delle aree urbane consolidate e il rilievo degli indici

| Strat | Districts | GA/pc | Number of parks |
|-------|-------------|-------|-----------------|
| A | San Isidro | 15.31 | 21 |
| | Miraflores | 10.05 | 31 |
| B | Magdalena | 2.95 | 12 |
| | San Miguel | 8.68 | 34 |
| C | Jesús María | 6.80 | 13 |
| | Lince | 2.38 | 10 |

Table 1 | Districts divided by areas for the research of Green Area per capita and number of parks.

Table 2 | Distribution of the sample by district and by areas.

| Strat | Districts | Number of parks | Fi | Size of the "n" in the District | Size of the "n" in the District (reassigned) | Size of the "n" in the Strat "L" |
|-----------------------|-------------|-----------------|-------------|---------------------------------|--|----------------------------------|
| A | San Isidro | 21 | 0.16 | 2.24 | 2 | 5 (0.384) |
| | Miraflores | 31 | 0.24 | 3.31 | 3 | |
| B | Magdalena | 12 | 0.09 | 1.28 | 1 | 5 (0.384) |
| | San Miguel | 34 | 0.34 | 3.70 | 4 | |
| C | Jesús María | 13 | 0.10 | 1.39 | 2 | 3 (0.230) |
| | Lince | 10 | 0.08 | 1.07 | 1 | |
| Population (N) | | 121 | 1.00 | 13.00 | 13 | 57 (1.0) |

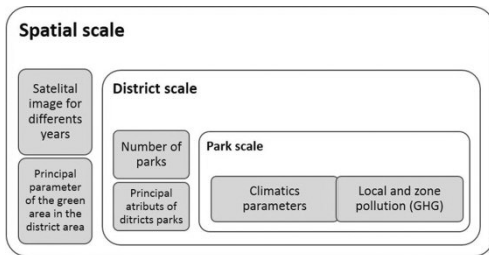


Fig. 1 | Methodological approach used in the research at different scales.

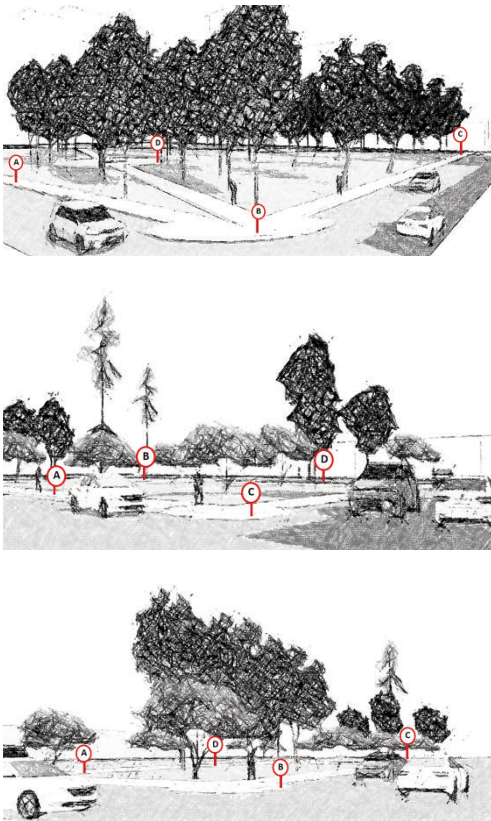


Fig. 2 | Four monitoring station without vegetation (A, B, C) and with vegetation (D): Park Alonso Ugarte – San Isidro District; Park Jacarnada – Jesús María District; Park Las Rosas – San Miguel District.

di copertura e densità arborea (Fig. 3), poi l'analisi statistica delle fonti remote per valutare gli schemi di densità e la struttura media tipica delle comunità vegetali, successivamente la catalogazione delle specie vegetali e la stima dei loro bio-parametri. I valori climatici, tra cui quelli termici e ambientali (gas CO, NO₂, H₂S e SO₂), sono stati misurati nelle zone con vegetazione dall'alta densità urbana e in prossimità degli assi stradali (Fig. 4). Infine, si sono messe a confronto le zone con e senza vegetazione urbana per distretto, per trovare sia il tasso di dissipazione termica e ambientale che di resilienza complessiva, con il test di Wilcoxon.

Risultati | Nello scenario urbano, la resilienza è la capacità che un sistema, nello specifico il paesaggio, ha di resistere ai cambiamenti causati dall'evoluzione delle città. Il paesaggio può reagire alle sollecitazioni esterne in due modi: o tramite 'assorbimento', ovvero sopportando i diversi livelli di cambiamento senza alterare le

proprie caratteristiche fisiche, estetiche, funzionali e ambientali – questo tipo di resilienza viene chiamata 'elastica' o 'reversibile' – o tramite una 'deformazione', compromettendo in tutto o in parte le sue componenti a diversi livelli – in questo caso, si parla di resilienza 'inelastica' o 'irreversibile'.

Per studiare adeguatamente la resilienza, è importante non soltanto conoscere l'entità del cambiamento ma anche il valore della risposta che elabora o assorbe la deformazione. In questo senso, è opportuno, per prima cosa, analizzare il comportamento del paesaggio urbano attraverso le componenti della vegetazione urbana misurate in termini di verde urbano pro capite (VU/pc), includendo l'area pubblica (parchi), le superfici perimetrali (terrapieni e viali) e infine i giardini. Nel caso in esame, l'ultima componente non è stata presa in considerazione, poiché contribuisce in maniera limitata alla mitigazione dell'impatto ambientale generato dalla città.

