

Optimization of equivalent stiffness in one- and two-story structures subjected to green roof loads

Optimización de la rigidez equivalente en estructuras de uno y dos pisos sometidas a cargas de techos verdes

O. Contreras Bejarano¹* <https://orcid.org/0000-0001-7957-1145>

E. J. Ávila Hernández*

L. F. Cepeda*

* Universidad Católica de Colombia, Bogotá, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 21/12/2021

Fecha de Aceptación: 20/06/2022

Fecha de Publicación: 02/04/2023

PAG: 21-31

Abstract

From a linear and static perspective, the increase in displacements of a structure due to the implementation of a green roof could be counteracted by increasing the stiffness of the structure. This article proposes the use of the differential evolution algorithm to optimize the equivalent stiffness of a one- and two-story-high structure by varying the green roof load under the equivalent horizontal force analysis in the Bogotá city. Through the MATLAB software, the optimization algorithm and the matrix analysis method of frame three-dimensional structures subject to compliance with the maximum drift proposed by the Colombian construction regulations are programmed and coupled. A maximum increase in equivalent stiffness of 19.25% and 57.80% (one-story structures), and of 11.12% and 32.97% (two-story structures) for green roof weights of 100 kg/m² and 300 kg/m² respectively, is necessary to meet regulatory requirements. It is expected that this research will serve as a starting point to generate constructive solutions for the implementation of green roofs in one- and two-story structures in the Bogotá city.

Keywords: *Differential evolution algorithm; equivalent horizontal force; green roofs; MATLAB; optimization*

Resumen

Desde una perspectiva lineal y estática, el aumento de los desplazamientos de una estructura debido a la implementación de un techo verde podría ser contrarrestado con el incremento de la rigidez de la estructura. En este artículo se plantea el uso del algoritmo de evolución diferencial para optimizar la rigidez equivalente de una estructura de uno y dos pisos de altura, variando la carga de techo verde bajo el análisis de fuerza horizontal equivalente en la ciudad de Bogotá. A través del software MATLAB se programa y acopla el algoritmo de optimización y la metodología de análisis matricial de estructuras aporticadas tridimensionales sujetas al cumplimiento de la distorsión máxima de piso propuesta por la normativa de construcción colombiana. Un incremento máximo en la rigidez equivalente de 19.25% y 57.80% (estructuras de un piso), y de 11.12% y 32.97% (estructuras de dos pisos) para pesos de techos verdes de 100 kg/m² y 300 kg/m² respectivamente, es necesaria para cumplir requerimientos normativos. Se espera que esta investigación sirva como punto de partida para generar soluciones constructivas a la implementación de techos verdes en estructuras de uno y dos pisos en la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Algoritmo de evolución diferencial; fuerza horizontal equivalente; MATLAB; optimización, techos verdes

¹ **Corresponding author:**

Universidad Católica de Colombia

E-mail: ocontreras25@ucatolica.edu.co

1. Introducción

Actualmente, las debilidades del modelo de vida que ha llevado la humanidad en toda su historia ha logrado ser evidente; los recursos naturales fueron vistos como un insumo para la construcción y desarrollo de las ciudades. El modelo urbano y las comodidades humanas incrementaron su importancia mientras el paisaje natural sufría un proceso de degradación ambiental. El fenómeno de isla de calor en las ciudades, las constantes inundaciones urbanas que sobrellevan las comunidades o el incremento en la contaminación del aire y afluentes hídricos, pueden considerarse como el resultado de un modelo de vida que debe modificarse. La idea de la sostenibilidad se alza frente a una realidad en la que el entorno sufre un proceso de cambio constante, en donde la capacidad de adaptabilidad humana es la base para el inicio de la reconstrucción ambiental. Alternativas sostenibles como los paneles solares, jardines verticales y techos verdes (este último objeto de estudio en esta investigación) pueden contribuir a mitigar la degradación ambiental. Una característica de estas soluciones es que pueden ser implementados a gran escala en la infraestructura urbana de una ciudad; puentes, paraderos de buses y especialmente edificaciones. Por otro lado, la consideración inicial de la mayoría de edificaciones ya existentes no tiene en cuenta la presencia de estas tecnologías eco – amigables. El desafío de la implementación de mecanismos sostenibles a las edificaciones se centra en conservar el buen desempeño de la estructura.

Una investigación realizada en el año 2009 mencionó las primeras premisas del comportamiento de una estructura con una carga de techo verde sometida a fuerzas laterales, en donde se encontró que el incremento de la humedad en la capa del sustrato del techo verde generaba un amortiguamiento extra debido al agua filtrada libre y retenida en capas inferiores (Carmody et al., 2009), con lo que se sugiere el análisis de un techo verde como un amortiguador de líquido sintonizado. Ese mismo año se presenta a los techos verdes como un sistema amortiguador de masa sincronizada, dado que cumple con las características de ubicarse en el nivel más alto de la estructura y poseer una masa considerable. La variabilidad de la masa del sustrato del techo verde se considera como un nuevo factor a considerar en el desempeño del sistema de control de vibración (Matta and De Stefano, 2009), debido a las fluctuaciones en la precipitación de un territorio. Los techos verdes generalmente se dividen en extensivos e intensivos, siendo estos últimos los de mayor peso. En el año 2014 se publicó una investigación en donde se propone un tipo de techo verde productivo y alternativo (techo verde de tipo extensivo), elaborado con botellas plásticas en donde se sembró lechuga. Este techo verde fue implementado en una vivienda prefabricada de un piso de altura con paneles modulares de concreto y tejado en fibrocemento. Con la incorporación de esta carga sobre la estructura, la distorsión de piso aumentó un 62%, así mismo, los esfuerzos máximos incrementaron, sin embargo, esta implementación no representó riesgo para la estabilidad y funcionalidad de la vivienda (Olaya et al., 2014) posiblemente debido a la tipología de techo verde usado. En una investigación realizada en el año 2016 se demuestra que un pórtico en concreto reforzado puede aumentar la distorsión de piso entre un 10% y un 14% con un techo verde intensivo (228.92 kg/m²) respecto a la misma estructura con un techo plano de grava (30 kg/m²), así mismo se recomendó un análisis con la instalación de techos verdes considerando diferentes geometrías y rangos de pesos (Bianchini et al., 2016). En el año 2021 se publica un trabajo en el que se evidencia una disminución en el desempeño estructural de una vivienda aporticada en concreto reforzado con la inclusión de mampostería y un techo verde extensivo. Este estudio reflejó que dicha disminución sufre variaciones en función de la microzonificación del territorio analizado, afectando mayormente a estructuras de 3 niveles ubicadas en áreas que tienden a tener suelos blandos, cabe resaltar que las estructuras tomadas como referencia son de desarrollo progresivo, por lo que no cuentan con un diseño y seguimiento constructivo alineado a la normativa sismo resistente local (Contreras and Nuñez, 2021).

