

DIGITAL CIENCIA@UAQRO

Universidad Autónoma de Querétaro
Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO

DIRECTORIO

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano
Rectora
Dr. José Guadalupe Gómez Soto
Secretario Académico
Dr. Manuel Toledano Ayala
Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado
Mtra. Diana Rodríguez Sánchez
Directora del Fondo Editorial Universitario

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes
Editora en jefe
Lic. Juliana Romero Rodríguez
Coordinadora editorial
Dra. Magdalena Mendoza Sánchez
Asistente editorial

Ciencias Físico Matemáticas
Dra. Janet Ledesma García
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ciencias de la Conducta y Educación
Dr. Martín Mora Martínez
Universidad de Guadalajara, México
Dra. Graciela Cordero Arroyo
Universidad Autónoma de Baja California, México
Dra. Addy Rodríguez Betanzo
Universidad Autónoma de Quintana Roo, México

Ciencias Políticas y Sociales
Dra. Adriana Reynaga Morales
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dra. Virginia Guadalupe Reyes de la Cruz
Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México

Ciencias Químico Biológicas
Dr. Fernando Chiang Cabrera
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dr. Juan Campos Guillén
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dra. Rosalía Reynoso Camacho
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ciencias Jurídicas
Dr. Juan Ricardo Jiménez Gómez
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ciencias de la Salud
Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dr. Elhadi Yahia Kazuz
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ingenierías y Desarrollo Tecnológico
Dr. José Luis Rivera Armenta
Tecnológico Nacional de México, México

Agropecuarias
Dra. Tercia C. Reis de Souza
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dra. Rosalía Ocampo Velázquez
Universidad Autónoma de Querétaro, México

COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL

Dra. Paula Ascorra Costa
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile
Dr. Domingo Mayor Paredes
Universidad de Murcia, España
Dra. Xus Martín
Universidad de Barcelona, España
Dr. Hugo Becker
Universidad Libre, Colombia

EQUIPO TÉCNICO EDITORIAL

Lic. Karla Gisella Cordero Jiménez
Correctora de estilo
Lic. Alejandro Zamorano Gómez
Diseñador editorial
Lic. Regina Paredes Olaya
Maquetadora editorial
Dasha Semenhina
Fotografía de portada



La revista se financió con recursos de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las opiniones expresadas por las personas autoras no necesariamente reflejan la postura de la editora de la revista. El contenido e imágenes de esta publicación se publicó bajo la licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Digital Ciencia@UAQRO, Vol. 19, No. 2, julio-diciembre 2026, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, a través de la Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro., Tel. (442) 1921200 Ext. 3244, <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia>, ciencia@uaq.mx Editora responsable: Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121612431800-102, ISSN: 2395-8847, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado, Juliana Romero Rodríguez, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro. Fecha de última modificación: 27 de julio del 2026.

ÍNDICE

5 Presentación editorial

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Sección:
Miscelánea

8 Investigación participativa para la salvaguarda del patrimonio intangible en el semidesierto queretano

Participatory research for the protection of intangible cultural heritage in the semi-desert region of Queretaro

Luz del Carmen Morales Montes de Oca

David Alejandro Vázquez Estrada

Paulina Macías Núñez

26 Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur como mediación para proponer una ecosofía educativa alternativa

Epistemic Matrix for an Eco-education from the South as a mediation for an alternative educational ecosophy

José Luis Mora Fausto

45 Fundamentos moleculares para el uso de RNAi vía SIGS en el control de *Fusarium*

Molecular foundations for the use of RNAi via SIGS in the control of Fusarium

Lizbeth Jazmín Moreno Alegría

Jorge Adrián Cirilo Reyes

Estefania Arellano Ordoñez

Fernando Olvera Martínez

Ileri Alejandra Carbajal Valenzuela

Christopher Alexis Cedillo Jiménez

- 70 **Energía undimotriz: revisión
del desarrollo de absorbedores
puntuales y su madurez tecnológica**
*Wave energy: a review of point
absorber development and associated TRLs*

Claudia Belén Álvarez Sánchez

María Guadalupe Navarro Rojero

Julio César Sánchez Jiménez

- 94 **Evaluación de la vulnerabilidad sísmica
en conjuntos habitacionales
del movimiento moderno en Sevilla**
*Seismic vulnerability assessment
of modernist housing complexes in Seville*

Perla Rafael Santa Ana Lozada

María Victoria Requena García de la Cruz

Antonio Morales Esteban

Apreciados lectores, es un gusto para nosotros presentar el número 2 del volumen 19 de la revista *Digital Ciencia@UAQRO*, un espacio para la divulgación científica en nuestra Universidad. El mundo actual enfrenta retos que requieren respuestas de múltiples fronteras del conocimiento. Por ello, en esta edición ofrecemos una cuidadosa selección de cinco investigaciones de diversas disciplinas que comparten el compromiso de beneficiar a la sociedad, la cultura y el ambiente.

Comenzamos con la propuesta de “Investigación participativa para la salvaguarda del patrimonio intangible en el semidesierto queretano”. Este trabajo expone las acciones que permitieron dar voz a las comunidades y generar vínculos con las instituciones gubernamentales en los municipios de Ezequiel Montes, Cadereyta de Montes, Colón y Tolimán, en busca de promover la defensa ética e instrumental del Patrimonio Cultural Intangible.

En el campo del pensamiento y la formación humana, “Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur como mediación para proponer una ecosofía educativa alternativa” propone un nuevo marco desde el cual se pueda repensar nuestra relación con los entornos. En este sentido, la epistemología del Sur Global impulsa una ecoeducación que incorpore la descolonialidad, la recuperación de los saberes ancestrales y el entendimiento de la naturaleza como sujeto.

Dentro de las ciencias biológicas y la seguridad agroalimentaria, encontramos “Fundamentos moleculares para el uso de RNAi vía SIGS en el control de *Fusarium*”, que aborda un desafío fitosanitario global explorando el uso del RNA interferente (RNAi) por aspersión. Se destaca esta alternativa biotecnológica por su alta especificidad y bajo impacto ambiental frente a los fungicidas convencionales, y se propone integrar criterios de diseño molecular con el conocimiento ecológico del patógeno para lograr su control sostenible.

Continuamos con una mirada desde la tecnología hacia el futuro de la sustentabilidad con “Energía undimotriz: revisión del desarrollo de absorbedores puntuales y su madurez tecnológica”, donde se presenta una evaluación técnica de cinco convertidores de la energía de las olas del mar. Con este análisis comparativo se consiguió estandarizar soluciones y aportar

información en favor de la diversificación de la matriz energética global a través de la generación de energías renovables.

Culminamos con “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en conjuntos habitacionales del movimiento moderno en Sevilla”, en el que se analiza el riesgo que corren edificaciones emblemáticas de Sevilla, España, construidas previo a la publicación de la normativa sísmica española. Los hallazgos apuntan que su susceptibilidad deriva de la solución arquitectónica orgánica y el asentamiento sobre suelos blandos. Las conclusiones destacan por su aplicabilidad en otras zonas sísmicas con condiciones de suelo similares, como las de Ciudad de México.

Esperamos que las páginas de este número impulsen nuevas ideas, debates y proyectos en favor de nuestra sociedad y planeta.

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes 

Editora en Jefe

SECCIÓN:
MISCELÁNEA

Investigación participativa para la salvaguardia del patrimonio intangible en el semidesierto queretano

*Participatory research for the protection
of intangible cultural heritage
in the semi-desert region of Queretaro*

Luz del Carmen Morales Montes de Oca* 

David Alejandro Vázquez Estrada 

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

Paulina Macías Núñez 

Instituto Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México, México

*lucero8mmo@yahoo.com.mx

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2008

Fecha de recepción: 21 de agosto del 2025

Fecha de aceptación: 2 de marzo del 2026

Resumen

El presente artículo describe las acciones de una investigación participativa realizada en 2019 en una poligonal del semidesierto queretano inscrita como patrimonio cultural intangible (PCI) por la UNESCO. El objetivo es proponer el enfoque participativo como un modo pertinente de investigar los procesos que conciernen a la comunidad, las y los portadores del patrimonio, con el fin de diseñar acciones para salvaguardarlo ante las transformaciones fruto de las políticas de desarrollo implementadas tras el nombramiento como PCI. Se incorporaron instrumentos de métodos cualitativos (estudios de casos etnográficos), cuantitativos (encuestas) y participativos (reuniones y foros comunitarios). Se procuró que las herramientas y técnicas respondieran al cuidado de la autonomía, el respeto y la rendición de cuentas a quienes portan la cultura. Asimismo, bajo una dimensión ética-política, se propuso dar voz a las comunidades e impulsarlas a reflexionar y tener agencia en los escenarios que les atañen, a la par de involucrar y brindar información local a las instituciones encargadas de construir políticas públicas.



Palabras clave: investigación participativa, patrimonio cultural intangible, Plan de Salvaguardia, políticas públicas, portadores de la cultura

Abstract

This article describes the participatory research actions carried out in 2019 in a polygonal area of Queretaro's semi-desert inscribed as intangible cultural heritage (ICH) by UNESCO. It aims to recommend the participatory approach as a well-fitted method to do research on the processes that concern the community and heritage bearers; the goal is to design protective actions in the face of transformations brought about by development policies implemented after the ICH inscription. The study incorporates instruments from qualitative (ethnographic case studies), quantitative (surveys) and participatory (workshops, meetings, and community forums) methods. Efforts were made to ensure that these tools and techniques upheld the autonomy, respect for and accountability of culture bearers. Likewise, an ethical-political dimension focused on giving voice to the communities and encouraging them to reflect and participate in the circumstances that concern them, as well as involving the institutions that create public policies and providing them with local data.

Keywords: culture bearers, intangible cultural heritage, participatory research, public policies, safeguarding plan

Introducción

En 2009, la UNESCO (2010) reconoció la región del semidesierto queretano como patrimonio cultural inmaterial (PCI), con el compromiso de “proteger este patrimonio y respaldar a sus habitantes en todos sus esfuerzos por defender su cultura, mantener su lengua y organizarse para vivir mejor, aprovechando sus recursos y territorio” (p. 14). Pese a ello, a quince años de dicha inscripción, en lugares como Bernal observamos el crecimiento del turismo, el cambio del uso de suelo y la llegada de una inversión privada que especula y modifica los entornos culturales de acuerdo con las demandas del mercado. Esta situación impacta directamente a las y los habitantes históricos, quienes pugnan por conservar la ritualidad, la cultura y los espacios sagrados, frente a los gobiernos municipales y estatales, que usualmente privilegian la economía sobre la cultura.

Entendemos que el manejo del patrimonio vive en constante tensión debido a la enorme cantidad de actores, intereses y modos de significar lo propio. De tal manera, encontramos que

en el estado del arte, por un lado, se elogian los efectos positivos de la inscripción de expresiones en la lista de la UNESCO (Ballart, 1997; Bojalil Parra, 2002; Escalante Betancourt, 2011; Fernández Piñar y Rivas, 2024; Mancera-Valencia *et al.*, 2020; Mendoza Mejía, 2014; Solorio, 2012; Toledo y Barrera-Bassols, 2008; Vázquez Estrada, 2005), mientras que, por otro lado, se consideran las afectaciones e irregularidades que ocurren a escala local (Escalante Betancourt, 2011; Machuca R., 1998; Massó Guijarro, 2006; Morales Montes de Oca, 2023; Olivera, 2011; Rodríguez Basulto y Weissel, 2022; Santamarina Campos, 2013; Vázquez Estrada y Morales Montes de Oca, 2022; Villaseñor Alonso y Zolla Márquez, 2012).

En resumen, este debate científico pone sobre la mesa la contradicción entre la protección de los lugares de relevancia cultural y la especulación económica que se deriva de ella. Si bien la UNESCO tiene la intención de preservar estos sitios, las políticas de desarrollo económico, a partir de la promoción masiva para el turismo, producen transformaciones que afectan los usos locales tradicionales. En respuesta, la población originaria encuentra en la defensa de la memoria y la identidad un medio potente para defender el patrimonio.

Antecedentes

México inicia el recorrido de la inscripción ante la UNESCO de diversos elementos, como centros históricos, sitios arqueológicos, expresiones naturales y elementos relacionados con la cultura viva de la nación. La primera ocurre en 1987, con la inclusión del centro histórico de la Ciudad de México y Xochimilco (como bienes culturales), seguidos de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an en el estado de Quintana Roo, los centros históricos de Puebla y Oaxaca, y las ciudades prehispánicas de Palenque y Teotihuacán. Desde entonces, un sin fin de lugares fueron reconocidos por este organismo internacional (UNESCO, 2026).

Entre 2008 y 2011 quedaron inscritas las siguientes expresiones como PCI: *Las fiestas indígenas dedicadas a los muertos* (2008), *Lugares de memoria y tradiciones vivas de los otomí-chichimecas de Tlaximán: la Peña de Bernal, guardiana de un territorio sagrado* (2009), *La ceremonia ritual de los Voladores* (2009), *La pirekua, canto tradicional de los p'urhépechas* (2010), *Los parachicos en la fiesta tradicional de enero de Chiapa de Corzo* (2010), *La cocina tradicional mexicana: una cultura comunitaria, ancestral y viva y el paradigma de Michoacán* (2010) y *El Mariachi, música de cuerdas, canto y trompeta* (2011).

Según Morales Montes de Oca (2023), hay una relación directa entre estos reconocimientos y las políticas liberales

asociadas a la privatización de la tierra, el agua y el subsuelo, que hacen un juego complementario para inscribir al país en el mercado global. En otras palabras, no es azaroso que la UNESCO reconociera expresiones asentadas en territorios de interés comercial, ya sea para el turismo, la industria o la minería, puesto que esta acción puede dar lugar a dos procesos: la desarticulación de los elementos culturales al comercializarse y, con ello, la posibilidad de cambiar el proyecto en el territorio. De tal forma, este movimiento vinculado con la salvaguardia genera una demanda estatal y municipal que incentiva el surgimiento de políticas públicas, nuevos nombramientos y acciones locales que modifican los espacios patrimonializados.