Una seconda fase riguarda la misurazione dell'influenza del VU/pc sui parametri del microclima urbano, così come sulla dissipazione dell'inquinamento, in termini di gas serra, generato dal trasporto urbano. In entrambi i casi, l'obiettivo è lo stesso, ovvero stabilire il nesso di causalità che collega gli effetti prodotti da 'isola di calore' e 'inquinamento atmosferico a livello pedonale'. Nei paragrafi seguenti verranno esposti gli effetti del VU/pc sul meso-clima, partendo da una rigorosa valutazione delle diverse fonti, sia ufficiali che private, relative alla superficie di verde urbano presente in città. Dopo aver riportato una panoramica delle variabili climatiche, espresse in termini di media mensile sul medio termine (dieci anni), vengono fornite le prove dell'influenza che il VU/pc ha sul meso e micro-clima.

Produzione Primaria Netta Urbana | Il concetto di Produzione Primaria Netta Urbana (PPNU) si riferisce alla capacità delle comunità vegetali di produrre biomassa dal processo di fotosintesi, ed è associato prevalentemente alla vegetazione spontanea e, in misura minore, alla vegetazione coltivata. Per quest'ultima si preferisce usare il termine di biomassa o raccolto: le comunità vegetali della città sono comunque specie coltivate perché richiedono irrigazione, cura e manutenzione. In questo senso, il concetto di biomassa si potrebbe associare a quello di Produzione Primaria Netta, che varia da parco a parco, a seconda del numero di esemplari, specie, densità e struttura verticale.

Le notevoli differenze di PPNU rilevate (Fig. 5) sono dovute principalmente alla composizione stratigrafica e allo sviluppo verticale delle comunità vegetali – arboreo (più alto), cespuglioso (intermedio) e piante a sviluppo orizzontale (a suolo) – quelle di biomassa sono dipendenti dal numero variabile di esemplari in un dato parco, mentre quelle riscontrate sia a livello di zona che di parco dipendono dalle diverse interazioni fra densità e popolazione (cioè il numero di individui).

Dissipazione microclimatica: una tripla correlazione (temperatura, umidità relativa e

velocità del vento) | Nella letteratura di riferimento si menzionano spesso i benefici ambientali prodotti dalla vegetazione urbana, soprattutto quelli che favoriscono la regolazione di temperatura, umidità relativa, irraggiamento e velocità del vento. I risultati dello studio dimostrano che la vegetazione urbana ha un effetto diretto sulla regolazione del regime termico. Nelle varie unità di analisi (i parchi) si è riscontrata una notevole differenza di temperatura (anche all'interno della stessa giornata) tra le postazioni A, B e C, e la D: nelle prime tre, caratterizzate da una pavimentazione in cemento e asfalto, le temperature rilevate avevano valori più alti di quelli riscontrati nella quarta, caratterizzata invece dalla presenza di un'importante copertura vegetale (alberi e piante basse).

I risultati rendono evidente anche un secondo effetto, questa volta sull'umidità relativa, con rilevanti differenze tra le postazioni di osservazione A, B e C e la D. Nella maggior parte dei parchi è stata rilevata un'umidità più alta nelle postazioni D, rispetto alle A, B e C, con differenze significative anche all'interno della stessa giornata. In relazione poi alla posizione dei parchi rispetto al contesto urbano, i dati hanno fornito valori di umidità maggiori per i parchi vicino la linea di costa (San Miguel, Magdalena, San Isidro e, in parte, Miraflores). Infine, lo studio ha non rilevato alcun effetto della vegetazione sulla velocità del vento. In vari casi, le postazioni D hanno una velocità del vento maggiore rispetto ad A, B e C; in altri casi, si riscontrano risultati opposti. D'altra parte, ci sono pure significative differenze tra la velocità del vento nella mattina e nel pomeriggio. I riscontri porterebbero a escludere qualsiasi effetto del vento sulla 'dissipazione' della vegetazione urbana, ma di ciò si discuterà in seguito.

Dai risultati sopra illustrati si può dedurre quindi che esistono variabili climatiche tra la micro-scala e la meso e macro-scala. In particolare, le variazioni di valori acquisiti tra la mattina e il pomeriggio, e tra le postazioni A, B e C, e la D, sono rilevanti per i livelli di temperatura e umidità relativa. Nel caso della velocità del vento, le variazioni sono invece sono irrilevanti. Inoltre, per i primi due parametri (temperatura e umidità) si rileva un effetto di dissipazione, mentre per il terzo (velocità del vento) tale effetto appare assente.

Dissipazione dell'inquinamento: vegetazione e gas serra | Spesso si afferma tra i benefici ambientali prodotti dalla vegetazione urbana vi sia quello della dissipazione dell'inquinamento: è il caso di Nowak e McPherson (2003) i quali sostengono che ogni metroquadrato di verde urbano contribuisce alla cattura di CO₂ equivalente, cioè di gas serra (NO_x, SO_x e CO). Con queste premesse teoriche, ci si aspetterebbe un'importante correlazione tra biomassa vegetale e concentrazione di gas serra; tuttavia, su micro-scala, non sono state rilevate emissioni di H₂S, CO e SO₂, mentre le emissioni di NO₂ hanno riportato valori bassi, compresi tra 0,005 e 0,03.