El uso de un techo verde en una estructura incrementa el nivel de incertidumbre en el comportamiento sísmico e integridad estructural de la edificación, debido al incremento de masa en el último piso y a la variación del peso del techo verde como consecuencia de las condiciones climáticas. En esta investigación se estimó el aumento necesario en la rigidez equivalente de estructuras aporticadas de 1 y 2 pisos de altura, para la implementación de diferentes pesos de techos verdes, cumpliendo con criterios normativos de distorsión de piso máxima y periodo fundamental de la estructura en la ciudad de Bogotá. A continuación, se presentan los modelos de los sistemas aporticados y cargas gravitacionales usadas, la recopilación de pesos de techos verdes extensivos e intensivos de la literatura, la demanda sísmica de la ciudad de Bogotá, el tipo de análisis realizado a la estructura y el algoritmo de optimización usado para la determinación de la rigidez equivalente con diferentes pesos de techos verdes. Finalmente, se presentan los resultados y conclusiones de los modelos analizados.

2. Materiales y métodos

2.1 Modelos y cargas

Dos modelos aporticados fueron analizados, de uno y dos pisos de altura. Cada modelo tiene tres vanos de 3m en cada dirección en planta, a su vez, la altura de cada piso es de 3m. la sección transversal de las vigas es cuadrada, por el contrario, la sección transversal de las columnas es rectangular con una dimensión para el lado más largo de 3 veces la dimensión del lado más corto (Figura 1).

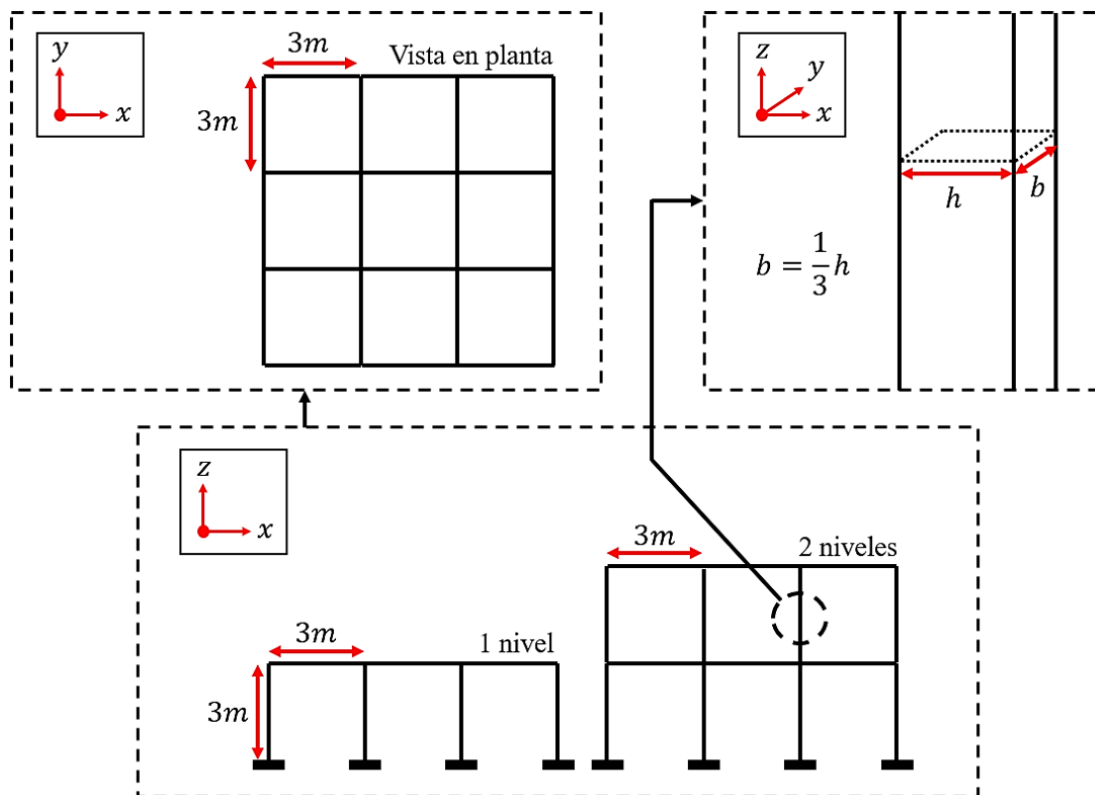


Figura 1. Modelos estructurales. Fuente: propia

Las cargas gravitacionales que se tuvieron en cuenta son carga viva y carga muerta. Considerando un uso residencial de la edificación, se opta por un valor de carga viva de 180 kg/m² y de carga muerta de 140 kg/m². Considerando la incertidumbre de estas cargas, se utiliza un factor de 1.2 y 1.6 para la amplificación de la carga tanto muerta como viva respectivamente (Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes, 2010).