Solorio (2012), quien ha realizado un recuento de las festividades locales y su transformación a lo largo de los años, así como de los reconocimientos obtenidos por el pueblo de Bernal, señala la forma en que el cambio en las políticas públicas del Estado afecta el escenario cultural. Asimismo, Morales Montes de Oca (2023), a partir de una detallada revisión documental, da cuenta del despojo que ha vivido la comunidad indígena de la región tras recibir distinciones como el nombramiento de Pueblo Mágico, la inscripción en la UNESCO y la declaración como Área Natural Protegida (ANP).

Desde la dimensión de las políticas públicas, el presupuesto dirigido a la cultura, lejos de priorizarse en los objetivos del Estado, ha disminuido en sus últimos periodos. Así lo indica Cruz Blanco (2024): “La Secretaría de Cultura operará con los mismos recursos estatales que en 2023, 197 millones de pesos, y enfrentará una reducción de 8 millones de pesos de origen federal, según informó la titular de la dependencia, Ana Paola López Birlain” (s.p.).

Ante este escenario, resulta pertinente proponer una metodología participativa vinculada con las declaratorias PCI-UNESCO que logre impactar en la realización de políticas públicas, la teorización sostenida sobre gobernanza del patrimonio, la reflexión metodológica, los procesos de devolución de información y, sobre todo, el desarrollo de acciones favorables para las y los portadores del patrimonio.

La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en particular el área de antropología, cuenta con una experiencia desarrollada a lo largo de los años que le ha permitido crear, sostener y acompañar procesos de investigación y formación de recursos humanos. En extensión, también se ha convertido en mediadora para el establecimiento de espacios intermunicipales e interinstitucionales donde se debaten y organizan diversos trabajos en materia de la salvaguardia del PCI.

En 2019, a diez años de que se inscribiera en la UNESCO la expresión *Lugares de memoria y tradiciones vivas de los otomí-chichimecas de Tolinán: la Peña de Bernal, guardiana de un territorio sagrado*, desde la Facultad de Filosofía se logró posicionar la necesidad de una alianza interinstitucional entre la Secretaría de Cultura, la Secretaría de Turismo, el Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas, el Instituto Nacional de Antropología e Historia y los municipios de Cadereyta de Montes, Colón, Ezequiel Montes y Tolinán. Se propuso llevar a cabo un proceso de investigación participativa que tuviera como resultado un *Plan de salvaguardia* (2019) y al mismo tiempo pudiera brindar acciones de atención y seguimiento dentro de las comunidades que integran dicha poligonal. Con esta perspectiva, se proyectaron dos facetas: una de trabajo de gestión para impulsar políticas públicas y otra para realizar la investigación participativa con las y los portadores del patrimonio.

El presente artículo expone el proceso de investigación participativa conducido en 2019 en los municipios de Ezequiel Montes, Cadereyta de Montes, Colón y Tolinán, con el objetivo de ofrecer un modo pertinente de investigar los procesos que conciernen a la comunidad y las y los portadores del patrimonio, de modo que se diseñen acciones benéficas para su salvaguardia tras problematizar la situación. Como hipótesis, sostenemos que la investigación participativa constituye un elemento nodal para el trabajo en lugares patrimonializados, pues posibilita la obtención de datos relevantes y la reflexión en los grupos y comunidades del territorio, que a su vez permiten crear propuestas y acciones pertinentes para salvaguardar el patrimonio. Afirmamos que dicha participación debe ser intersectorial e interinstitucional para conseguir la incidencia deseada en la formulación de políticas públicas.

Metodología

Elegimos la investigación participativa para el trabajo de campo debido a que, en palabras de Fals Borda (2008), permite la

construcción de técnicas que faciliten la búsqueda del conocimiento en forma colectiva, la recuperación crítica de la historia y la cultura de pueblos raizales u originarios y otros grupos, y la devolución sistemática y fácil de entender para la gente del común del conocimiento así adquirido (p. 83).

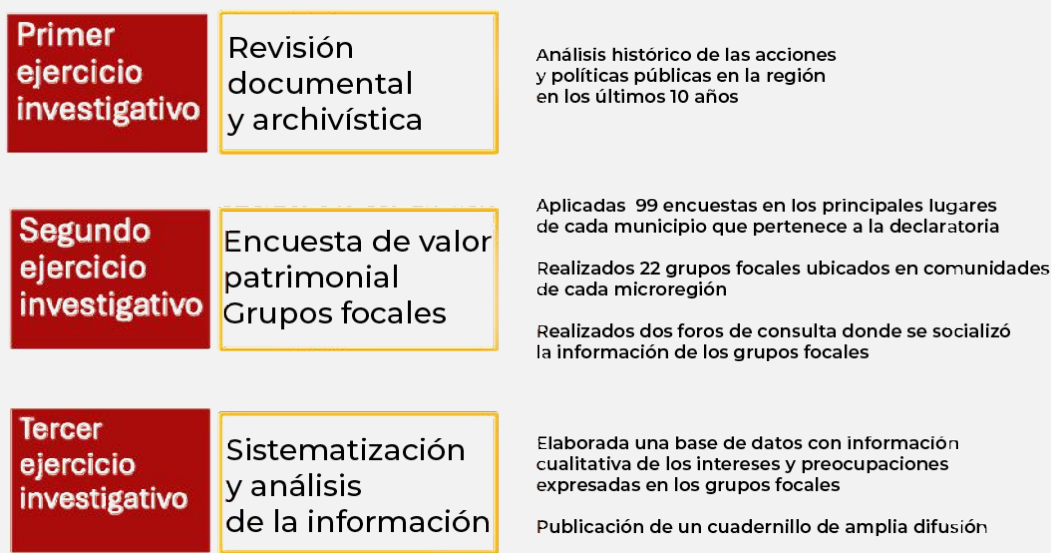
En este sentido, se caracteriza porque promueve el involucramiento de la población local, así como de las instituciones y,

en nuestro caso, de los municipios que conforman el perímetro de la declaratoria. El mismo autor nombra esta cualidad como una “búsqueda mutuamente respetuosa de la suma de saberes entre el conocimiento académico formal y la sabiduría informal y/o experiencia popular” (p. 83).

Un elemento de nuestro interés sobre esta metodología es el concepto de no neutralidad, puesto que implica una reflexión ética al aproximarnos a los grupos, pueblos y comunidades, así como a las instancias de decisión. Así, tomamos una postura acerca del ejercicio de poder de los segundos y la posibilidad de agencia de los primeros. Dado que habitan el territorio y reproducen la cultura, son ellos quienes expresan cómo forman parte del espacio cultural, social, político y religioso que luego se convierte en patrimonio, bajo un nombramiento capaz de aportar o destruir.

La no neutralidad nos insta a utilizar los instrumentos metodológicos con un enfoque participativo, pues desde ahí surge una reflexión y se moviliza la conciencia de las comunidades hacia el valor de las expresiones culturales, a la par que se forma en las instituciones una sensibilidad hacia las y los portadores de la cultura. De tal forma, la elección de la investigación participativa es tanto una postura política como ética. En este caso, el trabajo se dividió en tres ejercicios (Fig. 1), que posteriormente se detallarán.

Figura 1
Ejercicios investigativos para elaborar el *Plan de salvaguardia* del patrimonio intangible del semidesierto queretano



Fuente: elaboración propia (2025)

Para la revisión documental y archivística se tomó en cuenta el ejercicio de los presupuestos en los municipios que albergan la declaratoria (Cadereyta, Colón, Ezequiel Montes y Tolimán), indagando en los rubros destinados a la cultura y en qué proporción se implementaron los recursos para este fin, o bien, para otros, como la infraestructura. Se consultaron bases estatales y municipales, el portal de la Comisión de Transparencia, Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Estado de Querétaro (2019), fuentes relevantes como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019) e informes de los municipios involucrados. Este análisis dejó entrever el interés que las instituciones de los diferentes órdenes gubernamentales tuvieron en cuanto al desarrollo de acciones vinculantes en materia de patrimonio, y así proponer, desde lo ya realizado, estrategias articuladoras con futuras acciones.

El segundo ejercicio investigativo se llevó a cabo mediante una encuesta de valor patrimonial (Mayordomo Maya y Hermosillo Pla, 2020), para conocer las percepciones de las y los habitantes en torno a los elementos más valorados del patrimonio, las opiniones sobre los usos sociales, el estado de conservación y las actitudes ante su participación en la protección y rehabilitación del sitio. Este instrumento permitió tener un punto de referencia sobre el estado de la cuestión de la declaratoria en cuanto a beneficios y riesgos. Articulamos también otros temas de interés, como las concepciones de la población local respecto al patrimonio, las expresiones que consideran en cuanto a importancia, el estado en que se encuentran y las posibles intervenciones para conservarlas o salvaguardarlas. El número de personas encuestadas se determinó a partir de la representación territorial de cada municipio en la poligonal de la declaratoria. En Tolimán fueron 495, en Ezequiel Montes (Bernal) 220, en Colón 125 y en Cadereyta de Montes 60, sumando un total de 900.

De manera simultánea, se realizaron grupos focales y recorridos en campo con un enfoque etnográfico, para construir un diagnóstico detallado, a fondo y conversado sobre las situaciones que acontecieron en los últimos diez años en materia de patrimonio. En estos espacios confluyó un amplio conjunto de perfiles culturales de las y los habitantes del semidesierto, lo cual nos brindó información con profundidad y una pluralidad de voces.

Se solicitó, asimismo, un consentimiento informado en distintos formatos. Para convocar a los grupos focales se dirigió una carta a líderes reconocidos, y en el ejercicio de los grupos se pidió permiso a la comunidad presente para preguntarles sobre el patrimonio, tomar fotografías y hacer registros por escrito. A la vez, nos comprometimos a devolver la información y recibir su retroalimentación en los foros de consulta. Esta segunda práctica es la que da cuenta de la investigación participativa y se muestra aquí en la sección de resultados.

El método de análisis del contenido de los grupos focales fue la teoría fundamentada, cuya flexibilidad permite recuperar, modificar y agregar conceptos locales que representan a los grupos y comunidades en sus términos. Bonilla-García y López-Suárez (2016) la explican como

un método de investigación que posee una técnica flexible y que realiza simultáneamente la recolección y el procesamiento de los datos. En este método, el investigador se encuentra inmerso en el campo de estudio y sus observaciones se abocan al dato, considerando tanto su interpretación como la de los otros sujetos implicados, con la finalidad de fortalecer la comprensión del fenómeno social investigado (p. 305).

De los grupos surgieron diez expresiones culturales nombradas por las comunidades. Sobre el patrimonio natural, reconocieron la Peña de Bernal; el Pinal del Zamorano; el agua, los manantiales y sus formas; y la milpa, la gastronomía y el patrimonio biocultural. Sobre el patrimonio vivo: las danzas, la música y las artesanías; las peregrinaciones y las festividades comunitarias; las cruces, los objetos rituales y los instrumentos cotidianos; y la lengua y la identidad. Y sobre el patrimonio construido: las capillas, los calvarios y las edificaciones rituales; además del espacio construido y la vivienda tradicional. Sumado a estos datos, definimos seis ejes: capacitación, equipamiento, preservación y organización, revaloración y transmisión del patrimonio intangible, difusión y divulgación para la salvaguardia del patrimonio y revitalización e investigación.

Por ejemplo, respecto al patrimonio natural, Jesús Martínez de la comunidad de El Fuenteño, en Colón, habla sobre el Pinal del Zamorano como un cerro sagrado y lo describe así:

Hay 506 escalones que suben al cerro. 3,333 metros allá arriba es el cerro más alto de Querétaro. Es un área protegida y solo tiene peregrinaje el día de la Santa Cruz,

que es el 3 de mayo. Se dice que es un volcán de agua, que debajo pasa una *vena de mar*. Si se llega a abrir el cerro, lo que sale es agua salada. Lo que peligra es Guanajuato, porque baja hacia allá y se inundaría todo Guanajuato (comunicación personal, 2019).

Por otro lado, sobre el patrimonio vivo, Don Ricardo del municipio de Tolimán dice:

Se ha perdido la lengua. Cuando era niño (más de 50 años), los papás pensaban que quien hablaba otomí tenían desventajas, los hacían menos, por esto no les inculcaron la lengua. Mis papás lo hablaban muy bien, pero nosotros ya no tanto. [...] Hay que hacer algo para que no desaparezca, que se conserve, que se promueva (comunicación personal, 2019).

Finalmente, en el grupo focal con los Escaloneros de la Santa Cruz de Bernal coinciden en cuanto a que no se ven beneficiados del turismo y cuentan que

Hay personas que suben y rayan la Peña. Me tocó una vez que venían de Córdoba, Veracruz. Hacía ocho días que habíamos pintado la capillita, y estaban adentro pintándola. *Qué paso, no se vale*, y me respondieron: *Vamos a dejar un recuerdito*, y se salieron enojados, y luego en el muro de la Peña hicieron lo mismo (comunicación personal, 2019).