Per quanto riguarda l'inquinamento da NO₂, non sono state riscontrate differenze di misurazione nelle postazioni dei parchi rispetto al-

l'intensità del traffico veicolare (che è la principale fonte di emissioni di gas serra) mentre si evidenziano solo differenze di concentrazione di NO₂ tra la mattina e il pomeriggio (nelle prime ore della giornata i valori sono maggiori). Inoltre, i dati di concentrazione di NO₂ in ppm, per la maggior parte dei casi analizzati, riportano valori diversi tra le postazioni A, B e C, e la D. Per di più, quando si valutano le percentuali di variazione tra i valori mattutini e pomeridiani, per postazione e secondo le unità di analisi, si notano grandi o piccole differenze che però non seguono logiche precise. Inoltre, non si è trovata alcuna correlazione tra le differenze dei valori mattutini e pomeridiani, rispetto alla localizzazione delle unità d'analisi. Ciò potrebbe portare ad affermare che la dissipazione dei gas serra su micro-scala non fornisce benefici per gli utenti del parco ma solo su meso e macro-scala.

Bio-dissipazione. Un modello esplicativo per i servizi ambientali della città su micro-scala

Sulla base dei risultati illustrati nel paragrafo precedente, è lecito porsi le seguenti domande: è possibile ipotizzare un modello di bio-dissipazione alla micro-scala di una città? Come strutturare il modello proposto? In effetti, è possibile predisporre un modello di bio-dissipazione composto da due componenti: da un lato, l'effetto della vegetazione urbana sulle variabili climatiche, dall'altro, il comfort fornito al cittadino dal tasso di Produzione Primaria Netta. Nel caso della velocità del vento, l'effetto di dissipazione è assente: a livello di suolo, infatti, questa variabile, che dipende più dalla ruvidità del terreno che dalle sue componenti, produce valori bassi e non significativi (R² = 0,27). La bio-dissipazione dovrebbe quindi avere due componenti diverse, una per il clima, l'altra per l'inquinamento prodotto dai gas serra.

Al fine di validare statisticamente il modello di bio-dissipazione proposto, sono state individuate quattro possibili modalità operative, indicate nella Tabella 3. In generale, l'ipotesi Nulla è quella per la quale non si ritiene di mettere in campo azioni di progetto, mentre l'ipotesi Alternativa è quella che, su proposta del ricercatore, ritiene necessario un intervento, un cambiamento dello stato corrente.

Analisi dei risultati e conclusioni

L'effetto di 'dissipazione' che esercita la vegetazione urbana all'interno della città, ha due componenti. Da un lato, la scala di dissipazione in cui si manifesta e che può avvenire in dimensioni macro, meso e micro (Fig. 6). Dall'altro, il campo di dissipazione, che comprende fattori climatici, ambientali o di comfort (Fig. 7). Nel caso del componente di scala, la dissipazione esercitata dalla vegetazione urbana è vincolata a benefici ambientali quali la regolazione termica (macro e micro-scala), la regolazione dell'umidità (micro-scala) e la velocità del vento (macro-scala). E se per dissipazione ambientale, in riferimento alla concentrazione dei gas serra, intendiamo una proprietà evidenziata su meso e macro-scala, la componente dell'area di 'dissipazione', in relazione ai benefici su clima e comfort, interessa la micro-scala (sebbene, al

contrario, la dissipazione ambientale sarebbe più tipica dei livelli macro e meso).

Ogni variazione del modello della bio-dissipazione può essere riportata su un piano cartesiano (Fig. 8), indicando le percentuali di variazione nelle componenti di scala o ambito all'interno di uno dei quattro quadranti: nel primo, le variazioni di entrambe le componenti sono positive, nel secondo sono positive le variazioni della scala e negative quelle dell'ambito, nel quarto si invertono i valori del secondo quadrante; il terzo quadrante riporta lo scenario peggiore, nel quale entrambe le componenti hanno valori negativi.

La strutturazione del modello richiede due considerazioni finali. La prima riguarda l'importanza del parametro Produzione Primaria Netta del Settore Urbano, che esprime la produzione di biomassa nell'ambito e nella scala della città. La seconda, riferita ai benefici ambientali della vegetazione urbana, è che possono dirsi confermate le risultanze delle sperimentazioni presenti in letteratura sul controllo dell'inquinamento (Novak and Macpherson, 1993), sulla regolazione termica (Gómez, Higuera and Ferrer, 2016), sul controllo dell'umidità relativa, sulle risorse idriche (Zavala-Cruz et alii, 2016), sulla stabilizzazione dei suoli (Bermúdez Rojas et alii, 2016), sulla salute (Cariñanos et alii, 2016) e il benessere dei cittadini che entrano in contatto con la resilienza a seguito di disastri naturali (Platt, Brown and Hughes, 2016).

The city is unthinkable without the environmental values, which partly constitute its resilience, characteristic measurable by the tolerance of a city to the effect of 'urban denaturation'. Therewith, the landscape endures a form of sterilization, resulting from the change of environmental conditions often performed to improve 'mobility' (Meza Aguilar and Moncada Maya, 2010; Ravetz, 2001; Cabrero, Orihuela and Ziccardi, 2003). Moreover, urban vegetation, in addition to its manifest resilience, it is a vehicle for the integration of natural space and space built by man (urban habitat). The result is the construction of the anthropic landscape, to which man and his culture give a double dimension; where the cultural, and the environmental, become an asset (Sotomayor, 2003; Gómez Mendoza, 2003; Gauzin-Müller, 2000).

Landscape as an environmental asset includes three aspects: visibility, landscape quality, and resilience, the latter is defined as the ability to absorb changes. In this way, the factors that characterize resilience are: biophysical (soil, vegetation, chromatism, etc.), morphological (visual basin, relative height) and frequency or rate of visits (Otero Pastor, 2005). The vegetation is, by nature, heterogeneous in extent (Grey and Deneke, 1992) and configuration (Nowak and Mcpherson, 1993), aspects with different effects on the environment including, among others, carbon capture, resilience or dissipation of urban disturbances – heat island and air pollution (Sahely, Dudding and Kennedy, 2003).