2.2 Cargas de techo verde

Fue realizada una recopilación de pesos de techos verdes reportados en la literatura. Se utilizó la ecuación de búsqueda “Green Roof AND weight” organizando los resultados por relevancia. Se encontró principalmente una referencia al uso de los términos “extensivo”, “semi-intensivo” e “intensivo” para describir un determinado tipo de techo verde (ver Tabla 1). Se evidencian pesos desde 60 kg/m² hasta 970 kg/m², Sin embargo, solo se tendrán en cuenta pesos entre 100 kg/m² y 300 kg/m² resultado del promedio de pesos de los techos verdes extensivos e intensivos encontrados.

Tabla 1. Pesos de techos verdes

Peso de techo verde (kg/m ²)	Descripción	Referencia
Entre 60 y 150	Altura de construcción del sistema (0.06m-0.2m) extensivo.	(Mohapatra et al., 2020) (Besir & Cuce, 2018) (Raji et al., 2015)
Entre 120 y 200	Altura de construcción del sistema (0.12m-0.25m) semi-intensivo.	
Entre 180 y 500	Altura de construcción del sistema (0.15m-0.4m) intensivo	
156	Sistema hidropónico con una altura de almacenamiento de agua de 250mm.	(Xu et al., 2020)
80	Cubiertas verdes extensivas con un sustrato de 20cm, altura de planta de 50cm y sin costo de mantenimiento.	(Korol & Shushunova, 2016)
200	Cubiertas verdes intensivas con un sustrato de 70cm, altura de planta de 2m.	
80	Vegetación de sedum, perennes y arbustos.	
90		
60	vegetación de sedum y hierbas.	
Entre 120 y 225	Extensivo de profundidad (10-15cm) con vegetación de suculentas, hierbas perennes, pastos, plantas ornamentales, plantas perennes y subterráneas.	(Langemeyer et al., 2020)
Entre 150 y 450	Semi intensivo de profundidad (10-30cm) con vegetación hierbas, hierbas aromáticas, bulbos, enredaderas y pequeños arbustos.	
Más de 650	Intensivo de profundidad (10-100cm) con vegetación arriba, con arbustos medianos a grandes, coníferas pequeñas a grandes, palmeras y otros árboles	
Entre 60 y 150	Extensivo con espesor de estratos de cultivo por debajo de 200mm.	(Jin et al., 2018)
Más de 300	Intensivo con espesor de estratos de cultivo por encima de 200mm.	
Entre 50 y 150	Extensivo con un espesor de la capa de sustrato de 6-20cm con una tipología de plantas suculentas, herbáceas y gramíneas.	(Pérez et al., 2020)
Entre 120 y 350	Semi-intensivo con un espesor de la capa de sustrato de 10-25cm con una tipología de plantas herbáceas, pastos y arbustos.	
Más de 350	Intensivo con un espesor de la capa de sustrato de mayor a 25 con una tipología de plantas de hierbas, arbustos y árboles.	
Entre 70 y 120	El techo verde tipo Toundra. El espesor del sustrato es de 8cm y la altura de la vegetación es de unos 10 cm. Los materiales utilizados como capa de drenaje fueron puzolana, grava volcánica porosa.	(Ouldboukhitine et al., 2014)
160	El techo verde tipo Pampa. El espesor de su sustrato es de 15cm y la altura de la vegetación varía de 10 a 35cm.	
100	Suelo de humus como sustrato de plantación y plantas tipo sedum lineare.	(Tang & Zheng, 2019)
Entre 60 y 150	Extensivo con espesor de estratos de cultivo por debajo de 200mm.	(Berardi, 2016)
Más de 300	Intensivo con espesor de estratos de cultivo por encima de 200mm.	
Entre 70 y 170	Extensivo con una profundidad de sustrato entre 5 y 20cm	(Tabares-Velasco & Srebric, 2012)
Entre 290 y 970	Intensivo con una profundidad de sustrato entre 20 y 60cm	
Entre 70 y 170	Extensivo con una profundidad de espesor entre 10 y 15cm	(Jim & Tsang, 2011)
Más de 290	Intensivo con una profundidad de espesor entre 15 y 20cm	
Entre 60 y 150	Extensivo con una altura de construcción del sistema entre 60 y 200mm con un tipo de vegetación de Musgo-sedum-hierbas y pastos.	(Skjeldrum & Kvande, 2017)
Entre 120 y 200	Semi-intensivo con una altura de construcción del sistema entre 120-250mm con un tipo de vegetación de hierbas y arbustos.	
Entre 180 y 500	Intensivo con una altura de construcción del sistema entre 150-400mm con un tipo de vegetación de césped o plantas perennes, arbustos y árboles.	
170	Cuenta con una altura de construcción entre 420-570mm. Las plantas corresponden a las especies Plectranthus neochilus, Kalanchoe thyrsiflora y Sedum reflexum.	(Morau et al., 2012)

ENGLISH VERSION.....

Entre 60 y 150	Extensivo con un espesor de sustrato de cultivo menor de 200mm. Baja diversidad de plantas (musgo, hierbas y pasto)	(Hashemi et al., 2015) (MacIvor et al., 2013)
Más de 300	Intensivo con un espesor de sustrato de cultivo mayor de 200mm. Alta diversidad de plantas (césped o plantas perennes, arbustos y árboles)	
Entre 60 y 240	Extensivos con una profundidad de 6-15cm	(Thuring & Dunnett, 2019)

El protocolo de carga utilizado consta de 5 diferentes pesos de techo verde (100 kg/m², 150 kg/m², 200 kg/m², 250 kg/m² y 300 kg/m²), los resultados obtenidos en estos casos son comparados con la estructura sin techo verde.