El tercer y último ejercicio investigativo consistió en sistematizar y analizar la información. A partir de este trabajo, construimos una base de datos con todos los temas de interés, preocupaciones y posibilidades acerca de las expresiones del patrimonio distinguidas por las y los habitantes del semidesierto, en tres gradientes: natural, construido y vivo.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados de los tres ejercicios investigativos que dieron la pauta para la elaboración posterior del *Plan de salvaguardia*. La Figura 2 ofrece una vista general de las acciones guiadas por la investigación participativa:

Figura 2

El Plan de salvaguardia en números



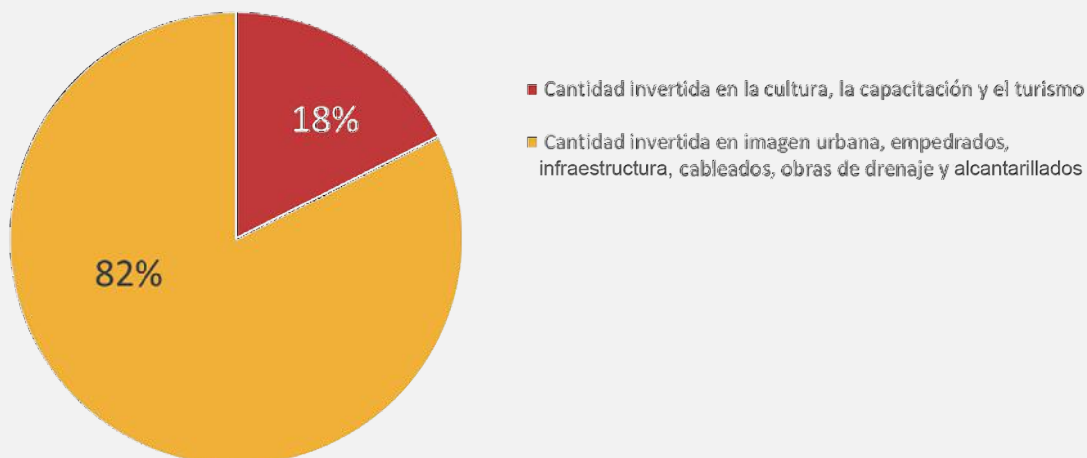
Fuente: Plan de salvaguardia (2019)

Primer ejercicio investigativo: revisión documental y archivística

La revisión de datos aportó información acerca de cómo los municipios en el perímetro de la declaratoria habían destinado su presupuesto a la salvaguardia del patrimonio. Para esta etapa, consultamos cada municipio, el Instituto de Transparencia y el INEGI, y mapeamos 405 intervenciones realizadas por 12 instituciones en el territorio. Encontramos que la infraestructura, tanto carretera como de inmuebles para el turismo, resultaba prioritaria sobre los rubros de la cultura y fiestas patronales, la naturaleza, los vestigios arqueológicos, entre otros. La Figura 3 muestra los resultados del análisis respecto a la distribución de los recursos:

Figura 3

Distribución de los recursos de acuerdo con el tipo de acciones



Fuente: elaboración propia (2019)

A decir del documento del *Plan de salvaguardia* (2019),

nos percatamos de manera inmediata que las acciones institucionales vinculadas con la declaratoria registrada en 2009 no eran enfocadas o presentadas de una manera articulada a una agenda relacionada con el patrimonio, con lo cual la población de la región del semidesierto no tenía clara la estrategia de las instituciones en materia de conservación (p. 39).

Sumado a estos datos, obtuvimos información correspondiente a cada municipio, por rubro de atención, por montos destinados, por acciones realizadas, entre otros.

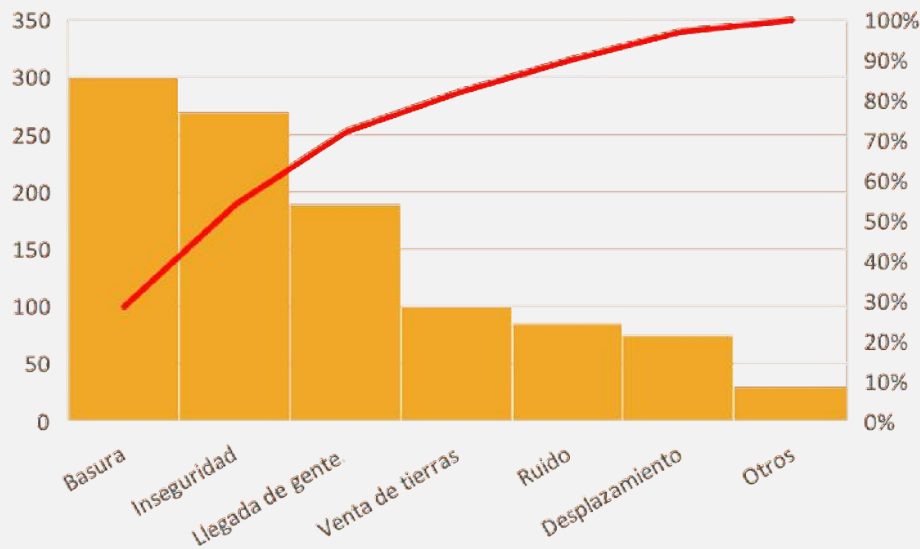
*Segundo ejercicio
investigativo: encuesta
de valor patrimonial
y grupos focales*

Con la encuesta de valor patrimonial se buscó conocer el pulso de la declaratoria en el momento en el que se llevó a cabo con respecto al conocimiento que tenían tanto pobladores como visitantes acerca del territorio patrimonializado, los principales problemas detectados y las ventajas de la declaratoria misma. Se indagaron algunos otros rubros divididos en patrimonio natural, construido y vivo, como el concepto local de patrimonio, los lugares reconocidos como de relevancia cultural, y los ritos y costumbres identificados. Asimismo, les solicitamos que valoraran el estado de conservación de cada uno de ellos.

Las respuestas fueron analizadas con elementos de la estadística descriptiva, la cual “se encarga de describir los datos recopilados para ayudar a analizarlos. [...] sirve para resumir un conjunto de datos mediante medidas estadísticas, gráficos o tablas” (Gisbert Juárez, 2025, s.p.). A manera de ejemplo, presentamos dos gráficas (Figs. 4 y 5) que ilustran la opinión de la gente respecto a los aspectos problemáticos surgidos a partir de la declaratoria como PCI:

Figura 4

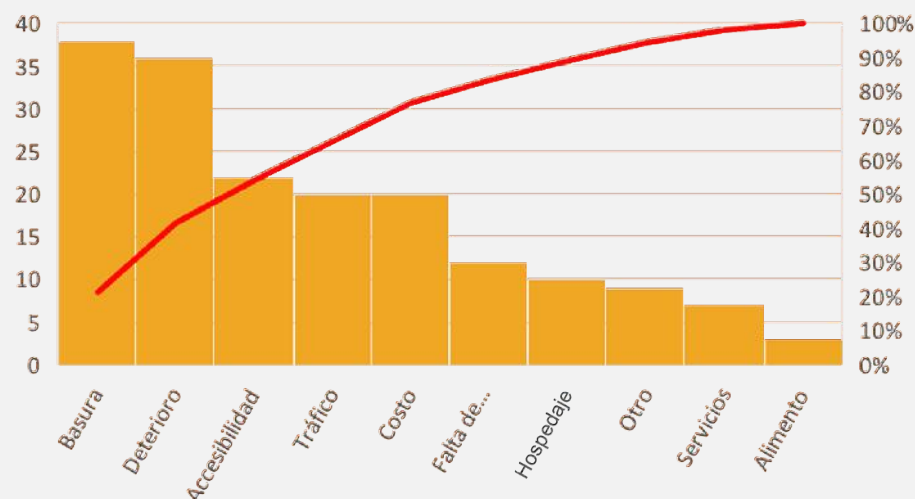
Pregunta a habitantes: ¿qué problemas existen en este lugar desde que la UNESCO lo reconoció como PCI?



Fuente: elaboración propia (2019)

Figura 5

Pregunta a visitantes: ¿qué problemas encuentra cuando visita este lugar?



Fuente: elaboración propia (2019)

Llama la atención que la mayoría de las personas encuestadas que habitan en la región no tenían conocimiento acerca de la declaratoria y, por consiguiente, han quedado ajenas a los beneficios y afectaciones que de ella derivan. En este sentido, la encuesta aportó información valiosa sobre los lugares reco-

nocidos por la comunidad como de valor cultural respecto a los tres tipos de patrimonio, su preservación y sus riesgos.

Tercer ejercicio investigativo: Una vez concluidas las conversaciones grupales, se sistematizó y clasificó la información, tras lo cual se definieron líneas de acción. Con base en los datos de las y los habitantes, así como de las instituciones culturales, sobre la representación del semidesierto y la necesidad de conservación y difusión, se formularon recomendaciones en plazos de atención para cada una de las diez expresiones del patrimonio (Fig. 6). Asimismo, se establecieron seis ejes de acción vinculados a estas últimas: capacitación, equipamiento, preservación y organización, revaloración y transmisión del patrimonio intangible, difusión y divulgación para la salvaguardia del patrimonio y revitalización e investigación.

Figura 6
Las diez expresiones patrimoniales reconocidas por las comunidades

	PATRIMONIO NATURAL Peña de Bernal		PATRIMONIO VIVO Danzas, música y artesanías		PATRIMONIO CONSTRUIDO Capillas, calvarios y edificaciones rituales
	PATRIMONIO NATURAL Pinal del Zamorano		PATRIMONIO VIVO Peregrinaciones y festividades comunitarias		PATRIMONIO CONSTRUIDO Espacio construido y vivienda tradicional
	PATRIMONIO NATURAL El agua, los manantiales y sus formas		PATRIMONIO VIVO Cruces, objetos rituales e instrumentos cotidianos		
	PATRIMONIO NATURAL Milpas, gastronomía y patrimonio biocultural		PATRIMONIO VIVO Lengua e identidad		

Fuente: Plan de salvaguardia (2019)

Las encuestas de valor patrimonial se aplicaron a la población local y visitantes. Los grupos focales con las y los portadores de la cultura se convocaron por medio de líderes locales, seguidos de visitas en campo llevadas a cabo en compañía de representantes de las comunidades. A partir de la información recopilada, se emitieron cerca de 300 recomendaciones. Estas últimas fueron revisadas, comentadas y reflexionadas, en un primer momento, por las y los pobladores en los foros de revisión y validación que organizaron las instancias involucradas y, posteriormente, por un grupo de expertos en distintas dimensiones del patrimonio, como el personal del área de arquitectura y restauración del INAH y su subdirección de patrimonio mundial.

Finalmente, se imprimieron dos productos: el documento del *Plan de salvaguardia* (2019) y un cuadernillo de amplia difusión que se regresaría a los grupos y comunidades. La Figura 7 muestra un ejemplo del formato con el que se organizó la información para estas obras:

Figura 7
Ejemplo del formato para la elaboración del *Plan de salvaguardia*

EJE DE SALVAGUARDIA	ACCIONES
 PRESERVACIÓN Y ORGANIZACIÓN	• Organizar distintas actividades para la conservación de suelo y capa vegetal a lo largo del sendero principal de la Peña de Bernal, acordes a las recomendaciones del documento: Programa de Manejo. Área Natural Protegida con categoría de Paisaje Protegido “Peña de Bernal” 2011. SEDESU. • Organizar reuniones con grupos e individuos que practican actividades de escalada y alpinismo en la Peña de Bernal, con el fin de orientar sus actividades de manera que contribuyan a la salvaguardia de las actividades rituales en el paisaje cultural.
 REVALORACIÓN Y TRANSMISIÓN DEL PATRIMONIO INTANGIBLE	• Colaborar mediante procesos de cofinanciamiento para la realización de las actividades vinculadas con el movimiento de la Santa Cruz. • Realizar procesos de registro y documentación de la tradición oral de los Escaloneros y las distintas manifestaciones culturales de los barrios originarios de Bernal. • Desarrollar contenidos QR para colocarlos a lo largo de la ruta principal del recorrido, que contengan información biocultural del patrimonio (preferentemente en tres idiomas: español, inglés y otomí). • Realizar campañas de sensibilización ecológica y sobre la importancia del monolito y las prácticas culturales ancestrales realizadas por los Escaloneros de la Santa Cruz.

Fuente: *Plan de salvaguardia* (2019)

Un elemento importante de la metodología es el retorno de la información a las personas y comunidades que participaron. Cumplimos esta fase mediante foros donde convergieron las y los portadores de la cultura con los encargados de las instituciones participantes. En este segundo nivel de diálogo se pudo corroborar lo sistematizado, informar a las autoridades y generar cercanía entre quienes definen el presupuesto y quienes mantienen la vida en movimiento. Los resultados se entregaron en un evento protocolario con las instituciones y municipios involucrados, con la intención de que se hiciera un compromiso para actuar tras haber escuchado las demandas, necesidades, inquietudes y sueños de quienes usan, articulan y reproducen el patrimonio.

Discusión y conclusiones

De manera puntual, el análisis histórico de las políticas públicas arroja que la mayor parte del presupuesto se ha destinado a la infraestructura relativa a rutas turísticas. Esta práctica conlleva el riesgo de privilegiar el mercado sobre la salvaguardia y de diluir la relevancia del aspecto cultural. Sin duda, este dato levantó una alerta para diversificar los esfuerzos dirigidos a la cultura y el patrimonio.

Durante el trabajo de campo encontramos tanto lugares preservados, prácticas rituales que se representan y reproducen, y sitios naturales que conservan su sacralidad, como espacios en ruinas, ceremonias cuyo significado se ha disipado a lo largo del tiempo y lugares sagrados olvidados o encerrados en zonas privatizadas. Todos estos elementos se relacionan con grupos y comunidades que pugnan por sobrevivir y preservar lo propio, en vínculo constante con políticas municipales y estatales que a veces toman en cuenta el patrimonio como elemento de interés y muchas otras lo olvidan. Como quedó plasmado en el *Plan de salvaguardia* (2019):

Una de las riquezas que tuvo este planteamiento es que en los recorridos se podía conocer la vida cotidiana de los habitantes, su cultura material, sus percepciones y diálogos sobre lo propio y el enorme interés que la gente tiene por el cuidado de sus patrimonios (p. 47).

Existen otras experiencias en América Latina que, de manera intersectorial e intermunicipal, han logrado propuestas sostenibles y relevantes para la comunidad. Por ejemplo, en Colombia, con la experiencia del manejo del paisaje cafetalero se ha formado una interesante sinergia entre las autoridades culturales y los empresarios mediante contratos (Arango Gaviria, 2012), mientras que en Ecuador se ha atestiguado la participación ciudadana en la provincia de Riobamba por la defensa de sus territorios (Padilla Samaniego y Herrera Chávez, 2023).

La investigación participativa aportó elementos nodales en la construcción de un proceso reflexivo y comunitario. En particular, los grupos focales en las diferentes comunidades con las y los portadores de la cultura permitieron pensar la cultura desde un punto de vista local, reconocer el valor de preservar las expresiones, mirar el futuro, valorar lo que se ha conservado y también lo que se ha perdido, para con ello ir construyendo una forma de agencia hacia la preservación.