Nowak and McPherson (1993) refer the main direct effects that vegetation has on ur-

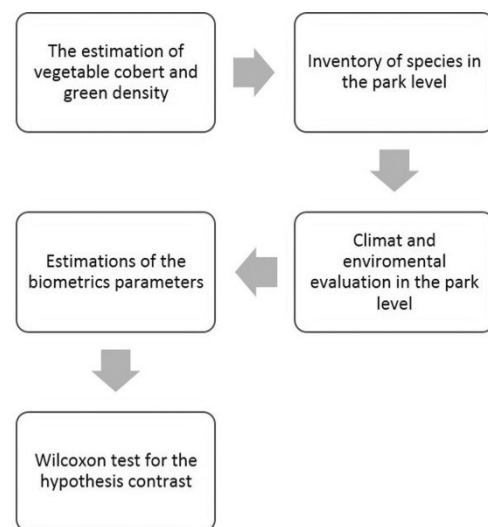


Fig. 3 | Procedure for data processing and results.

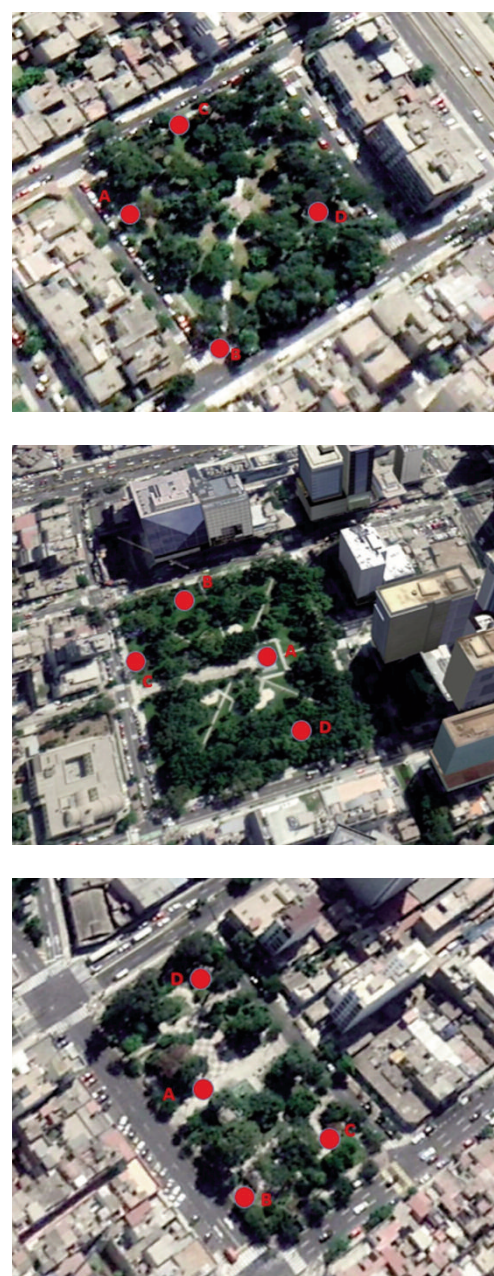


Fig. 4 | Aerial views of the parks with the monitoring method concept: Park Mercedes Cabello – District Miraflores; Park Combate de Abtao – District San Isidro; Park Los Bomberos – District Lince.

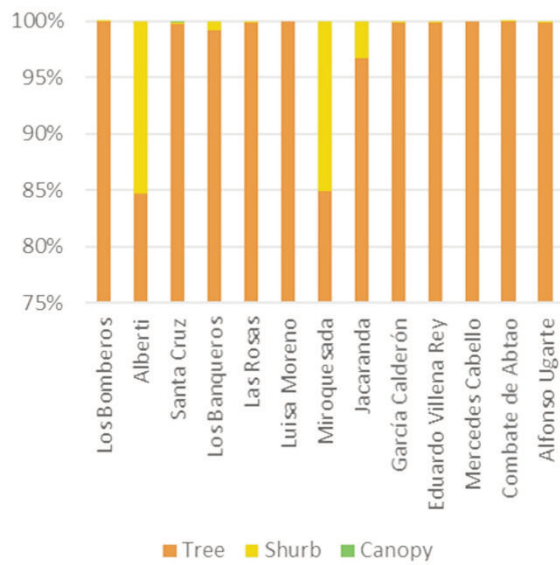
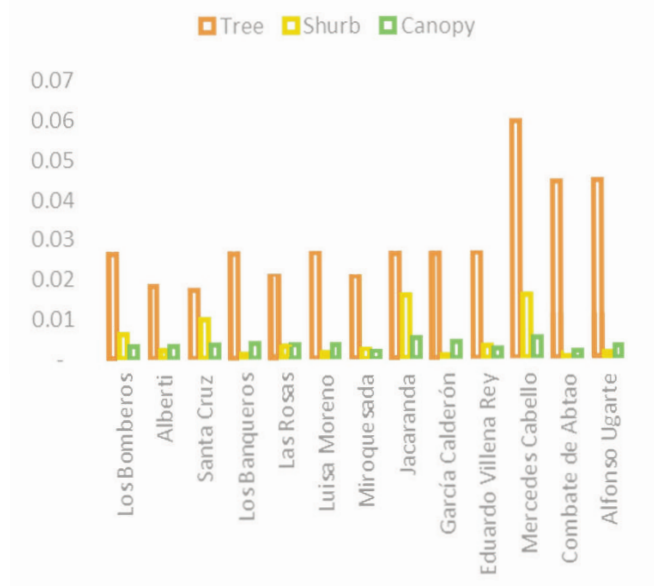
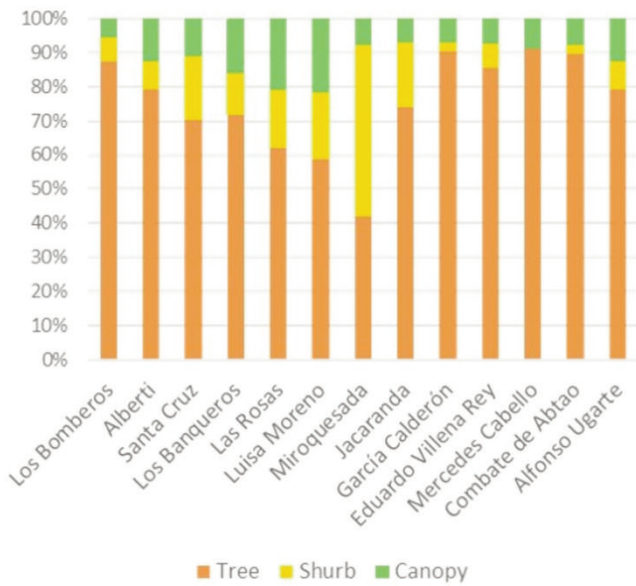