2.3 Espectros de diseño y análisis lineal

La (

Figura 2) presenta la demanda sísmica de la ciudad de Bogotá, en donde es evidente que la zona oriental y suroriental presenta suelos duros y las áreas occidentales y noroccidentales están conformadas por suelos con tendencia a ser blandos.

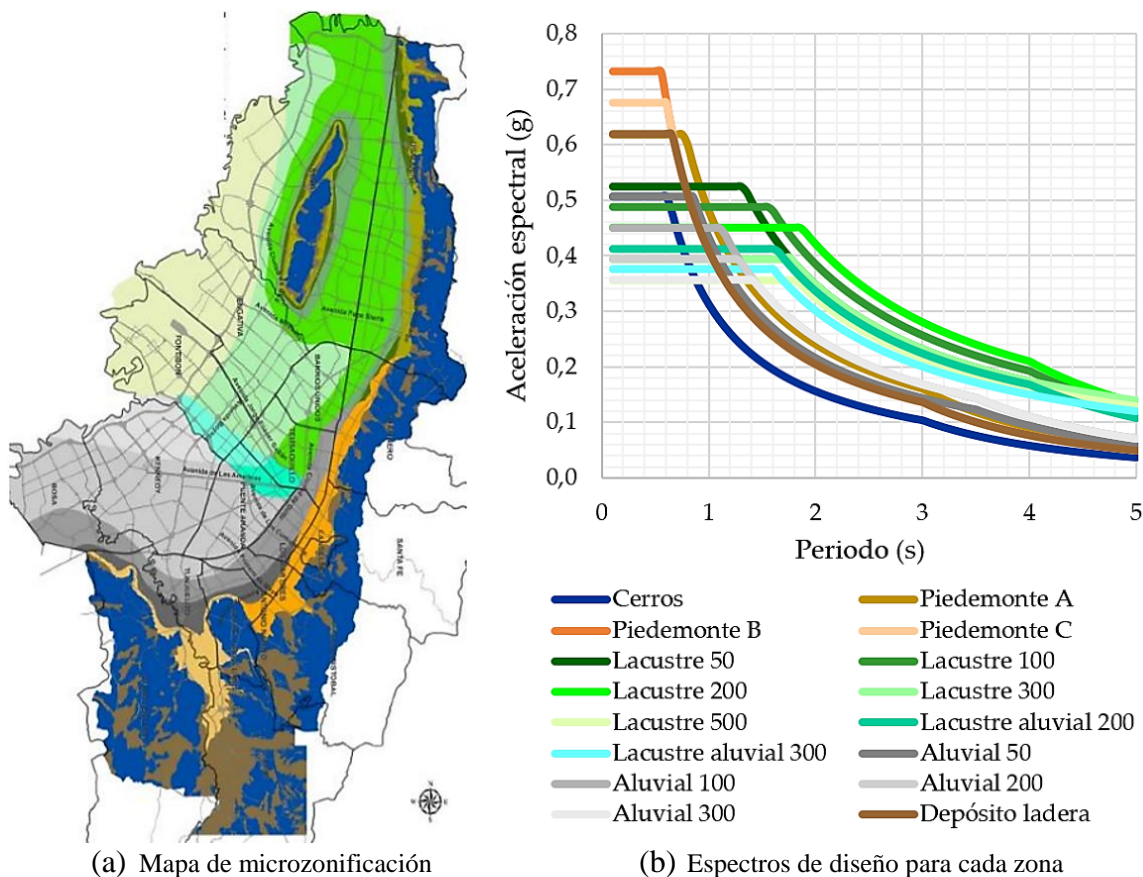


Figura 2. Espectros de diseño para la ciudad de Bogotá. Fuente: (Alcaldía de Bogotá, 2010)

Con el fin de calcular la respuesta en desplazamientos de los modelos propuesto se utiliza la metodología de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) para cada una de las zonas de la microzonificación sísmica de Bogotá, y el método matricial para pórticos tridimensionales. Se tienen en cuenta los coeficientes y el espectro de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico presentes en el documento por el cual se adopta la microzonificación sísmica de Bogotá D.C (Alcaldía de Bogotá, 2010). Dado que las estructuras analizadas son tridimensionales se opta por considerar la FHE como distribuida en todos los nodos de cada piso teniendo en cuenta la masa aferente de cada nodo respecto a la masa del piso correspondiente. (Ecuación 1).

ENGLISH VERSION.....

$$FHE_j^i = FHE^i \left(\frac{M_j^i}{M^i} \right) \quad (1)$$

En donde:

FHE_j^i = Fuerza horizontal equivalente en el nodo j del piso i

FHE^i = Fuerza horizontal equivalente del piso i

M_j^i = Masa en el nodo j del piso i

M^i = Masa del piso i

Por otro lado, la rigidez equivalente es calculada a partir de la (Ecuación 2):

$$\frac{1}{k_{equ}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (2)$$

En donde:

k_{equ} = rigidez equivalente de la estructura

n = número de pisos de la estructura

k_i = rigidez del piso i

La rigidez del piso es calculada como la fuerza horizontal equivalente sobre el desplazamiento del piso.

- Algoritmo de Evolución Diferencial (DEA) acoplado

El proceso de optimización se realizó a través del algoritmo de evolución diferencial, el cual está condicionado por el cumplimiento de la distorsión de piso máxima permitida y el periodo fundamental, variando la rigidez de la estructura (cambio en la sección transversal de las columnas) y conservando una misma sección transversal de las columnas de un mismo piso.