Agradecimientos

Agradecemos a las y los portadores de la cultura del semidesierto que nos recibieron en sus comunidades y compartieron sus dilemas y preocupaciones acerca de la cultura local ancestral, que a través de las generaciones han preservado. Agradecemos también a las comunidades de San Antonio de la Cal, El Jabalí, Tolimán Centro, La Florida, El Fuenteño, Los Trigos, Higuierillas, Cadereyta Centro, Manantiales, El Carrizal, La Salitrera, Laguna del Venado, San Pedro, entre muchas otras, por tomarse el tiempo para reflexionar sobre lo que ocurre en sus territorios.

Referencias

- Arango Gaviria, O. (2012). *Un contrato plan para el Paisaje Cultural Cafetero*. Red Alma Mater-Universidad Tecnológica de Pereira. <https://drive.google.com/file/d/1N9KA5FS21JbW5fumxwMu2aB-DFkP-KNxT/view>
- Ballart, J. (1997). *El patrimonio histórico y arqueológico: valor y uso*. Ariel. <https://www.scribd.com/document/467765625/BALLART-JO-SEP-El-Patrimonio-Historico-y-Arqueologico-Valor-y-uso-1-pdf>
- Bojalil Parra, S. (2002). Patrimonio ciudadano. *Reencuentro*, (35), 92-97. <https://biblat.unam.mx/es/revista/reencuentro-mexico-d-f/articulo/patrimonio-ciudadano>
- Bonilla-García, M.Á. y López-Suárez, A.D. (2016). Ejemplificación del proceso metodológico de la teoría fundamentada. *Cinta de Moebio*, (57), 305-315. <https://doi.org/10.4067/S0717-554X2016000300006>
- Comisión de Transparencia, Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Estado de Querétaro. (2019). <https://portal.infoqro.mx/>
- Cruz Blanco, M. (29 de noviembre del 2024). *Cultura sin aumento presupuestal en Querétaro y con recorte federal: López Birlain*. Códice Informativo. [https://codiceinformativo.com/2024/11/cultura-sin-aumento-presupuestal-en-queretaro-y-con-recorte-federal-lopez-](https://codiceinformativo.com/2024/11/cultura-sin-aumento-presupuestal-en-queretaro-y-con-recorte-federal-lopez-escalante-betancourt-y-2011-los-no-lugares-sagrados-de-patrimonio-nacional-a-patrimonio-universal-https-territoriosypatrimonio-files-wordpress-com-2018-05-los-no-lugares-sagrados-pdf)
- Escalante Betancourt, Y. (2011). *Los no lugares sagrados. De patrimonio nacional a patrimonio universal*. <https://territoriosypatrimonio.files.wordpress.com/2018/05/los-no-lugares-sagrados.pdf>
- Fals Borda, O. (2008). *El socialismo raizal y la Gran Colombia bolivariana*. Investigación Acción Participativa. El perro y la rana.
- Fernández Piñar, C. y Rivas, F.A. (2024). *La trashumancia en Sobrarbe. Estrategias de salvaguarda del patrimonio inmaterial*. Comarca de Sobrarbe. https://www.academia.edu/126374273/La_trashumancia_en_Sobrarbe_Estrategias_de_salvaguarda_del_patrimonio_inmaterial
- Gisbert Juárez, M. (2025) Estadística descriptiva. *ProbabilidadyEstadística.net*. <https://www.probabilidadyestadistica.net/estadistica-descriptiva/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). <https://www.inegi.org.mx/>
- Machuca R., J.A. (1998). Percepciones de la cultura en la posmodernidad. *Alteridades*, 8(16), 27-41. <https://alteridades.izt.uam.mx/index.php/Alte/article/view/472/471>
- Mancera-Valencia, F.J., Ávila Reyes, A.A., Ortiz Mendoza, F.J. y Amador Guzmán, P.M. (2020). Conocimiento y acciones comunitarias para la conservación del Valle de Allende, Chihuahua: Patrimonio Cultural de la Humanidad. *Diversidad*, (20), 92-101. https://idesmac.net/mrevistas/wp-content/uploads/revistas/20/20_92_101.pdf
- Massó Guijarro, E. (2006). La identidad cultural como patrimonio inmaterial: relaciones dialécticas con el desarrollo. *Theoria*, 15(1), 89-99. <https://www.researchgate.net/publication/26463408>
- Mayordomo Maya, S. y Hermosillo Pla, J. (2020). Propuesta de un método de evaluación del patrimonio cultural y su aplicación en Cortes de Pallás (Valencia). *Investigaciones Geográficas*, (73), 211-233. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.MMHP>
- Mendoza Mejía, J. (2014). Imágenes del patrimonio cultural inmaterial en los museos, dos casos de estudio. *Revista Arbitrada de Artes Visuales*, julio-diciembre. https://www.discursovisual.net/dvweb34/PDF/03_Imagenes%20del%20patrimonio%20cultural%20inmaterial%20en%20los%20museos%20dos%20casos%20de%20estudio.pdf
- Morales Montes de Oca, L.C. (2023). *Patrimonio y extractivismo. Las cosmogonías locales como formas de resistencia para la preservación de los procesos bioculturales a partir de la declaración de la UNESCO en el semidesierto queretano* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/10204>
- Olivera, A. (2011). Patrimonio inmaterial, recurso turístico y espíritu de los territorios. *Cuadernos de Turismo*, (27), 663-677. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39820898036>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2010). *Expediente técnico: Lugares de memoria y tradiciones vivas de los otomí-chichimecas de Tolimán: la Peña de Bernal, guardiana de un territorio sagrado*. Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (19 de marzo del 2026). *About UNESCO Mexico*. UNESCO Mexico. Recuperado en 2025 de <https://www.unesco.org/en/fieldoffice/mexico/about>
- Plan de salvaguardia. Lugares de memoria y tradiciones vivas de los pueblos otomí-chichimecas de Tolimán. La Peña de Bernal, guardián de un territorio sagrado*. (2019). Secretaría de Cultura-Gobierno del Estado de Querétaro.

- Rodríguez Basulto, B. y Weissel, M. (2022). Absuelto bajo conjuro, filantropía de una declaratoria. El tango como patrimonio inmaterial de la humanidad. *Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano*, 31(1), 78-100. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6834934>
- Padilla Samaniego, J.P. y Herrera Chávez, R.H. (2023). Patrimonio cultural inmaterial y desarrollo turístico en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo. *ReHuSo*, 8(2). <https://doi.org/10.33936/rehuso.v8i2.5746>
- Santamarina Campos, B. (2013). Los mapas geopolíticos de la Unesco: entre la distinción y la diferencia están las asimetrías. El éxito (exótico) del patrimonio inmaterial. *Revista de Antropología Social*, (22), 263-286. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4614399>
- Solorio, E. (2012). Reformas del Estado y procesos de cambio político local: un análisis del proyecto Patrimonio Cultural Intangible de la UNESCO en el semidesierto queretano [Tesis doctoral]. El Colegio de Michoacán.
- Toledo, V.M. y Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural. La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Junta de Andalucía/Icaria Editorial. https://data.over-blog-kiwi.com/1/38/03/91/20220415/ob_b8e0ba_lamemoriabioculturalpdf.pdf
- Vázquez Estrada, A. (2005). ¿Peregrinar o morir? Lugares sagrados entre los chichimeca-otomí. *Gazeta de Antropología*, (21). <http://hdl.handle.net/10481/7209>
- Vázquez Estrada, A. y Morales Montes de Oca, L.C. (2022). Patrimonio cultural inmaterial y extractivismo institucionalizado. La declaratoria del semidesierto queretano. *Sociedad y Ambiente*, (25). <https://doi.org/10.31840/sya.vi25.2576>
- Villaseñor Alonso, I. y Zolla Márquez, E. (2012). Del patrimonio cultural inmaterial o la patrimonialización de la cultura. *Cultura y Representaciones Sociales*, 6(12). <https://www.culturayrs.unam.mx/index.php/CRS/article/view/417>

Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur como mediación para proponer una ecosofía educativa alternativa¹

Epistemic Matrix for an Eco-education from the South as a mediation for an alternative educational ecosophy

José Luis Mora Fausto* 

Instituto Universitario Puebla, extensión Morelia, Michoacán, México

*morafjl@yahoo.com.mx; luisfaustomora@gmail.com

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2063

Fecha de recepción: 21 de octubre del 2025

Fecha de aceptación: 29 de abril del 2026

Resumen

Este artículo tiene el objetivo de presentar la Matriz Epistémica con el fin de una Ecoeducación desde el Sur y proponer una ecosofía educativa que contribuya a superar la concepción de que la racionalidad moderna es unívoca, a través de una estrategia metodológica de indagación teórica y filosófica para producir conocimiento. En primer lugar, se revisan los antecedentes del concepto de *ecoeducación*, provenientes del conjunto referido aquí como epistemologías del Norte hegemónico. Posteriormente, se entabla un diálogo con perspectivas que enriquecen la ecoeducación desde el Sur epistémico, entendido como un proceso educativo que incorpora la descolonialidad, la interpelación de la modernidad, la recuperación de saberes ancestrales vigentes y la concepción de la naturaleza como sujeto con derechos, en lugar de objeto explotable. Se concluye por explicar cómo esta propuesta ecoeducativa, integrada por la educación biocéntrica/ecocéntrica, mental/existencial, comunitaria y espiritual, se constituye en una mediación para formular una ecosofía educativa coherente con los fundamentos presentados y que nos oriente a habitar sabiamente nuestro mundo.

Palabras clave: ecoeducación; ecosofía educativa; epistemologías del Sur; descolonización epistémica

¹ Este documento, con algunas modificaciones, corresponde a la introducción de la tesis *Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur como mediación a una Ecosofía Educativa*, presentada para obtener el grado de doctor en Ecoeducación el 6 de septiembre del 2021.



Abstract

This article introduces the Epistemic Matrix for an Eco-education from the South, as well as an educational ecosophy that contributes to overcoming the conception of modern rationality as univocal by using a theoretical and philosophical inquiry as a methodological strategy to produce knowledge. Firstly, we review the background of eco-education, which stems from the compound referred to here as hegemonic North epistemologies. Subsequently, we hold a dialogue with views that enrich eco-education from the epistemic South, understood as an educational process based on decoloniality, interpellation of modernity, recovery of ancestral knowledge that holds good, and understanding of nature as a subject with rights rather than an exploitable object. We conclude by explaining how this eco-educational proposal, comprised by biocentric/ecocentric, mental/existential, communal and spiritual education, constitutes a mediation that helps formulate an educational ecosophy that aligns with the above-mentioned basis and leads us to inhabit our world wisely.

Keywords: eco-education; educational ecosophy; epistemologies of the South; epistemic decolonization.

Introducción

En este documento se plantea mostrar cuatro apartados que integran los antecedentes de la ecoeducación desde las epistemologías del Norte, las orientaciones que dan cuenta de ella desde el Sur y la construcción de la estructura de la Matriz Epistémica para una Ecoeducación con perspectiva desde el Sur,² la cual se orienta a ser una mediación para constituir una Ecosofía Educativa. En esta arquitectónica epistémica se enlazan dimensiones y categorías desde las que se puede proponer el abordaje de los conocimientos, saberes y prácticas respecto de una ecoeducación desde el Sur.

El punto de partida es la presentación del concepto ecoeducación, originalmente expuesto por Edward Clark (1997) y Fritjof Capra (2007) como una alfabetización ecológica. La ecoeducación se promovió como la base de una reforma y reestructuración educativa dentro de un marco integrador basado en la teoría de los sistemas vivos, que incluye organismos,

² Al hablar de una perspectiva desde el Sur, se recupera el concepto de *Sur global* o *Sur Antimperial* de Boaventura de Sousa Santos (2021, pp. 115-116) para referirse a un Sur epistemológico, no geográfico (puede existir tanto en el sur como en el norte geográfico), compuesto por muchos sures epistemológicos que tienen en común ser saberes nacidos en las luchas contra el capitalismo, el colonialismo y el patriarcado. Esta perspectiva posibilita que los grupos sociales representen el mundo como propio y en sus términos, pues solo así podrán cambiarlo según sus aspiraciones.

sistemas sociales y ecosistemas, mismos que comparten principios de organización como interdependencia, compañerismo, diversidad, coevolución, sustentabilidad, ciclos fluctuantes y flujos de energía.

La ecoeducación, tal y como ha sido concebida por estos autores, se puede enriquecer con elementos de las aportaciones del Sur epistémico, como teorías, comprensiones y experiencias articuladas por autores latinoamericanos, africanos o asiáticos, cuyas miradas nutren su sentido, su significado. Al respecto, nos dice Boaventura de Sousa Santos (2019a) que “la posibilidad de enriquecimiento mutuo entre saberes y culturas constituye la razón de ser de las epistemologías del Sur” (p. 186).

En contraste, al señalar las epistemologías del Norte, se hace referencia al sistema de conocimientos hegemónicos, con perspectiva eurocéntrica, que promueve una monocultura del saber desde la universalización de la ciencia occidental como única forma válida de conocimiento. Esto es cuestionado por las epistemologías del Sur, las cuales “no descartan necesariamente el conocimiento científico ni la cultura occidental hegemónica, sino que los interrogan, generando así interpretaciones posiblemente más ricas que las que ofrecen las epistemologías del Norte” (Santos, 2017, p. 233).