Fig. 5 | Number of specimens per unit of analysis (parks); Density of specimens per unit of analysis (parks); Net primary productivity per unit of analysis; Aggregate net primary productivity based on analysis units.

ban environment, in relation to: 1) climate, 2) energy consumption, 3) air quality, 4) CO₂, 5) dissipation of air pollution. Reyes-Avilés and Gutiérrez Chaparro (2010), estimated that urban vegetation, and in particular trees, provides environmental services in addition to those already mentioned, such as: temperature regulation, oxygen generation, soil stabilization, acoustic barrier and redevelopment. It is noteworthy that many technologies have already been developed to mitigate the effects of climate change, one of them is the so-called 'geo-engineering', a technique that allows decreasing the amount of sunlight that enters the Planet, trap atmospheric CO₂ in deep geological strata or increase the volume of the marine phytoplankton to increase sinkholes, on a planetary scale (Bravo, 2013). Urban plants, with their various heights and dimensions, get the task of absorbing atmospheric CO₂.

The green area in Lima metropolis: a data problem | A first problem any research related to the urban landscape has to face is knowing

the magnitude of one of its main components: the green area. From this data it is always possible to compare different cities and urban conglomerates, for instance, the parameter Green Area per capita (GA/pc), shows the, public or private, green area per citizen, allowing to link the environmental dissipation variable (GA/pc) with the environmental pressure variable (number of citizens). There are various data illustrating this ratio (GA/pc), which over time, of course, has been decreasing as a result of the urbanization process, and the increase of the population; if combined with the 'urban erosion', that is the conversion of urban soil into urbanized (and therefore built) soil, we obtain how much the environmental dissipation capabilities of the urban landscape are affected.

To study Lima's context, four important data sources have been evaluated. The first is the inventory of green areas carried out by the Instituto Metropolitano Planificación (IMP, 2010); the second is the Report published by the Municipality of Lima in 2012 (MML, 2012); a third source comes from an NGO (having its head-

quarters in Lima's Observatorio Ciudadano), which in 2014 published the bulletin titled 'Cómo vemos el ambiente en Lima?' (Lima Cómo Vamos, 2014); finally, the metropolitan survey of IPSOS-Peru, commissioned in March 2015 by the El Comercio Newspaper (2015). A constant of all these sources is its heterogenous results. For example, the average GA/pc values of IPSOS-Peru and 'Cómo vemos el ambiente en Lima?' are quite similar, being 6.26 the first and 6.32 sqm/hab the second. A lower value is reported by MML (2012) with 4.29 sqm/hab, while the IMP states that the GA/pc ratio is 1.42 sqm/hab; This latter ratio is due to the fact that the Instituto Metropolitano Planificación only considered 16 districts and not 45 as the other sources.

The study was carried out analysing 13 parks as significant samples of San Isidro and Miraflores (Strat A), Magdalena and San Miguel (Strat B), Jesús María and Lince (Strat C) parks in the city of Lima (Table 1). The number of the parks analysed (13) is the 10% of all the parks in Lima and at the same time the 10% of all the

parks in each District (Table 2). First, geo-referenced data and satellite maps were collected (2012-2016) to assess the coverage and density of urban vegetation, as well as urban density, road junctions and main roads (Fig. 1). Secondly, the profile of urban vegetation was obtained from each park and/or public space to determine its composition, density, extent and inventory of species. Finally, the measurement of climate parameters (temperature, relative air humidity, wind speed, precipitation, brightness, sunlight), and gaseous air pollutants (CO, NO_x and SO_x) were acquired by using high-precision equipment in four different monitoring stations: three without vegetation, called A, B and C, and one with vegetation called D (Fig. 2).

The procedure used in this study consisted of studying, for each District sample, first the analysis of consolidated urban areas and the survey of plant coverage and density (Fig. 3), then the statistical analysis of remote sources to estimate plant coverage density patterns and the average structure typical of plant associations, and an inventory of the plant species and an estimate of their bio-parameters. Climate values, including thermal and environmental ones (CO, NO₂, H₂S and SO₂ gases), were measured in areas with high urban density and near to road axes (Fig. 4). Finally, comparisons were made between the areas with and without urban vegetation per district, to estimate both the rate of thermal and environmental dissipation and the total dissipation rate, with the Wilcoxon test.