La Figura 3 presenta el proceso que sigue el algoritmo para el cálculo de la rigidez equivalente necesaria para que una estructura pueda implementar un techo verde garantizando el cumplimiento de la distorsión de piso máxima y el periodo fundamental.

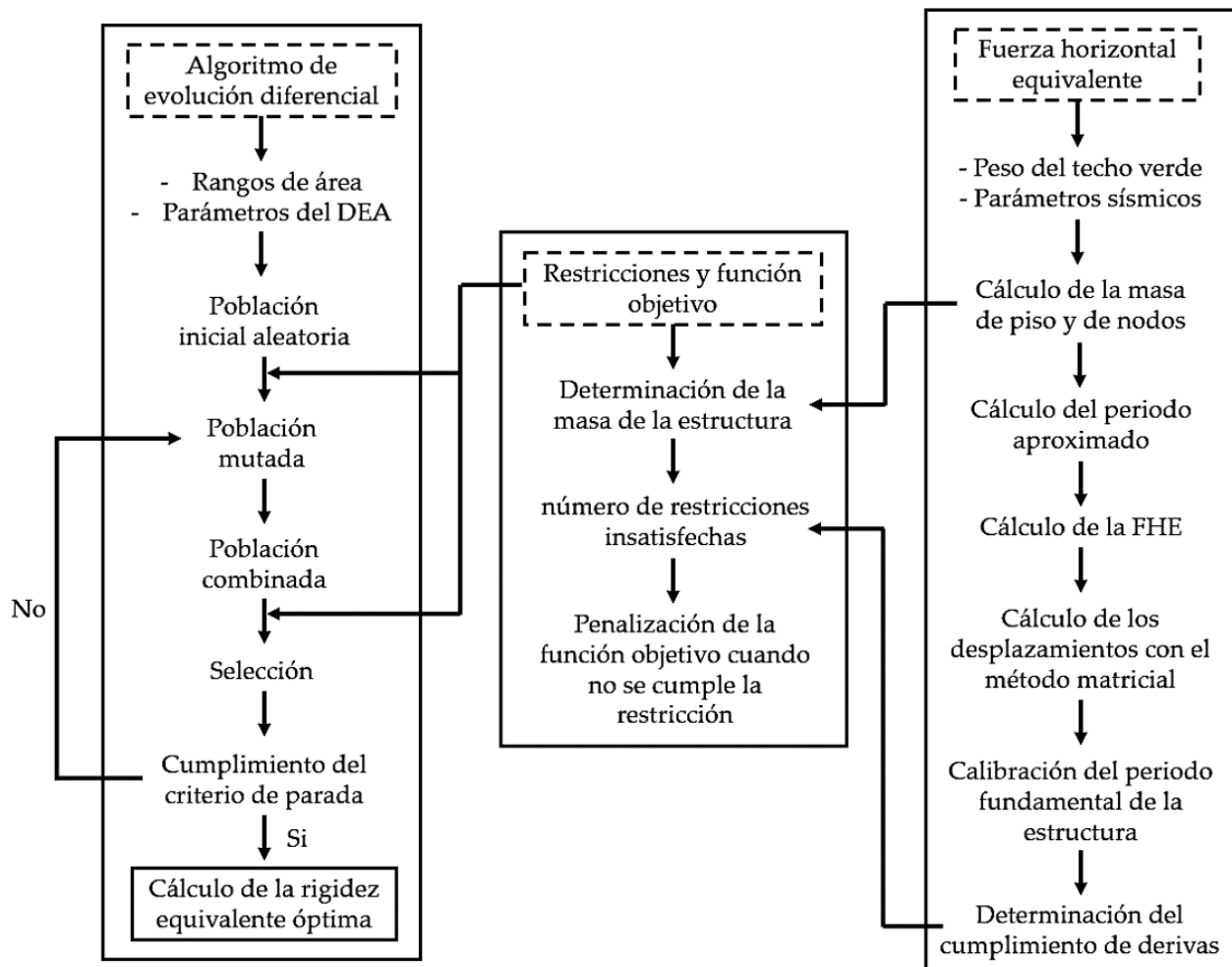


Figura 3. Flujograma para el algoritmo de evolución diferencial. Fuente: propia

ENGLISH VERSION.....

Se restringió el área de la sección transversal tanto de vigas como de columnas a un valor mínimo de 0.05 m² y un valor máximo de 3.0 m² (rangos de área). Cabe resaltar que las columnas conservan la relación mostrada en la Figura 1. La restricción implementada es la de la distorsión de piso máxima, en la que la diferencia de los desplazamientos de pisos contiguos debe ser igual o menor al 1% de la altura entre pisos (Ecuación 3).

$$\begin{aligned}\Delta_i &= \delta_{i+1} - \delta_i \\ \Delta_{Max} &= 1\%h \\ \Delta_{Max} - \Delta_i &> 0\end{aligned}\quad (3)$$

En donde:

δ_i = desplazamiento horizontal del piso i

Δ_i = distorsión del piso i

h = altura entre pisos contiguos

Δ_{Max} = distorsión de piso máxima

Se utilizó la ecuación de penalización lineal y un factor de mutación FA de 0.5 para la (Ecuación 4):

$$v_i = x_{best} + FA(r_1 - r_2) + FA(r_3 - r_4) \quad (4)$$

En donde:

v_i = vector de mutación

x_{best} = mejor individuo de la población inicial

r_1, r_2, r_3, r_4 = individuos aleatorios de la población inicial

Se utilizó un factor de recombinación CR de 0.8 para la (Ecuación 5):

$$u_i = \begin{cases} v_i, si, rand(0,1) < CR \text{ ó } j = j_{rand} \\ x_i, de otra forma \end{cases} \quad (5)$$

En donde:

v_i = vector de recombinación

$rand(0,1)$ = valor aleatorio con distribución uniforme entre 0 y 1

j = posición de la dimensión analizada

j_{rand} = número entero aleatorio entre 1 y el número de dimensiones

Finalmente, se realiza el proceso de selección en donde se elige el mejor individuo entre la población inicial y la población combinada, el cual corresponde a la población inicial de la siguiente generación. El algoritmo tiene un criterio de parada definido en función al número de iteraciones.