Así, la ecoeducación desde el Sur implica cuestionar los esquemas coloniales limitantes en la construcción de las subjetividades que orientan el sistema educativo con un enfoque moderno, en el sentido planteado por el filósofo Enrique Dussel³ (2025). Desmontar las categorías coloniales permite, a su vez, deconstruir el concepto de ecoeducación; en ese sentido, se hará una *ocupación* de dicho concepto con otros contenidos para ampliar su mirada y enriquecerla con las comprensiones provenientes del Sur epistémico. La *ocupación epistemológica* (Santos, 2019) implica la no existencia de planteamientos semánticos definitivos, sino que las palabras pueden resemantizarse desde otras epistemes y lugares de enunciación. De tal forma, se les dan sentidos distintos a las comprensiones acerca

³ Enrique Dussel (2025), junto con Ramón Grosfoguel (2010, como se citó en Dussel, 2025), destacan que las bases para el surgimiento de la modernidad se sentaron en 1492, derivadas de la invasión y conquista de Al-Ándalus primero y, posteriormente, de pueblos originarios y naturaleza de las Américas. Este antecedente histórico mundial estuvo determinado por la dominación colonial que propició que en Europa se instauraran instituciones como el Estado-nación, así como la justicia, la democracia, la libertad, los derechos ciudadanos, entre otros, sobre el pilar de la superioridad del hombre blanco europeo respecto de las demás culturas; no obstante, sin los recursos provenientes de los pueblos dominados, no hubieran existido las condiciones para que surgieran esos ideales de la modernidad, aplicables solo a los hombres blancos, europeos, libres y burgueses, sin contar a las mujeres, los hombres pobres no propietarios y la población esclavizada de sus colonias.

del mundo y del esfuerzo por habitarlo de diferentes maneras, y se establece un diálogo en una ecología de saberes con las miradas que provienen tanto de la teoría como de las prácticas, los conocimientos ancestrales de las naciones originarias y las vivencias, entre otras epistemes alternativas.

La reflexión anterior permite entender que no vemos la ecoeducación como un futuro y progreso, sino que las vivencias y conocimientos de estos pueblos se mantuvieron vigentes a lo largo de toda la experiencia colonial como expresiones de resistencia frente a la invasión, conquista y exterminio de Europa en América inicialmente, que en los siglos posteriores se extendieron al resto del mundo. Podría decirse que la ecoeducación, como práctica, saber y experiencia de vivir en armonía o mayor equilibrio con la naturaleza, ha estado presente en muchos pueblos del mundo, y que más bien es con la modernidad como matriz civilizatoria-cultural que se fractura esta relación en función de la colonialidad de la naturaleza como uno de los patrones opresivos inaugurados con la modernidad. Este escenario se manifiesta en la expresión “el hombre es amo y señor de la naturaleza”.

Pese a ello, se mantienen espacios residuales de saber y expresión de las formas ancestrales de habitar el mundo que han resistido la dominación. Estos se muestran ahora como alternativas no solo deseables, sino necesarias, que se deben visibilizar para aprender y reaprender a coexistir y reexistir en una relación de *buenvivir* con otros seres sintientes (humanos y no humanos), reconociendo la naturaleza como sujeto –dadora de vida–, más allá de como objeto o recurso a ser explotado.

Por lo tanto, la descolonización de la ecoeducación requiere descubrir el *locus* de enunciación a partir del cual los autores que acuñan el término articulan la pertinencia de una alfabetización ambiental. En ese sentido, convendrá llevar a cabo una breve revisión de estos autores y definir los límites que tiene esa mirada desde una perspectiva alternativa.

Antecedentes de la eco-educación desde las epistemologías del Norte

Autores como Arne Naess (1973), Fritjof Capra (1999), Edward Clark (1997) y Daniel Goleman (Goleman *et al.*, 2013) articulan una narrativa enfocada en una reforma educativa, con una visión holista, sistémica y ecológica. En general, critican el pensamiento mecanicista y cartesiano, así como a la ciencia clásica derivada de esas ideas reduccionistas; sin embargo, no cuestionan a profundidad la matriz moderna bajo la cual se desarrollan los procesos sociales y materiales de la actualidad que han desatado una profunda crisis social y ambiental. Estos conflictos

no podrán resolverse con el modelo civilizatorio moderno que los ocasionó.

Naess (1973) acuña el concepto de *ecología profunda* basado en una serie de principios metodológicos, filosóficos y prácticos, y plantea la *ecosofía* como la sabiduría de una vida armoniosa con la naturaleza. Su enfoque implica superar la ecología superficial, que prioriza al hombre respecto de la naturaleza, la cual toma un valor instrumental que amerita cuidarla para que no se agote y siga siendo explotable en el futuro. En cambio, sugiere adoptar una ecología profunda, que reconoce la interdependencia fundamental entre los fenómenos y los seres inmersos en los ciclos naturales, siendo la humanidad solo una hebra de la vida junto con las demás especies. Así, propone cambios culturales, sociales y económicos para lograr esta convivencia armónica.

En su libro *La trama de la vida*, Capra (1999) menciona que se requiere “un cambio radical en nuestra percepción, en nuestro pensamiento, en nuestros valores” (p. 26), por lo que, en congruencia con la ecología profunda, recomienda transitar hacia un *paradigma ecológico*, que involucra una percepción espiritual de conexión con el cosmos. En referencia al diálogo interno en las ciencias naturales, señala la necesidad de que la manera de pensar de los científicos se modifique, dejando atrás los estamentos canónicos de la ciencia, y se dé paso a una subjetividad que permita cambiar la concepción de la naturaleza. Busca una apertura como la que hay actualmente en torno a diferentes modos de entender el papel del conocimiento para replantear tanto las prácticas científicas como las sociales, con base en el respeto, cuidado y conservación del medio ambiente, que aseguren su sostenibilidad.

Capra exploró asimismo un diálogo entre la racionalidad científica y algunas provenientes de tradiciones religiosas y místicas de Oriente. En *El tao de la física* (Capra, 2017), publicado originalmente en 1975, enlaza el taoísmo y la física como dos formas de conocimiento que convergen en cuanto al descubrimiento intuitivo que el taoísmo hace de la realidad física y al elemento empírico en la física contemporánea. Inclusive concede un lugar al conocimiento de los pueblos ancestrales indígenas americanos, aunque no profundiza en ello.

Para Capra (1999), la teoría de los sistemas vivos provee de un marco conceptual para vincular las comunidades ecológicas y humanas, al considerar que operan bajo los mismos principios de organización: “interdependencia, reciclaje, asociación, flexibilidad, diversidad y, como consecuencia de todos ellos,

sostenibilidad” (p. 314). Piensa que la supervivencia de la humanidad dependerá de su capacidad de comprender estos fundamentos mediante una *alfabetización ecológica*.

A partir de lo anterior, Capra (2007) y Clark (1997) impulsan el movimiento de la alfabetización ecológica, dentro del cual sugieren modificar los programas educativos para sensibilizar a los futuros ciudadanos del mundo. Así, el concepto de ecoeducación de estos autores se centra en una reforma educativa:

La ecoeducación es una estrategia exhaustiva para reestructurar la educación en todos sus aspectos –la naturaleza y el contenido de un plan de estudios, la forma en que agrupa a los estudiantes, la forma en que se administra el proceso enseñanza/aprendizaje, la forma en que se encuentra estructurado el sistema escolar en su totalidad, y por último, pero ciertamente no menos importante, las características de lo que podría llamarse “la cultura de la escuela” (Clark, 1997, p. 73).

Por su parte, Goleman *et al.* (2013), en el libro *Ecoeducación. Educadores implicados en el desarrollo de la inteligencia emocional, social y ecológica*, formulan una propuesta ecoeducativa con prácticas pedagógicas basadas en el respeto al medio ambiente desde el ambientalismo. Se instruiría sobre el cuidado de la naturaleza con el propósito de “prepar[ar] a los jóvenes de manera genuina para los desafíos ecológicos generados en este momento sin precedentes en la historia de la humanidad” (p. 12). Sin embargo, las nociones que presentan son problemáticas en el sentido de que están contenidas en la matriz epistemológica de la modernidad eurocéntrica, el dualismo cartesiano y el antropocentrismo vigente. A pesar de su pretensión de superar estas ideas, proponen operar estos cambios a partir de la misma hegemonía epistémica de la cientificidad moderna.

De tal modo, en este mecanismo epistémico prevalece la hegemonía desarrollada por el saber colonial, que no es capaz de conversar con otras epistemes, como las que surgen a partir de lo que Boaventura de Sousa Santos (2019) designa como el Sur. Algunas de estas, sin utilizar las nociones relativas a la racionalidad del ecologismo y el ambientalismo, sostienen en todos los ámbitos de su existencia el cuidado y la armonía permanentes con lo que reconocen como madre tierra, y mantienen una convivencia recíproca incluso entre los seres humanos. Por ejemplo, existen el principio andino-amazónico del *Sumak Kawsay* (buen vivir), la filosofía africana del *Ubuntu*

y las sabidurías asiáticas ancestrales que aluden a la idea de “habitar la casa” por sus principios armónicos con la naturaleza, como el budismo o el taoísmo; es decir, formas de comprender la ecosofía.

Sin descartar los aciertos de las contribuciones de Capra, Clark y Goleman *et al.*, es posible detectar que, en menor o mayor medida, conservan la colonialidad epistémica del Norte como el único discurso para comprender el saber *sobre* la naturaleza. Bajo esta lente, persiste el dualismo sujeto-objeto al percibirse la naturaleza como exterioridad, como una forma cosificada, *res extensa*.

A partir de lo anterior, este documento pretende articular una crítica a los patrones del saber derivados del sistema-mundo moderno/capitalista, colonialista, racista y patriarcal impuesto con la destrucción de la relación hombre/naturaleza consecuencia de la expansión colonial europea. Con este fin, se parte de la descolonialidad del saber propuesto por el giro decolonial y las epistemologías del Sur, entre otras matrices epistémicas críticas que permitan superar los patrones de poder, saber y ser que han surgido con la colonialidad.

La Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur

La noción de ecoeducación data de hace poco menos de treinta años (Clark, 1997), expuesta desde un aspecto teórico incipiente. Aún ahora, el campo ecoeducativo no ha terminado de integrarse, por lo que no puede considerarse como un paradigma en el sentido señalado por Kuhn (1971), quien lo identifica como un patrón con el que se mira la realidad, una forma de explicarla, de modelarla. De ahí que se presente con el concepto menos fuerte de *matriz epistémica*, el cual se aborda como un conjunto diverso de categorías teóricas, propuestas y perspectivas que dan cierto sentido y una articulación de conexiones inmersas en un proceso dinámico, en movimiento, no acabado; una base, un soporte, como señala Martínez Miguélez (1997).

La matriz epistémica aquí se plantea como una forma donde ciertas cosmopercepciones, teorías y prácticas se conectan en un horizonte ético-mítico, formulándose, fluyendo e integrando perspectivas en proceso de gestación. No está acabada, fija, ni es un programa ya establecido con una dinámica teórico-pedagógica específica que lo convierta en una teoría estándar; mejor dicho, se propone como una corriente epistémica en construcción, como parte de un programa de investigación en el sentido de Lakatos (1989).

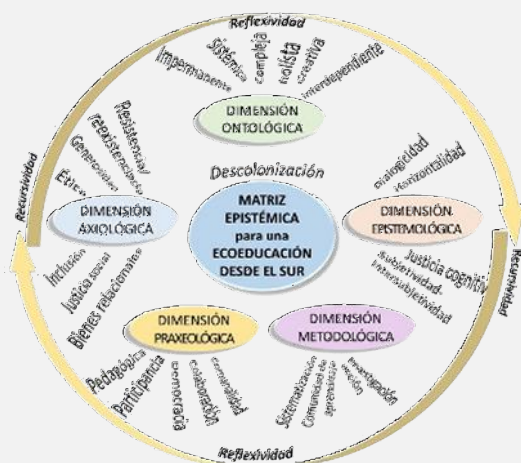
La Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur consiste en una forma de articular relaciones entre diferentes perspectivas teóricas que nutren tanto el campo de la educación ambiental o la educación en la naturaleza, como el de las relaciones existenciales de la biodiversidad socioambiental que constituye el mundo de la vida. Con ello, da lugar a sentidos y orientaciones de lo que se concibe como ecoeducación, incluyendo diversas categorías teóricas, propuestas y perspectivas que permiten construir conexiones e interrelaciones.

En la base presentada, se muestra un razonamiento con cinco dimensiones que derivan en una sabiduría de la casa educativa. Existen otras visiones ecoeducativas que no han integrado la mirada y las epistemes del Sur global, por lo que no se consideran aquí partiendo de la opinión de Santos (2019) respecto a que la diversidad en el mundo es infinita y no podemos limitarnos a su comprensión occidental. Lo anterior no significa que se descarta la producción europea, sino adoptar lo que sea pertinente en un panorama mucho más amplio de posibilidades epistemológicas y políticas, como proponen las epistemologías del Sur.

Las dimensiones incorporadas en la matriz corresponden a las que Guba y Lincoln (2002) usan para definir los paradigmas: ontológica, epistemológica y metodológica, más otros dos para enriquecerla: la axiológica y la praxeológica. Desde esta perspectiva matricial se puede articular el movimiento y conversar con autores cuyos aportes teóricos conforman la propuesta de ecoeducación.

Figura 1

Matriz Epistémica para una Ecoeducación desde el Sur



Fuente: Mora Fausto (2021)

Hay tres propiedades presentes en todas las dimensiones: la descolonización, la recursividad y la reflexividad. La descolonización supone cuestionar la episteme con la que se ha formado a todas las personas que hemos estudiado una materia relativa a la palabra *ciencia*, incluidos los ámbitos naturales, filosóficos, pedagógicos, entre otros; una episteme que normaba todo, estableciendo el canon para determinar el conocimiento considerado válido y universal. Con la recursividad, por su parte, es posible verlo cíclicamente, enriqueciéndose, ampliándose y profundizándose en la medida de su revisión continua, mientras que la reflexividad faculta una mirada crítica hacia la manera en que producimos nuestro propio conocimiento.

A continuación, se describen brevemente las cinco dimensiones y sus interrelaciones. Lejos de la idea de algo definido o acabado, con estas conexiones se despliega una biodiversidad de ontologías, epistemologías, metodologías y pedagogías; de didácticas, experiencias y prácticas.