Results | In the urban case, resilience is the capacity of a system, in particular the landscape, to withstand the changes caused by the evolution of the city. The landscape can react to external solicitations in a twofold way: by 'absorption', that is accepting different degrees of changes without altering its physical, aesthetic, functional and environmental characteristics – this type of resilience is called 'elastic' or 'reversible' – or by 'deformation', compromising totally or partially its components at different levels – in this case, it is called 'inelastic' or 'irreversible' resilience.

For an adequate study of resilience, it is important not only to know the magnitude of the change but the response value, which pro-

cesses or absorbs deformations. In this way, it is important, first of all, to analyse the behaviour of the urban landscape through the components of urban vegetation, measured in terms of green area per capita (GA/pc) including public areas (parks), perimeter surfaces (embankments and malls) and finally the gardens. In the examined case, the latter component has not been taken into account, due to its low contribution to the mitigation of environmental impacts generated by the city.

A second stage is the measurement of the GA/pc influence on the parameters of urban microclimate, and the dissipation of pollution, in terms of greenhouse gases (GHGs), generated by urban transport. In both cases, the aim is the same, establishing the causality that links the influences of the 'heat island' and the 'gas pollution at pedestrian level'. In the following sections are detailed the influences of GA/pc on mesoclimate, based on a rigorous evaluation of the different sources, both official and private, about the surface of the green area in the city. After having presented an overview of the climatic variables, expressed in terms of the monthly average over the medium term (ten years), evidence is provided of the influence that the VU/pc has on meso and microclimate.

Urban Net Primary Production | The concept of Urban Net Primary Production (UNPP) refers to the ability of plant associations to produce biomass from the photosynthesis process and it is almost exclusively related to spontaneous vegetation and, to a lesser extent, to cultivated vegetation. For the latter, the concept of biomass or harvest is preferred: plant associations in the city are cultivated types because they demand irrigation, care and maintenance. In this sense, the concept of biomass could be associated with Net Primary Production, which varies from park to park, depending on the number of specimens, species, density and vertical structure.

The notable differences of UNPP (Fig. 5) are due mainly to the stratigraphic configuration and vertical development of plant associations – arboreal (highest), bushy (intermediate) and repent (floor) – biomass differences depend on the variable number of specimens in a given park, while the differences found both at area and park level

depend from the varying interaction of density and population (that is the number of individuals).

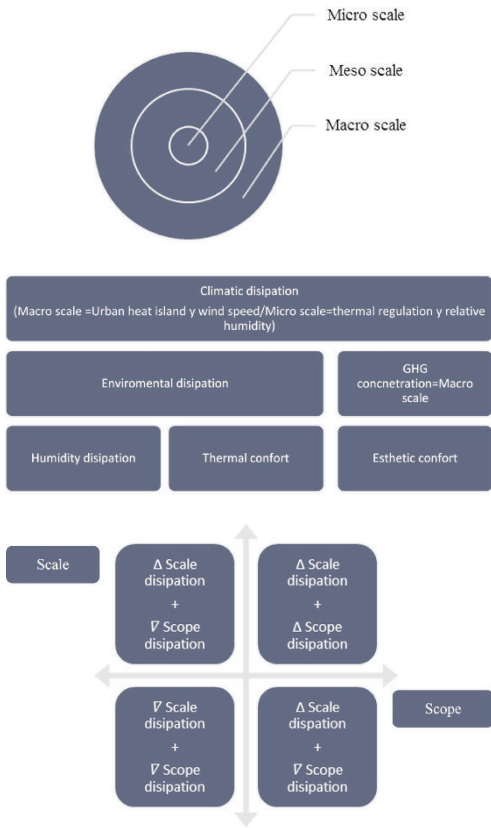
Microclimatic Dissipation: a triple association (temperature, relative humidity and wind speed) | In the reference literature, it is often mentioned the environmental benefits produced by urban vegetation, especially those favouring the regulation of temperature, relative humidity, radiation and wind speed. The results of the study show that urban vegetation has a direct effect on the regulation of the thermal regime. In the various analysis units (parks) there is a notable difference (even in the same day) between stations A, B and C, and D: in the first three, characterized by a concrete and asphalt pavement, the temperatures detected had higher values than those found in the fourth, characterized by an important plant cover (tree and ground cover plants).

The results clearly show a second influence, this time on relative humidity, with relevant differences between observation stations A, B and C, and D. In most parks, a higher humidity was recorded at Stations D than at stations A, B and C, with significant differences within the same day. In relation to the position of the parks with respect to the urban context, the data provided greater humidity values for the parks near the coast (San Miguel, Magdalena, San Isidro and partially Miraflores). Finally, the study has not found any effect of vegetation on wind speed. In various cases, type D stations have higher wind speed compared to A, B and C; in other cases, there are opposite results. Moreover, there are significant differences between the wind speed in the morning and in the afternoon. The data would lead to exclude any effect of the wind on the 'dissipation' of urban vegetation, but this will be discussed below.

Therefore, from the results above mentioned, it can be deduced that climatic variables on the microclimate, mesoclimate, and macroclimate scale exist. Precisely, the variation rates acquired in the morning and afternoon, and in stations A, B and C and D, are important for the levels of temperature and relative humidity. Instead, in the case of wind speed, variations are small. Moreover, for the first two parameters (temperature and humidity) a dissipation effect is observed, while for

| N° | Null Hipótesis [H ₀] | Test | Measured Values | Decision |
|----|---|---|--|----------------------------|
| | | | Significance statistics level (α=0,05) | |
| 1 | The median differences between temperature change without vegetation and temperature change with vegetation equal to 0 | Wilcoxon signed range testing for related samples | 0.007 | Reject the Null Hypothesis |
| 2 | The median differences between moisture change without vegetation and change of humidity with vegetation equal to 0 | Wilcoxon signed range testing for related samples | 0.002 | Reject the Null Hypothesis |
| 3 | The median differences between wind speed change without vegetation and wind speed change with vegetation equal to 0 | Wilcoxon signed range testing for related samples | 0.345 | Keep the Null Hypothesis |
| 4 | The median differences between no vegetation-free NO ₂ concentration change and NO ₂ wind concentration change with vegetation equal to 0 | Wilcoxon signed range testing for related samples | 0.875 | Keep the Null Hypothesis |

Table 3 | Summary of the different hypothesis for Bio-dissipation model components.



the third (wind speed) this effect is absent.