3. Resultados y discusión

Es evidente que, al aumentar la masa en el último piso de una estructura, los desplazamientos se verán incrementados bajo una consideración estática y lineal. Estos desplazamientos dependen de la rigidez de la estructura y de la magnitud de la fuerza horizontal calculada, la cual, a su vez depende de las características de área de la microzonificación sísmica analizada. Dado que en este artículo se parte de un proceso de optimización, el algoritmo siempre encuentra una rigidez mínima para cualquier tipo de zonificación. La (Figura 4) muestra el incremento de la rigidez equivalente en las 16 zonas de la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá para 5 pesos diferentes de techos verdes.

Las gráficas evidencian que independientemente de la zona, la rigidez conserva una tendencia de incremento similar. El aumento de la rigidez en las gráficas fue normalizado con base en la magnitud más grande. Más adelante se realiza un análisis probabilista del incremento en la rigidez de las estructuras.

En términos de un análisis lineal, la estructura de un piso requiere aumentar la rigidez equivalente en las columnas del primer nivel, por el contrario, la estructura de dos pisos tiene la libertad de distribuir el incremento de la rigidez equivalente en las columnas tanto del primer como el segundo nivel. Esta es la razón por la cual se nota una cierta reducción en el incremento de la rigidez equivalente para la estructura de dos pisos.

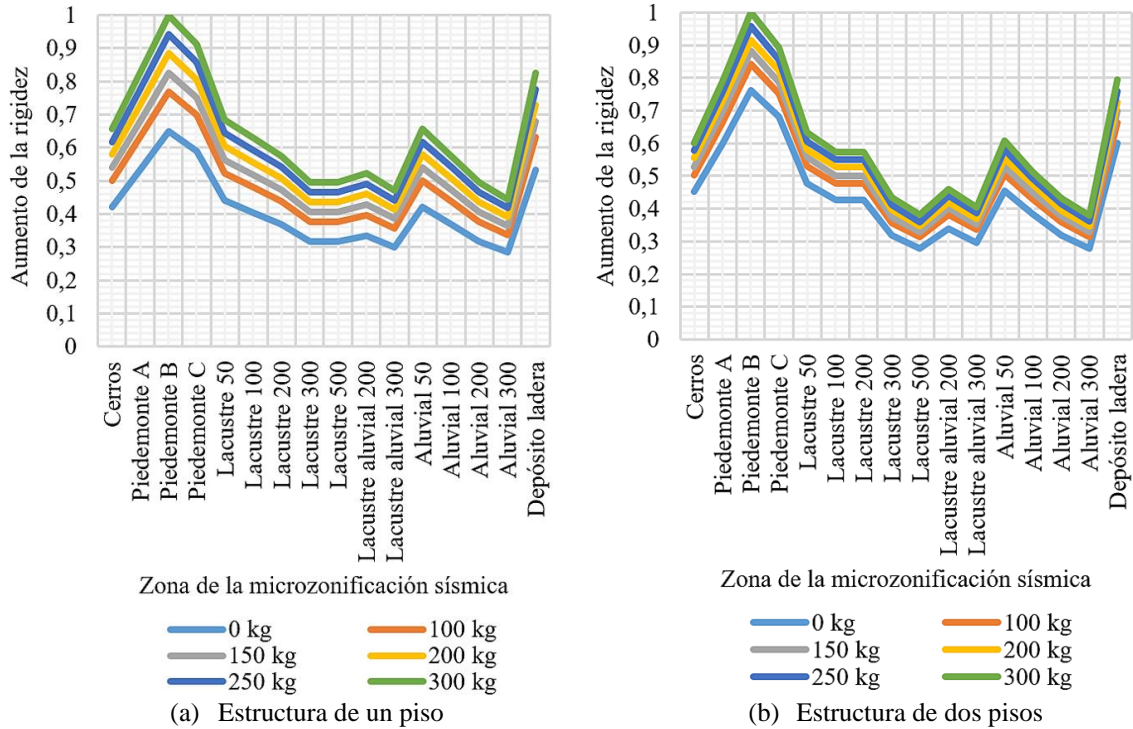
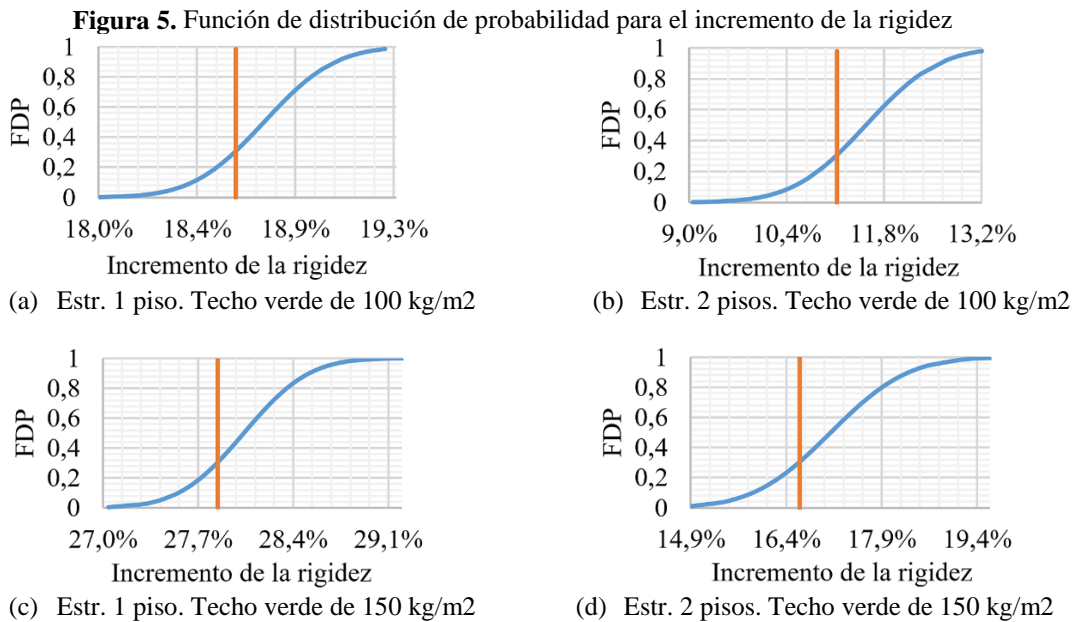
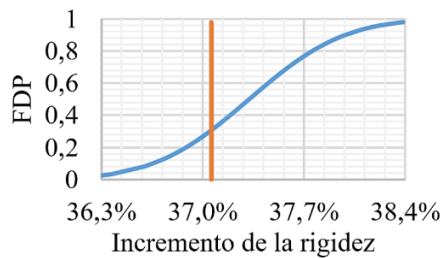