En primer lugar, la dimensión ontológica implica superar la ontología moderna dualista, colonial y universalista. Esa colonialidad y forma de ver el mundo colapsan, no pueden y no permiten explicar realidades más amplias, lo que da lugar a las llamadas *ontologías relacionales* (Escobar, 2014). Dicho concepto sugiere que no hay solo una visión de la realidad, sino que esta se aprecia desde varias perspectivas, de modo que se le reconoce impermanente, interdependiente, compleja y creativa.

La dimensión epistemológica se comprende desde las posiciones de la ecología del saber, el diálogo de saberes y la traducción intercultural que desarrolla Santos (2019). Valora la dialogicidad, la horizontalidad y la intersubjetividad en la producción del conocimiento, a la vez que supera el dualismo cartesiano objeto-sujeto que se mantiene vigente en las ciencias sociales y educativas. Asimismo, se orienta hacia la justicia epistémica, promoviendo la justicia social desde la descolonización del saber.

La dimensión metodológica abarca estrategias para generar conocimiento en comunidades de aprendizaje o, mejor dicho, comunidades epistémicas. Se propone la reflexión en la acción, la investigación-acción, aunada a la sistematización de experiencias, con el fin de recuperar los saberes producidos colectivamente. Con estas formas de indagación cualitativa es posible expresar los principios epistemológicos del diálogo, la horizontalidad y la reflexividad intersubjetiva, así como recuperar la praxis problemática de las comunidades, con lo cual el

trabajo de investigación y la construcción del conocimiento se formulan a partir del saber y la experiencia de los involucrados en dichos procesos. La dimensión metodológica deja atrás la falsa disyuntiva entre la investigación cualitativa y cuantitativa, y fomenta una transmetodología que constituya una mirada compleja de la realidad.

Bajo la dimensión praxeológica se reflexiona sobre el cambio en las prácticas comunales, dirigidas a la apropiación de espacios de acción que difieren de los planteados por los esquemas superficiales del ambientalismo convencional. Se incorpora la *sociología de las emergencias*, enfocada en visibilizar muchas de las prácticas propias del *saber artesanal* (Santos, 2019a) con una narrativa auténtica, distinta a las que llevan a su desperdicio pues las conciben como ausencias, no como saberes. De tal manera, se interpela el modo de vivir impuesto por la modernidad, y se alientan actividades que nos invitan a colaborar, participar, compartir, pedagogizar y democratizar las experiencias vitales, hacer comunalidad y aprender a reexistir en el mundo.

Finalmente, la dimensión axiológica considera el sentido de los bienes relacionales y la construcción de un lenguaje para comprender la alteridad o una ética que propicie precisamente relaciones y comunalidades entre los sujetos participantes en los procesos de construcción del conocimiento basados en el paradigma educativo del Sur.

A partir de estos conceptos y su retroalimentación mutua se empieza a ahondar en la presente propuesta de ecoeducación con una orientación experiencial profunda que cubre todos los ámbitos de la vida. Trabajar con estos procesos transforma la cotidianeidad porque ofrece miradas provenientes de umbrales distintos, conceptos que en verdad cuestionan cómo se ha ido construyendo el mundo, y desde los cuales se está reconstituyendo para que pueda vivirse experiencialmente.

Una Ecoeducación para una Ecosofía Educativa

La ecosofía es una suerte de sabiduría no contemplativa (Guattari, 2015). En ese sentido, la ecosofía educativa es una praxis enfocada en transformar en comunidad las acciones del cuidado socioambiental. Ello supone renunciar a un paradigma que se pretende científico por fundamentarse únicamente en la racionalidad de los datos, en la cuantificación de los hechos, y que reduce de manera significativa el mundo. Implica adoptar, en cambio, un paradigma ético, que integre el abanico de ontologías, de alteridades; estético, que sume generatividad, cocreación y creatividad; y político, que nos exhorte a tomar

decisiones respecto a la forma en que participamos en los patrones de vida y poder hegemónicos, y en que los interpelamos.

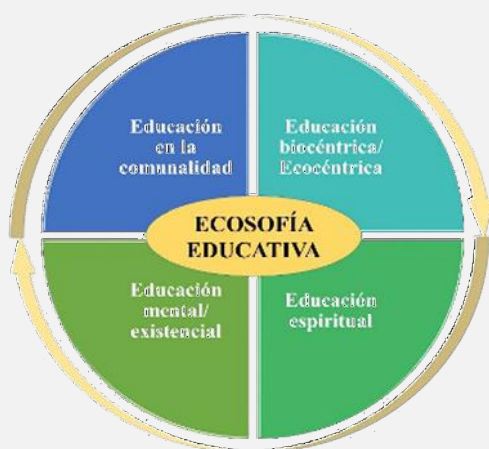
La ecoeducación desde la matriz epistémica soporta el modelado entero de los pensamientos y la subjetividad de una ecosofía educativa. A su vez, esta última nos sirve como marco para construir, mediante la ecoeducación, una mirada amplia y filosófica sobre un modo distinto de educarnos ecosóficamente. Entonces, si la subjetividad ecosófica es la forma de pensar, de creer, de idear, de inventarse en el mundo, se debe cambiar la subjetividad para incorporar una nueva mirada ecoeducativa.

La matriz, sus dimensiones y componentes son la base categorial para constituir una ecosofía educativa desde el Sur (Mora Fausto, 2021) (ver Fig. 2). Así, la ecosofía educativa se vincula con la asunción de lo político porque busca superar los patrones de poder existentes, como la colonialidad del poder, del saber y del ser (Grosfoguel, 2018). También guarda relación con la ecología, pero trasciende la práctica individual del ambientalismo o la ecología superficial, optando por una práctica no solo social sino que tiene como centro la comunalidad de la vida.

La ecoeducación, por lo tanto, funge como mediación para construir otra educación desde una ecología de las educaciones que supere el ámbito escolar y se expanda a todos los aspectos y dimensiones de la vida. De ahí que esta propuesta abarque cuatro campos educativos interdependientes: biocéntrico/ecocéntrico (no solo ambiental), comunalitario, mental/existencial y espiritual (no religioso).

Figura 2

Ecosofía educativa



Fuente: Mora Fausto (2021)

Si la ecosofía es una sabiduría de la casa y la casa educativa es una matriz de creación de subjetividades, entonces la educación es el punto de partida. Pero ¿qué concepto de educación? Carlos Calvo Muñoz (2012) la describe como “el proceso de creación de relaciones posibles” (p. 17). La educación es proceso, ontología alternativa, complejidad, deviene posibilidades, se articula con lo incierto, con la incompletud, con las posibilidades de cocreación de horizontes en un marco enactivo (Maturana R. y Varela G., 1984), es decir, como un proceso activo, corporalizado y situado en el mundo. Aparentemente es concreta la definición, pero contiene múltiples sentidos. Así, la educación es una antropoética: una poética del ser humano, una autopoiesis del ser.

Para orientar la noción de *ecosofía educativa* se toman los registros desarrollados por varios autores en sus modelos. Rigoberto Pupo (2013) menciona cuatro: el campo científico, emocional, espiritual y social; Raimon Panikkar (Sepúlveda Pizarro, 2017) tres: Dios, el hombre y el cosmos o la naturaleza; y Félix Guattari (1996) tres: la ecología mental, ambiental y social. Calvo Muñoz (2012) considera la educación desde la complejidad educativa, la complejidad ambiental y los siete saberes necesarios para la educación del futuro (Morin, 1999), los cuales corresponden a los registros de Guattari, respectivamente.

En todos los casos, para alcanzar estos registros se necesita un mediador o un *cómo* que ayude a constituir las subjetividades requeridas. Desde esta perspectiva, aquí se propone la ecoeducación como ese punto de partida que contribuya a construir todas las relaciones posibles, pues no se agota en un solo proceso, sino que se concibe como un proceso vivencial capaz de formar una subjetividad ecoeducativa. En este sentido, se debe pensar en la educación como la superación de la escolarización moderna o el modelo educativo occidentalizado implantado desde finales del siglo XIX en América Latina, en particular por Justo Sierra y Gabino Barreda, discípulo de Augusto Comte, padre del positivismo.

En el nivel educativo se conforma la base para la construcción de más subjetividades. Las aportaciones al respecto comprenden desde Paulo Freire (1985), quien muestra una manera distinta de entender los procesos educativos, hasta Célestin Freinet, María Montessori y toda la Escuela Nueva con las prácticas educativas de desescolarización (De Zubiría Samper, 2001), donde se intentan formar subjetividades autónomas, no prisioneras, alternativas. En este sentido, la educación se transforma en una estrategia que busca desarrollar agencias,

acciones, prácticas que nos inviten a la desobediencia epistémica (Mignolo, 2010).

Esta propuesta de ecoeducación se basa en una matriz epistémica desde el Sur que busca traducirse en prácticas educativas transformadoras, partiendo de identificar los elementos que ayudarían a conformarla. La comunidad epistémica es un cómo, un dispositivo, una tecnología social, comunitaria, para crear estas prácticas alternativas. De tal modo, al hacer investigación-acción, los sujetos que participan cambian, incluido el investigador, quien entrena su capacidad de escuchar y, con ello, propiciar que el resto hable. Una práctica de transformación es el silencio pedagógico que promueve que la subjetividad del otro sea interpelada y se pueda empezar a construir desde estas nuevas formas de diálogo y desde el anhelo de horizontalidad que la metodología procura.

La educación sería, por lo tanto, una base teórica, una mediación y cierto modo de pensar la ecoeducación como una ecología de las educaciones que imbrican y componen nuestra subjetividad en el trabajo de su liberación, del superar las formas del coloniaje epistémico, como una manera de proyectar una ecosofía educativa. Si queremos hacer una ecosofía educativa, una ecoeducación desde el Sur, con la matriz y dimensiones planteadas, debemos concebir ideas que liberen el pensamiento. La educación es la construcción de todas las relaciones posibles y la ecología ofrece varios modos en los que nos podemos educar.

Desde esta propuesta de ecosofía educativa se articulan los cuatro campos antes mencionados: la educación en la comunalidad, la educación mental/existencial, la educación biocéntrica/ecocéntrica y la educación espiritual. Así es como se relaciona con un modo de construir saber o conocimiento desde una Matriz Epistémica Ecoeducativa que implica una episteme desde el Sur basada en argumentos para entender en qué radica esta comprensión *otra*, desde un sentido *otro* de la educación.

La *educación comunalitaria* modifica el registro de la ecología social de Guattari (1996) y supera las relaciones sociales construidas por el capital.⁴ Por ejemplo, el capital social construye la

⁴ “La comunidad posee una estructura cuya unidad no es el producto de una adición o suma de elementos, [...] sino un conjunto que, al surgir espontáneamente, posee todos los caracteres de una totalidad orgánica, en tanto que la sociedad es el resultado del predominio de los elementos mecánicos, artificiales y racionales que sustituyen las unidades originarias de la familia, de la tribu y de la aldea por los conjuntos contruidos mediante una reflexión consciente sobre los fines, como la gran ciudad o el Estado” (Tönnies, 1887, como se citó en Padilla Llano, 2019).

escuela y el trabajo como relaciones sociales, no comunitarias, como señalan Juan José Bautista Segales (2018) y Enrique Dussel (1996). La comunidad es un concepto útil para entender las relaciones entre las entidades naturales y sociales; así se pasa del ecologismo (movimiento social) al ambientalismo (subjetividad individual). Las entidades sociales provienen de las comunidades que formaron los seres humanos ancestrales con su medio ambiente y que luego se constituyeron en sociedades con la modernidad y el capitalismo.

La *educación mental/existencial* se sostiene de la perspectiva de Gregory Bateson (1998) respecto a que la mente y la naturaleza son plenamente interdependientes. Este campo teoriza sobre la interacción ecológica entre lo material y lo espiritual, donde la mente es un correlato de la materialidad de la naturaleza. En la epistemología del budismo, por ejemplo, la noción de *interdependencia radical* muestra que las entidades son sólidas en función de su relacionalidad interdependiente, principio que aplica asimismo a los estados mentales que configuran nuestra realidad. Desde estas teorías se puede pensar en la educación de la mente o cognitiva y, por lo tanto, en la subjetividad ecosófica con subjetividades mutantes (Guattari, 2015), considerando que la mente es autopoietica porque los elementos de la relación mente-naturaleza-existencia se retroalimentan y autoforman concomitantemente.

La *educación biocéntrica/ecocéntrica* alude a la ecología ambiental, tomando en cuenta la reflexión de Arne Naess (1973) sobre que referirse a la naturaleza como ambiente siempre implica superficialidad. El nombre de este campo busca incorporar las nociones de profundidad inscritas en saberes ancestrales como el *Sumak Kawsay*⁵ y otras filosofías indígenas. En ese sentido, el elemento biocéntrico/ecocéntrico parte del principio ético de la afirmación de la vida que propone Enrique Dussel (1998), pero también del que concibe la vida como sentido, en el que la única obligación del viviente es vivirla, como lo plantea Franz Hinkelammert (Hinkelammert y Mora Jiménez, 2025). La educación para la vida desde la perspectiva biocéntrica/ecocéntrica tiene como pilar la ética del cuidado, en la cual Leonardo Boff (2002) define la vida y su cuidado como posibilidades ontológicas presentes en el *ethos* de la humanidad.

La noción de lo biocéntrico supera el registro ambiental, ya que este termina por ser una práctica política reducida y

⁵ *Sumak Kawsay* (“buen vivir” en quechua) es un concepto ancestral indígena que remite a una vida en plenitud, en armonía con la comunidad, la naturaleza y el cosmos. Implica vivir en equilibrio, fomentando principios como la solidaridad, la reciprocidad y el respeto mutuo para conseguir el bienestar colectivo (Kowii, s.f.).

una decisión individualizada del cuidado del ambiente, aunque se tenga la creencia de que contribuye al cuidado de la vida. Mientras tanto, en la orientación biocéntrica/ecocéntrica es más profunda la comprensión del ambiente como fuente y objeto de reflexión. Asimismo, se considera antrópica porque proviene de una antropoética, una relación saludable que el ser humano forma con la naturaleza y la vida.