Pollution Dissipation: vegetation and greenhouse gases | It is often argued that among the environmental advantages of urban vegetation there is pollution dissipation. This is the case for Nowak and McPherson (2003), who argued that every square metre of green area in the city contributes to capturing CO₂ equivalent, i.e. all greenhouse gases (NO_x, SO_x and CO). With these theoretical premises, one would expect an important correlation between plant biomass and greenhouse gases concentration; however, at the micro-level, no H₂S, CO and SO₂ emissions were recorded, while NO₂ emissions had low values, ranging from 0.005 to 0.03.

As for NO₂ pollution, no measurement differences were found in the park stations compared to the intensity of vehicular traffic (which is the main source of GHG emissions), while are detected differences only in NO₂ concentrations between morning and afternoon (in the early hours of the day the values are higher). Moreover, the values of NO₂ con-

centration in ppm, for most of the cases analysed, have different values between stations A, B and C, and D. Then, when assessing variation rates between morning and afternoon values, per station and according to analysis units, it is noted that there are large and small differences that do not follow a precise pattern. In addition, there is no correlation between the differences in morning and afternoon values related to the location of the analysis units. This may lead to state that GHG dissipation at microscale does not entail any benefit for park visitors, but only at meso and macroscale.

Bio-dissipation. An explanatory model for environmental services in the city on a microscale | Based on the results illustrated in the previous paragraph, we should ask ourselves the following questions: is it possible to envisage a bio-dissipation model in the microscale of the city? How to organize the proposed model? In fact, it is possible to create a bio-dissipation model made of two compo-

Fig. 6, 7 | Detail of the scale in the Bio-dissipation model; Detail of the scope component of the Bio-dissipation model.

Fig. 8 | Bio-dissipation model according to components in a Cartesian system.

Fig. 9 | Lima, Antonio Raimondi Park.



nents: on the one hand, the effect of urban vegetation on climatic variables, on the other, the comfort provided to the citizen by the Net Primary Production rate. In the case of wind speed, the dissipation effect is absent: at ground level this variable, that depends more on the roughness of the soil than its components, produces low and not significant values ($R^2 = 0.27$). Therefore, bio-dissipation should have two different components, one for the climate and the other for the pollution produced by greenhouse gases. In order to validate, statistically, the proposed bio-dissipation model, four working hypotheses were identified, which are set out in Table 3. In general, with the Null Hypothesis is not required to implement design actions, while with the Alternative Hypothesis, on a researcher proposal, an intervention, a change in the current state, is considered necessary.

Analysis of the Results and Conclusions | The 'dissipation' effect that urban vegetation has within the city has two components. On the

one hand, the dissipation scale in which it manifests and that can occur in macro, meso and micro dimensions (Fig. 6). On the other, the field of dissipation, which involves climatic, environmental or comfort conditions (Fig. 7). In the case of the scale component, the dissipation exerted by urban vegetation is subject to environmental benefits such as thermal regulation (macro and microscale), humidity regulation (microscale) and wind speed (macroscale). And if by environmental dissipation, with reference to the GHG concentrations, we mean a property evidenced on the meso and macroscale, the component of the 'dissipation' area, with reference to environmental benefits on climate and comfort, concerns the microscale (although, the environmental dissipation would be more typical of macro and meso-levels).

Any change in the Bio-Dissipation model can be transferred to a Cartesian system (Fig. 8), indicating the percentages of variation in the components of scale or scope in one of the four quadrants: in the first, the variations in both components are positive, in the second

the variations in scale are positive and those in the scope are negative, in the fourth there is a reverse scenario of the second; the third quadrant shows the worst-case scenario, in which both components have negative values.

The structure of the model requires two final considerations. The first deals with the importance of the parameter Net Primary Production of the urban field, which reflects the production of biomass in the area and scale of the city. The second, referred to the environmental benefits of urban vegetation, confirms the results of the experiments in the literature on pollution control (Novak and Macpherson, 1993) on thermal regulation (Gómez, Higuera and Ferrer, 2016), on the control of relative humidity, on water resources (Zavala-Cruz et alii, 2016), on soil stabilization (Bermúdez Rojas et alii, 2016), on health (Cariñanos et alii, 2016) and on well-being of citizens that come across resilience after natural disasters (Platt, Brown and Hughes, 2016).

Acknowledgements

A special thanks to Alexis Dueñas who performed and developed the statistical analysis, also to Daniel Defilippi and Karla Gonzales who collaborated with infographic data, providing opinions, youth and enthusiasm, as well as to the SYNERGIA Environmental Consultants who provided us the sensors to measure the air quality at the monitoring points.

References

Bermúdez Rojas, T., Piedra Castro, L., Alvarado García, V., Castillo Chinchilla, M. and Rodríguez Rodríguez, A. (2016), "Tecnologías para la rehabilitación en una microcuenca urbana", in *Biocenosis*, vol. 30, issue 1-2, pp. 94-99. [Online] Available at: revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/1433 [Accessed 06 August 2018].