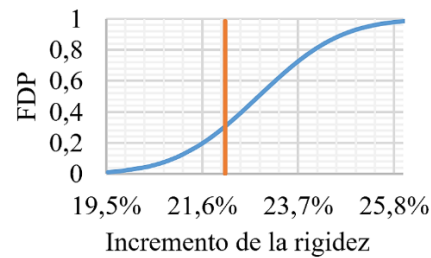
Figura 4. Tendencia del incremento de la rigidez equivalente. Fuente: propia

Las zonas; lacustre 300, lacustre 500, lacustre aluvial 200, lacustre aluvial 300, aluvial 200 y aluvial 300 son las áreas de la microzonificación sísmica preferible para la implementación de techos verdes, dado que las características del suelo en dichas zonas generan el menor incremento en las fuerzas horizontales aplicadas a una estructura, y por tal motivo el aumento de la rigidez equivalente es menor que en el resto de zonas de la ciudad de Bogotá. La Figura 5 presenta las funciones de distribución de probabilidad acumuladas, en donde la línea recta roja representa el intervalo de confianza inferior del incremento porcentual de la rigidez equivalente para estructuras tanto de un piso como de dos pisos.

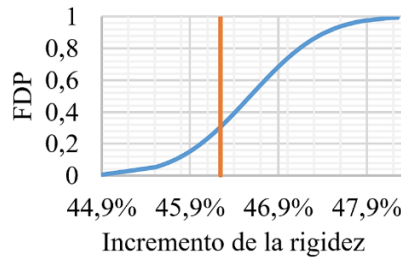




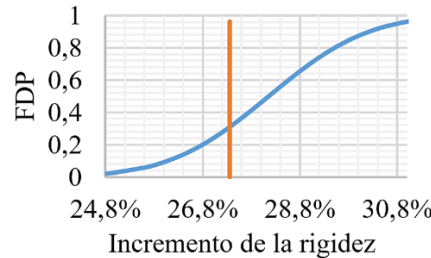
(e) Estr. 1 piso. Techo verde de 200 kg/m²



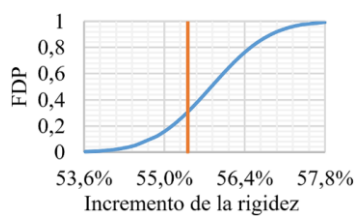
(f) Estr. 2 pisos. Techo verde de 200 kg/m²



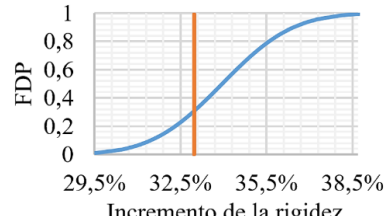
(g) Estr. 1 piso. Techo verde de 250 kg/m²



(h) Estr. 2 pisos. Techo verde de 250 kg/m²



(i) Estr. 1 piso. Techo verde de 300 kg/m²



(j) Estr. 2 pisos. Techo verde de 300 kg/m²

Fuente: propia

La implementación de un techo verde en una estructura depende de la capacidad de espacio que posea la misma para incrementar la sección transversal de las columnas y aumentar su rigidez. Las funciones de distribución de la figura anterior permiten evidenciar que, para la ciudad de Bogotá, con una probabilidad del 95% de certeza, el incremento necesario que debe tener una estructura de un piso para implementar un techo verde de 100 kg/m² es de 19.3% con un intervalo de confianza entre 18.6% y 19.9%, así mismo, para un peso de 300 kg/m² el incremento es de 57.8% con un intervalo de confianza entre 55.4% y 60.2%. Por otro lado, para una estructura de 2 pisos el incremento con un techo verde de 100 kg/m² es de 13.2% con un intervalo de confianza entre 11.1% y 15.3%, así mismo, para un peso de 300 kg/m² el incremento es de 38.7% con un intervalo de confianza entre 33% y 44.5%.

4. Conclusiones

El incremento medio de la rigidez equivalente en la estructura de un piso es de 19.251%, 29.203%, 38.383% 48.252% y 57.799%, para la estructura de dos pisos es de 13.204%, 19.618%, 26.024% 31.029% y 38.726% para techos verdes de 100 kg/m², 150 kg/m², 200 kg/m², 250 kg/m² y 300 kg/m² respectivamente, con el fin de cumplir requerimientos de distorsión de piso máximo y periodo fundamental de la estructura al implementar un techo verde.