El cuarto registro es una ecología espiritual que adopta esta ontología de la vida en concordancia con la crítica de Enrique Leff (2018) a la ontología heideggeriana debido a que en su planteamiento filosófico olvida la vida. Con esta base, se introduce la *educación espiritual* como la construcción de una comprensión distinta de la naturaleza y la relación con los seres inanimados, donde también están presentes las aportaciones de Rigoberto Pupo (2013) sobre la ontologización de la naturaleza como sujeto.

En los sistemas laicos nunca se alude a la educación espiritual por su asociación a la religiosidad, aunque la espiritualidad es una noción humana básica desligada de sus ideas impositivas. En ese sentido, la modernidad seculariza las prácticas existenciales y la educación, si bien al mismo tiempo está sujeta a críticas porque su fundación en la propia hegemonía moderna la lleva a entronizar otras deidades terrestres, como el mercado, el dinero y el capital, según Marx (Hinkelammert, s.f.). En esta propuesta, la espiritualidad es vista como una búsqueda del sentido y significado de la vida (como apunta Víctor Frankl, 1991) y su reciprocidad con la naturaleza. Por eso, cuando se habla del biocentrismo en el primer registro educativo, se entrelaza con una educación espiritual.

La ética del cuidado implica una noción de espiritualidad del ser humano. A decir de Boff (2002), contiene el desvelo, la inquietud, la preocupación por la persona humana o por algún objeto de valor sentimental, la atención, la preocupación, el sentido de compartir la vida, el sufrimiento y los espacios vitales con el otro apreciado. Se trata de una espiritualidad laica, un *ethos*, parte de la dimensión ontológica del ser humano.

A manera de conclusión

El propósito de este documento ha sido mostrar marcos categoriales que enriquezcan la noción de ecoeducación desde las epistemologías del Sur y proponer una ecosofía educativa que nos ayude a superar la concepción unívoca de racionalidad moderna mediante una estrategia de indagación teórica y filosófica para producir conocimiento. Esto conduce a una comprensión del mundo diferente que de ningún modo es

dogmática o cerrada, sino apenas una exposición de ideas globales que podrán continuar desarrollando futuros interesados en la ecoeducación y profundizar en su despliegue.

Las epistemologías del Norte han tenido la oportunidad de expresar su perspectiva sobre la ecoeducación, pero no se han dispuesto a escuchar lo que significa para el Sur experienciarla. El Sur reconoce la presencia de otras ontologías al descubrir o crear metodologías que horizontalizan la producción del conocimiento, entendiendo su relación con la comunidad, biodiversidad y alteridad. En este sentido, recupera prácticas y saberes ancestrales que siguen vigentes y que ahora suponen un medio para superar los desajustes producidos por la monocultura de una sola mirada epistémica.

La construcción de la Matriz Epistémica para la Ecoeducación desde el Sur ha permitido articular diálogos con autores cuyos aportes teóricos nutren la propuesta de la ecoeducación desde esta perspectiva ampliada y en movimiento, de modo que es receptiva ante la biodiversidad de ontologías, epistemologías, metodologías, pedagogías, experiencias y prácticas. Las cinco dimensiones que integran la matriz muestran cómo se comprende la realidad, cómo se construye el conocimiento, con qué metodologías y a través de qué prácticas y principios éticos se expresan. La concepción de ecoeducación no puede limitarse, por lo que se suman múltiples perspectivas, tradiciones y conocimientos enunciados en diferentes partes del mundo.

La matriz aquí presentada ha mediado en la construcción de una ecosofía educativa a partir de cuatro dimensiones que a su vez conforman una ecología de las educaciones: la educación biocéntrica/ecocéntrica, la mental/existencial, la comunalitaria y la espiritual. Si para Guattari (2015) la ecosofía era una necesidad para hacer una filosofía que incluyera los registros mental, ambiental y social, entonces desde esta propuesta la ecosofía educativa se puede concebir como una filosofía educativa con campos propios capaces de superar tanto la noción de lo ambiental como la ecología superficial que esta implica.

Así, se articula una educación biocéntrica fundamentada en el principio que afirma la vida como aquello que da sentido a la satisfacción de las necesidades materiales de los grupos oprimidos del Sur. Por otra parte, este campo garantiza la permanencia de las condiciones materiales de la propia naturaleza, las cuales son esenciales para la interdependencia de la vida en el planeta.

La educación mental/existencial implica la creación de subjetividades alternativas a las establecidas desde la fetichización

del totalitarismo del mercado. Bajo esta última, los sujetos solamente reproducen el sistema, por lo que no pueden pensarse desde una sujetividad (la calidad de ser sujetos) y, con ello, en una intersubjetividad que les diera a su vida una existencia distinta que, al interactuar directa y activamente dentro del mundo, devenga en un proceso de producción responsable y ético es decir, una antropológica.

La educación comunalitaria, por otro lado, resulta indispensable luego de que la modernidad suprimiera las comunidades para afirmar al individuo atomizado, egocéntrico y egoísta, independiente, filosóficamente articulado en el pensamiento cartesiano y en el modelo capitalista de reproducción material de la vida; el sujeto que se apropia del trabajo vivo del otro (Dussel, 1996). De tal modo, este campo nos permite recuperar la función elemental del ser humano respecto a hacer comunidad con el resto de su especie, con la naturaleza y con el cosmos.

Desde esta antropológica se construye la educación espiritual, que alude a una espiritualidad laica, básica, un *ethos* fundamental en el ser humano que va más allá de las religiones pero que recupera el sentido de realidad y este religarse ético con los otros. Se puede encontrar en la filosofía africana, la andino-amazónica, la de los pueblos mesoamericanos, la hinduista y la musulmana. Se trata de espiritualidades donde la vida tiene un sentido distinto derivado de sus relaciones articuladas en el plano de la materialidad terrenal y la antropocósmica.

Referencias

- Bateson, G. (1998). *Pasos hacia una ecología de la mente*. Lohlé-Lumen.
- Bautista Segales, J.J. (2018). *Dialéctica del fetichismo de la modernidad. Hacia una teoría crítica del fetichismo de la racionalidad moderna*. Yo soy si Tú eres Ediciones.
- Boff, L. (2002). *El cuidado esencial. Ética de lo humano, compasión por la Tierra*. Editorial Trotta.
- Calvo Muñoz, C. (2012). *Del mapa escolar al territorio educativo. Diseñando la escuela desde la educación*. Editorial Universidad de la Serena.
- Capra, F. (1999). *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama.
- Capra, F. (2007). *Ecoalfabeto: el huerto en la escuela. El desafío de la educación del siglo actual*. Revista Namaste.
- Capra, F. (2017). *El tao de la física*. Editorial Sirio.
- Clark, E.T. (1997). Ecoeducación: una estrategia para reestructurar la educación. En R. Gallegos Nava (Comp.), *El destino indivisible de la educación. Propuesta holística para redefinir el diálogo humanidad-naturaleza en la enseñanza* (pp. 71-117). Editorial Pax.

- De Zubiría Samper, J. (2001). *De la Escuela Nueva al Constructivismo. Un análisis crítico*. Cooperativa Editorial Magisterio.
- Dussel, E. (1996). *Filosofía de la liberación*. Editorial Nueva América.
- Dussel, E. (1998). *Ética de la liberación en la edad de la globalización y de la exclusión*. Editorial Trotta.
- Dussel, E. (2025). *Hacia una teoría de la modernidad/colonialidad. La descolonización epistemológica*. Akal.
- Escobar, A. (2014). *Sentipensar con la tierra. Nuevas lecturas sobre desarrollo, territorio y diferencia*. UNAULA.
- Frankl, V. (1991). *El hombre en busca de sentido*. Herder.
- Freire, P. (1985). *Pedagogía del oprimido*. Siglo XXI Editores.
- Goleman, D., Bennett, L. y Barlow, Z. (2013). *Ecoeducación. Educadores implicados en el desarrollo de la inteligencia emocional, social y ecológica*. Editorial Juventud.
- Grosfoguel, R. (2010). *La descolonización de la economía política*. Universidad Libre Seccional Bogotá.
- Grosfoguel, R. (2018). La compleja relación entre modernidad y capitalismo: una visión descolonial. *Pléyade: Revista de Humanidades y Ciencias Sociales*, (21), 29-47. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-36962018000100029>
- Guattari, F. (1996). *Las tres ecologías*. Pre-Textos.
- Guattari, F. (2015). ¿Qué es la ecosofía? *Textos presentados y agenciados por Stéphane Nadaud*. Cactus.
- Guba, E. y Lincoln Y.S. (2002). Paradigmas en competencia en la investigación cualitativa. En C. Denman y J.A. Haro, *Por los rincones. Antología de métodos cualitativos en la investigación social* (pp. 113-145). El Colegio de Sonora.
- Hinkelammert, F. (s.f.). *El ser humano como ser supremo para el ser humano. Más allá de la religión neoliberal del mercado*. Colecciones virtuales UCA. <https://coleccion.uca.edu.sv/files/original/9aa8b-6d702ae4935d2c520c2e632af0e54dbbadc.pdf>
- Hinkelammert, F. y Mora Jiménez, H. (2025). *Economías para la vida*. Imprenta Nacional de Colombia.
- Kowii, A. (s.f.). *El Sumak Kawsay*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/esa/socdev/unpfii/documents/EI%20Sumak%20Kawsay-ArirumaKowii.pdf>
- Kuhn, T.S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica.
- Lakatos, I. (1989). *La metodología de los programas de investigación científica*. Alianza Editorial.
- Leff, E. (2018). *El fuego de la vida. Heidegger ante la cuestión ambiental*. Siglo XXI Editores.
- Martínez Miguélez, M. (1997). *El paradigma emergente. Hacia una nueva teoría de la racionalidad científica*. Trillas.

- Maturana R., H. y Varela G., F. (1984). *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del entendimiento humano*. Lumen/Editorial Universitaria.
- Mignolo, W. (2010). *Desobediencia epistémica. Retórica de la modernidad, lógica de la colonialidad y gramática de la descolonialidad*. Ediciones del Signo.
- Mora Fausto, J.L. (2021). *Matriz Epistémica de la Ecoeducación desde el Sur. Mediación a una ecosofía educativa* [Tesis de doctorado no publicada]. Instituto Universitario Puebla, extensión Morelia.
- Morin, E. (1999). *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000117740_spa
- Naess, A. (1973). The shallow and the deep, long-range ecology movement. A summary. *Inquiry. An Interdisciplinary Journal of Philosophy*, 16(1-4), 95-100.
- Padilla Llano, S.E. (2019). *Ensayo sobre el concepto de comunidad*. Repositorio institucional de la Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/862671c0-925d-47b4-8df5-6bc-8d7c8c9e7>
- Pupo, R. (2013). Ecosofía, cultura, transdisciplinariedad. *Big Bang Faustiano*, 2(4), 3-9. https://www.academia.edu/104400207/Ecosof%C3%ADa_cultura_transdisciplinariedad
- Santos, B. de S. (2017). *Justicia entre saberes: Epistemologías del Sur contra el epistemicidio*. Ediciones Morata S.L.
- Santos, B. de S. (2019a). *El fin del imperio cognitivo. La afirmación de las epistemologías el Sur*. Trotta Editorial.
- Santos, B. de S. (2019b). Introducción a las Epistemologías del Sur. En B. de Sousa Santos, *Construyendo las Epistemologías del Sur. Para un pensamiento alternativo de alternativas (Volumen 1)* (pp. 303-342). CLACSO. <https://doi.org/10.2307/j.ctvt6rmq3.11>
- Santos, B. de S. (2021). *Descolonizar la Universidad: el desafío de la justicia cognitiva global*. CLACSO. https://www.jstor.org/content/pdf/oa_book_monograph/j.ctv2v88cjw?refreqid=fastly-default%3Ac8fba775327622f0386274385dbbdc63&ab_segments=&initiator=&acceptTC=1
- Sepúlveda Pizarro, J. (2017). Ecosofía: hacia una comprensión de la sabiduría de la tierra desde la noción de *ritmo del ser* de Raimon Panikkar. *Ilú. Revista de Ciencias de las Religiones*, 23, 263-278.

Fundamentos moleculares para el uso de RNAi vía SIGS en el control de *Fusarium*

Molecular foundations for the use of RNAi via SIGS in the control of Fusarium

Lizbeth Jazmín Moreno Alegría¹ 

Jorge Adrián Cirilo Reyes¹ 

Estefania Arellano Ordoñez² 

Fernando Olvera Martínez² 

Ileri Alejandra Carbajal Valenzuela¹ 

Christopher Alexis Cedillo Jiménez^{2*} 

*c.cedilloc@gmail.com

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

²Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Querétaro, México

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2067

Fecha de recepción: 4 de noviembre del 2025

Fecha de aceptación: 16 de abril del 2026

Resumen

El control de *Fusarium* spp. representa un reto fitosanitario a nivel global debido a su amplia gama de hospederos y su persistencia en el suelo. Este trabajo tiene como objetivo analizar los fundamentos biológicos y tecnológicos que sustentan el uso de RNA interferente como alternativa al uso de fungicidas convencionales, en particular la estrategia de aspersión de RNA. Se examinaron mecanismos moleculares de infección y silenciamiento génico, así como criterios de diseño de RNA con potencial interferente con base en la accesibilidad estructural, el sesgo de nucleótidos y la asimetría termodinámica. La metodología consistió en una revisión de literatura científica, con énfasis en estudios acerca de mecanismos moleculares de infección, silenciamiento génico y criterios de diseño de RNA con potencial interferente, complementada con el análisis de propuestas experimentales reportadas sobre su aplicación por aspersión. Las estrategias basadas en el silenciamiento génico ofrecen ventajas frente a los métodos tradicionales por su especificidad y menor impacto ambiental, aunque presentan limitaciones asociadas a la variabilidad genética, las condiciones ambientales y los marcos regulatorios. Se concluye que la

integración de criterios de diseño molecular con conocimientos ecológicos del patógeno permitirá avanzar hacia estrategias más robustas y sostenibles de control.