Bravo, E. (2013), "La ecología política de la geoingeniería", in *Letras Verdes | Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, n. 14, pp. 354-363. [Online] Available at: revistas.flacsoandes.edu.ec/letrasverdes/article/view/1009/932 [Accessed 12 September 2018].

Cabrero, I., Orihuela, I. and Ziccardi, A. (2003), *Ciudades competitivas-ciudades cooperativas – Conceptos claves y construcción de un índice para ciudades mexicanas*, CIDE, Ciudad de México. [Online] Available at: www.academia.edu/23063510/Ciudades_competitivas_ciudades_cooperativas_Conceptos_claves_y_construccion_de_un_indice_para_ciudades_mexicanas [Accessed 18 September 2018].

Cariñanos, P. et alii (2016), "Salud Ambiental de los parques españoles: Aproximación al potencial alergénico de espacios verdes urbanos", in *Revista de Salud Ambiental*, vol. 16, n. 1, pp. 33-42. [Online] Available at: ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/795 [Accessed 24 May 2019].

El Comercio (2015), *Mayoría de limeños insatisfechos por el déficit de áreas verdes*. [Online] Available at: elcomercio.pe/lima/mayoria-limenos-insatisfechos-deficit-areas-verdes-348284-noticia/ [Accessed 24 September 2019].

Gauzin-Müller, D. (2000), *Arquitectura ecológica*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.

Gómez, N., Higuera, E. and Ferrer, M. (2016), "Análisis de Confort Térmico Social para el Control Sostenible del Microespacio Urbano entre Edificaciones", in *Portafolio*, vol. 2, issue 34, pp. 59-70. [Online] Available at: www.researchgate.net/publication/316828530_Analisis_del_Confort_Termico_Social_para_el_Control_sostenible_del_Microespacio_Urbano_entre_edificaciones [Accessed 31 May 2019].

Gómez Mendoza, J. (2003), "Naturaleza y Ciudad. Diseño urbano con criterios ecológicos, geográficos y sociales", in *El ecologista*, vol. 38, pp. 20-23. [Online] Available at: www.ecologistasenaccion.org/7532/naturaleza-y-ciudad/ [Accessed 6 June 2019].

Grey, G. W. and Deneke, F. J. (1992), *Urban Forestry*, Krieger Pub. Co., Malabar (USA).

IMP – Instituto Metropolitano Panificación and Municipalidad Metropolitana de Lima (2010), *Inventario de Áreas Verdes a nivel metropolitano*. [Online] Available at: www.urbanistasperu.org/imp/inventariodeareasverdes/PDF/Inventario%20de%20Areas%20Verdes%20a%20nivel%20Metropolitano.pdf [Accessed 08 April 2019].

Lima Cómo Vamos (2014), *¿Cómo vemos el ambiente en Lima?* [Online] Available at: www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2014/12/EncuestaAmbiente.pdf [Accessed 24 September 2019].

Meza Aguilar, M. C. and Moncada Maya, J. O. (2010), "Las áreas verdes de la ciudad de México. Un reto actual", in *Scripta Nova Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, vol. 14, n. 331. [Online] Available at: revistas.uib.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/1707 [Accessed 12 October 2018].

MML – Municipalidad Metropolitana de Lima (2012), *Plan de Desarrollo Concertado de Lima (2012-2025)*, Instituto Metropolitano de Planificación. [Online] Available at: www.imp.gob.pe/images/Plan-Desarrollo-Lima-Metropolitana-2012-2025.pdf [Accessed 24 September 2019].

Nowak, D. J. and McPherson, E. G. (1993), "Quantifying the impact of trees: The Chicago Urban Forest Climate Project", in *Unasylva*, vol. 44, n. 173. [Online] Available at: www.fao.org/3/u9300e/u9300e08.htm#quantify

[ing%20the%20impact%20of%20trees:%20the%20chicago%20urban%20forest%20climate%20project](http://www.fao.org/3/u9300e/u9300e08.htm#quantify) [Accessed 20 September 2019].

Otero Pastor, I. (2005), *Paisaje, teledetección y SIG – Conceptos y aplicaciones*, Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.

Platt, S., Brown, D. and Hughes, M. (2016), "Measuring resilience and recovery", in *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 19, pp. 447-460. [Online] Available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420916300309 [Accessed 6 September 2019].

Ravetz, J. (2001), *City-Region 2020. Integrated Planning for a Sustainable Environment*, Earthscan, Londres.

Reyes-Avilés, I. and Gutiérrez-Chaparro, J. J. (2010), "Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la Ciudad de Toluca", in *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, vol. 12, issue 1, pp. 96-102. [Online] Available at: quivera.uaemex.mx/article/view/10222 [Accessed 12 September 2019].

Sahely, H. R., Dudding, S. and Kennedy, C. A. (2003), "Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto Area case study", in *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, issue 2, pp. 468-483. [Online] Available at: www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/102-105#XbsfZEVKicQ [Accessed 18 September 2019].

Sotomayor, M. A. (2003), "Análisis económico de proyectos de mejoramiento urbano", in *En breve*, n. 30, pp. 1-4. [Online] Available at: documentos.bancomundial.org/curated/es/242651468773063030/pdf/284300Spanish0en0breve030.pdf [Accessed 21 September 2019].

Zavala-Cruz, J., Morales-Garduza, M. A., Vargas-Villamil, L. M., Palma-López, D. J. and Ortiz-Solorio, C. A. (2016), "Capacidad de uso del suelo urbano en planicies fluviales costeras: El caso de Villahermosa, Tabasco, México", in *Interciencia*, vol. 41, issue 5, pp. 296-304. [Online] Available at: www.redalyc.org/pdf/339/33945552002.pdf [Accessed 24 September 2019].