El aumento porcentual más grande corresponde al de la estructura de un piso con un peso de techo verde de 300 kg/m², para este caso específico, la sección transversal de todas las columnas debe sufrir un alargamiento en el eje fuerte de 10 cm, porcentajes menores infieren a su vez en un alargamiento menor a 10 cm, siempre y cuando se siga conservando la forma rectangular de las columnas definida en este artículo. La modificación de las secciones transversales de las columnas radica en el suficiente espacio para alterar el diseño arquitectónico de la edificación. Así mismo, los resultados de esta investigación se basan en estructuras que de antemano cumplen con los requerimientos normativos.

La rigidez equivalente de una estructura no solamente puede ser modificada con el aumento de la sección transversal de las columnas, sino también con elementos como riostras de pandeo restringido o mecanismos similares, con el fin de alcanzar el incremento objetivo. Es recomendable continuar esta investigación con el proceso de optimización bajo una consideración de

ENGLISH VERSION

análisis no lineal y cargas dinámicas. Adicionalmente, es necesario investigar la influencia de otras secciones transversales de columnas; por ejemplo, secciones cuadradas o circulares para ampliar el rango de aplicabilidad de estos resultados.

5. Referencias

- Alcaldia de Bogotá. (2010).** Decreto 523 de 2010 Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C. (pp. 1–21). www.journal.uta45jakarta.ac.id
- Berardi, U. (2016).** The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
- Besir, A. B.; Cuce, E. (2018).** Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2017), 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Bianchini, F.; Rafiqul Haque, A. B. M.; Hewage, K.; Alam, M. S. (2016).** Influence of green roofs on the seismic response of frame structures. *Earthquake and Structures*, 11(2), 265–280. <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.2.265>
- Carmody, M. O.; Jasarevic, M.; Omenzetter, P.; Clifton, G. C.; Fassman, E. A. (2009).** Seismic response of green roofs. NZSEE Conference, 1–9. <https://doi.org/10.13140/2.1.2525.8564>
- Comisión asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistentes. (2010).** Reglamento colombiano de construcción sismoresistente. NSR-10. Título B-cargas (pp. 1–88). http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_B.pdf
- Contreras, O.; Nuñez, F. (2021).** Influence of an extensive green roof in the non-linear structural behavior of self – construction households. *Revista Ingenieria de Construccion*, 36(2), 157–172. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732021000200157>
- Hashemi, S. S. G.; Mahmud, H. Bin; Ashraf, M. A. (2015).** Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.163>
- Jim, C. Y.; Tsang, S. W. (2011).** Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46(6), 1263–1274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.013>
- Jin, C.; Bai, X.; Luo, T.; Zou, M. (2018).** Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 29(December 2017), 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.002>
- Korol, E.; Shushunova, N. (2016).** Benefits of a Modular Green Roof Technology. *Procedia Engineering*, 161, 1820–1826. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.673>
- Langemeyer, J.; Wedgwood, D.; McPhearson, T.; Baró, F.; Madsen, A. L.; Barton, D. N. (2020).** Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Science of the Total Environment*, 707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135487>
- MacIvor, J. S.; Margolis, L.; Puncher, C. L.; Carver Matthews, B. J. (2013).** Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs. *Journal of Environmental Management*, 130, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.014>
- Matta, E.; De Stefano, A. (2009).** Seismic performance of pendulum and translational roof-garden TMDs. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 908–921. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.07.007>
- Mohapatra, S.; Verma, S.; Chowdhury, S.; Dwivedi, G.; Harish, V. S. K. V. (2020).** A critical appraisal of green vegetated roofs: Energy and environment in focus. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5703–5710. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.843>
- Morau, D.; Libelle, T.; Garde, F. (2012).** Performance evaluation of green roof for thermal protection of buildings in reunion Island. *Energy Procedia*, 14(262), 1008–1016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1047>
- Olaya, L.; Rubio, D.; Ruiz, D.; Torres, A. (2014).** Evaluación del comportamiento sísmico de viviendas de estratos marginales con cubiertas verdes: estudio de caso del municipio de Soacha, Colombia. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1), 98–114. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732014000100007>
- Ouldboukhitine, S. E.; Belarbi, R.; Sailor, D. J. (2014).** Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, 114, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.073>
- Pérez, G.; Chocarro, C.; Juárez, A.; Coma, J. (2020).** Evaluation of the development of five Sedum species on extensive green roofs in a continental Mediterranean climate. *Urban Forestry and Urban Greening*, 48(February 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126566>
- Raji, B.; Tenpierik, M. J.; Van Den Dobbelen, A. (2015).** The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610–623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>

ENGLISH VERSION.....

- Skjeldrum, P. M.; Kvande, T. (2017).** ScienceDirect ScienceDirect Moisture-resilient upgrading to blue-green roofs using the heat temperature function for a long-term heat demand forecast. *Energy Procedia*, 132, 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.649>
- Tabares-Velasco, P. C.; Srebric, J. (2012).** A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment*, 49(1), 310–323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.019>
- Tang, M.; Zheng, X. (2019).** Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days. *Applied Energy*, 242(June 2018), 1010–1021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.153>
- Thuring, C. E.; Dunnett, N. P. (2019).** Persistence, loss and gain: Characterising mature green roof vegetation by functional composition. *Landscape and Urban Planning*, 185(February), 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.026>
- Xu, L.; Yang, S.; Zhang, Y.; Jin, Z.; Huang, X.; Bei, K.; Zhao, M.; Kong, H.; Zheng, X. (2020).** A hydroponic green roof system for rainwater collection and greywater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121132>