Palabras clave: fungicidas, RNAi, SIGS, siRNA

Abstract

Control of Fusarium spp. is recognized as a global phytosanitary challenge due to its broad host range and persistence in soil. This work is aimed at analyzing the biological and technological foundations that support the use of RNA interference as an alternative to conventional fungicides, particularly spray-based RNA delivery. Molecular mechanisms of infection and gene silencing were reviewed, and RNA design criteria with interference potential were considered on the basis of structural accessibility, nucleotide bias, and thermodynamic asymmetry. The methodology consisted of a review of scientific literature, with emphasis on molecular mechanisms of infection, gene silencing, and RNA design criteria with interference potential, complemented by the analysis of reported experimental spray-based application. Gene-silencing strategies are presented as offering advantages over traditional methods because of their specificity and lower environmental impact, although limitations associated with genetic variability, environmental conditions, and regulatory frameworks were acknowledged. It is concluded that integrating molecular design criteria with ecological knowledge of the pathogen will enable progress toward more robust and sustainable control strategies.

Keywords: fungicides, RNAi, SIGS, siRNA

Introducción

Las enfermedades causadas por hongos representan uno de los principales desafíos en la agricultura y en la seguridad alimentaria global, ya que afectan el rendimiento de los cultivos, la calidad de los productos y la salud de los consumidores. Se estima que el 70% de las enfermedades en las plantas son causadas por hongos o agentes patógenos similares. Dentro del grupo de hongos, el género *Fusarium* está compuesto por varias especies fitopatógenas responsables de una gran variedad de enfermedades en cultivos como trigo, maíz, cebada, plátano y aguacate. Estas especies ocasionan patologías como marchitez vascular, podredumbre de raíz y tallo, y contaminación de granos, con consecuencias en la productividad agrícola (Koch et al., 2019). Además, algunas producen micotoxinas como tricotecenos, fumonisinas y zearalenona, que amenazan la salud humana y animal (Ekwomadu et al., 2020).

El impacto del género *Fusarium* no solamente afecta el ámbito fitosanitario, sino también de manera importante la estabilidad económica de los sistemas agrícolas. Las pérdidas relacionadas con la reducción del rendimiento y la calidad de los productos, así como con las restricciones comerciales por la contaminación por micotoxinas, perjudican la economía y la seguridad alimentaria internacional. Por ello, es considerado uno de los hongos más devastadores para los cultivos en la mayor parte del mundo, especialmente en Asia, África, Estados Unidos, Europa y Australia (Ekwomadu y Mwanza, 2023).

El objetivo de este artículo es analizar los fundamentos biológicos y tecnológicos que sustentan el uso de RNA interferente (RNAi), en particular mediante la estrategia SIGS (“silenciamiento génico inducido por pulverización”, por sus siglas en inglés), como alternativa emergente para el control de *Fusarium*. Con este fin, se revisan los métodos de control convencionales y se profundiza en los principios moleculares, criterios de diseño y consideraciones experimentales asociados a esta tecnología.

Metodología

Para llevar a cabo esta revisión se realizó una consulta bibliográfica en los motores de búsqueda científica Google Scholar y PubMed, empleando combinaciones de palabras clave en inglés: *Fusarium*, RNA interference, RNAi, SIGS, HIGS, dsRNA y siRNA. Se priorizaron artículos de investigación y revisión publicados en los últimos diez años, salvo artículos clásicos necesarios para el marco conceptual. Principalmente se consideraron aquellos enfocados en mecanismos moleculares de infección, silenciamiento génico, diseño de RNA interferente y aplicaciones experimentales para el control de *Fusarium* spp.

Biología de *Fusarium* relevante para el control biológico

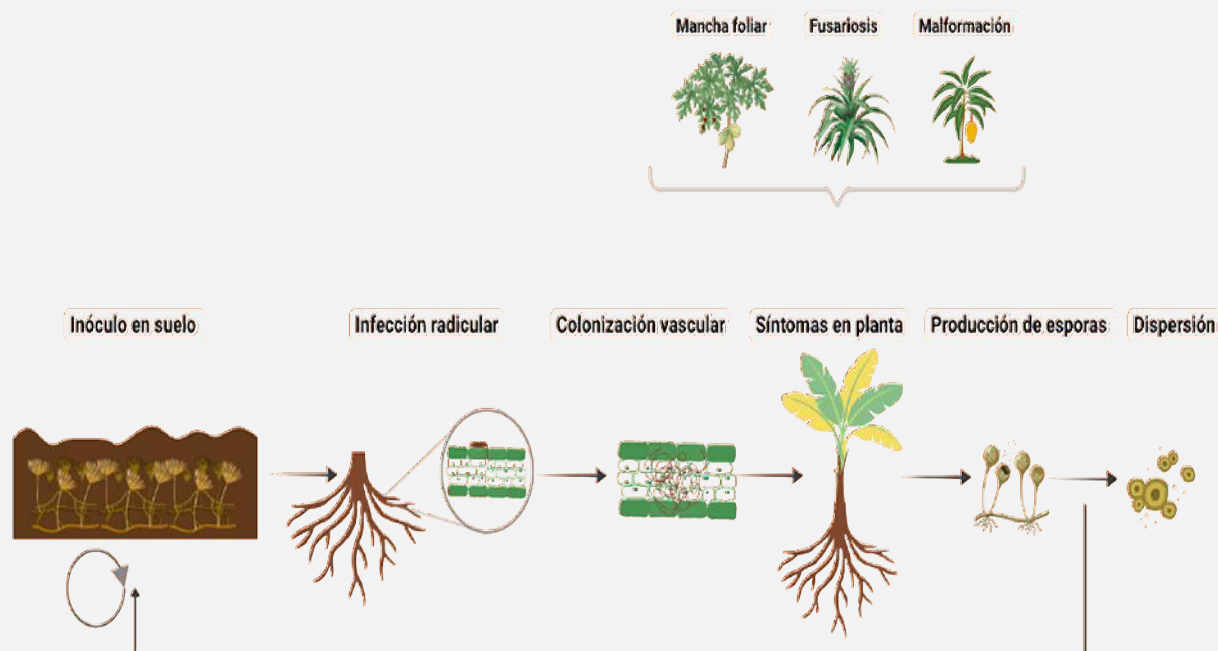
Los hongos del género *Fusarium* presentan un ciclo de vida complejo que incluye fases de supervivencia en el suelo, infección del hospedante y esporulación, el cual les permite persistir durante largos periodos, incluso ante condiciones ambientales adversas y la ausencia de hospederos, y causar infecciones recurrentes en distintos cultivos (Huang *et al.*, 2015). Cuando la planta hospedante muere, las raíces infectadas con el hongo se descomponen y pueden permanecer como micelio latente, asociadas a semillas infectadas o liberar esporas que se dispersan en el suelo, alcanzan nuevos hospedantes y reinician el ciclo; estas estructuras constituyen el principal inóculo primario que inicia infecciones cuando las condiciones del entorno son favorables (Yan *et al.*, 2023).

La infección empieza cuando las clamidosporas o conidios presentes en el suelo germinan en respuesta a la humedad y la presencia de raíces susceptibles. Las hifas emergentes penetran los tejidos vegetales, principalmente a través de la punta de las raíces o de pequeñas heridas. Una vez dentro, el hongo coloniza el xilema, desde donde crece hacia la parte aérea de la planta, bloqueando el transporte de agua y nutrientes (Leslie y Summerell, 2006). A lo largo de este proceso, el patógeno puede producir micotoxinas (como fumonisinas, zearalenona o tricotecenos) que contribuyen a la marchitez, necrosis y muerte del hospedante (Bakker *et al.*, 2018).

Los hongos del género *Fusarium* tienen la facultad de vivir como saprofitos o patógenos. Estas especies infectan tanto la parte aérea como subterránea de la planta y se dispersan mediante conidios por el aire y agua de lluvia o riego, y clamidosporas que pueden permanecer en el suelo y restos vegetales por largo tiempo sin perder su viabilidad. *Fusarium* es un patógeno hemibiótrofo versátil, capaz de iniciar infecciones en raíces, heridas o por vía aérea, y afectar numerosos cultivos agrícolas a gran escala (Zakaria, 2023). En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso de infección por diferentes medios.

Figura 1. Ciclo de infección de *Fusarium*

Génesis por la propagación de conidios



Fuente: elaboración propia

Elementos que favorecen el proceso de infección

La supervivencia y patogenicidad del género *Fusarium* dependen de diversos elementos biológicos que aseguran su integridad celular y su capacidad de infección. Entre ellos, destaca la síntesis de ergosterol, componente esencial de la membrana plasmática fúngica que regula la fluidez, permeabilidad y estabilidad estructural de la célula (Fan *et al.*, 2013). Este proceso está mediado por las enzimas del citocromo P450 lanosterol C-14 α -desmetilasa (*CYP51A/B/C*), codificadas por los genes *FgCYP51*, cuya inhibición afecta directamente la viabilidad del hongo y constituye el principal blanco de los fungicidas azólicos (Koch *et al.*, 2013). Además de su función estructural, el ergosterol contribuye a la tolerancia frente al estrés oxidativo y a la integridad del sistema de transporte de membrana, factores claves para la supervivencia del patógeno en condiciones ambientales adversas (Wang *et al.*, 2022).

Para impulsar su virulencia, *Fusarium* produce una amplia gama de enzimas hidrolíticas que facilitan la degradación de la pared celular vegetal, favoreciendo la penetración y colonización de los tejidos del hospedante, mientras que la síntesis de micotoxinas interfiere en la fisiología vegetal y ocasiona necrosis y marchitez (Zuriegat *et al.*, 2021; Koch *et al.*, 2013). Otros factores, como las proteínas efectoras secretadas durante la interacción huésped-patógeno, modulan las respuestas inmunitarias de la planta y facilitan el establecimiento del hongo (Wang *et al.*, 2022). En conjunto, estos mecanismos bioquímicos y moleculares permiten a *Fusarium* mantener su viabilidad en el ambiente, evadir las defensas del hospedante y asegurar la continuidad de su ciclo infeccioso (Fan *et al.*, 2013).

Resistencia a fungicidas y consecuencias agronómicas

La resistencia a los fungicidas se define como la reducción hereditaria de la sensibilidad de una población fúngica a una sustancia química específica, de modo que el patógeno puede desarrollarse en presencia de un agente que antes habría inhibido su crecimiento. Esta resistencia no surge necesariamente como consecuencia directa de la exposición al fungicida, sino que puede estar presente de forma natural dentro de la variabilidad genética de la población. Así, el uso constante o repetitivo de compuestos con el mismo mecanismo de acción actúa como una presión selectiva que favorece la supervivencia y proliferación de genotipos previamente resistentes, incrementando su frecuencia en la población (Yin *et al.*, 2023).

Los mecanismos de resistencia a fungicidas se dividen en dos grupos principales: resistencia en el sitio diana y resistencia fuera del sitio diana; asimismo, la evolución genética y

la epigenética también tienen un papel importante. La resistencia en el sitio diana consiste en mutaciones puntuales o la sobreexpresión de genes que codifican las proteínas que el fungicida afecta, mientras que la resistencia fuera del sitio diana consta de procesos más complejos, como la desintoxicación metabólica, la reducción de la absorción y la sobreexpresión de transportadores de eflujo activo, es decir, la expulsión del fungicida fuera de la célula mediante transportadores de membrana (Alkemade *et al.*, 2025). Estos procesos implican un gran desafío para la producción agrícola, ya que la pérdida de eficacia de los compuestos químicos puede conducir a un control insuficiente del patógeno, con el consecuente incremento en la severidad de la enfermedad y los costos de producción, así como la reducción del rendimiento. El panorama se agrava con el uso indiscriminado de agroquímicos y la falta de alternativas sostenibles y eficaces.

Uno de los mecanismos de resistencia más comunes en *Fusarium* frente a los fungicidas DMI (triazoles) involucra mutaciones y la sobreexpresión del gen *CYP51A*. Las mutaciones pueden modificar la estructura de la enzima diana y reducir la afinidad del fungicida por su sitio de acción, mientras que la sobreexpresión incrementa la cantidad de enzima disponible y disminuye la eficacia inhibitoria del compuesto. Estos mecanismos también pueden coexistir con procesos adicionales que contribuyen al fenotipo de resistencia (Alkemade *et al.*, 2025).

Desarrollo tecnológico para el control de *Fusarium*

Prácticas culturales como manejo fitosanitario

Las prácticas culturales constituyen una base sólida para la reducción del inóculo de *Fusarium* en sistemas hortícolas intensivos. Por ejemplo, la rotación en cultivos que no hospeden el patógeno o con periodos de descanso puede aminorar de manera considerable la población edáfica de *Fusarium* antes del trasplante del cultivo susceptible (Hong *et al.*, 2023). La solarización del suelo (cubrir el suelo con plástico transparente durante los meses cálidos para elevar la temperatura y disminuir el inóculo) ha demostrado ser especialmente efectivo. Así lo evidencia un estudio reciente en hoja de lechuga, donde se reportó como el método más eficiente para reducir *F. oxysporum* y *F. equiseti* (Tziros *et al.*, 2024).

Variedades agrícolas resistentes a *Fusarium*

El uso de variedades resistentes ha sido una de las estrategias más rentables en el manejo de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) en tomate. Chitwood-Brown *et al.* (2021) documentan cómo, durante más de un siglo, los mejoradores

han incorporado genes R (por ejemplo, *I*, *I*-2, *I*-3) procedentes de especies silvestres de tomate para conferir resistencias a cepas específicas de Fol.

En plátano, el manejo de *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), incluyendo la Tropical Race 4 (TR4), ha impulsado programas de mejoramiento que utilizan cultivares resistentes y genes provenientes de parientes silvestres, aunque su eficacia depende del material genético (Kedir *et al.*, 2025; Fang *et al.*, 2023).

Para el caso de las leguminosas, se han identificado nuevas fuentes de resistencia a *F. oxysporum* f. sp. *phaseoli* en el frijol común, lo cual favorece el desarrollo de líneas menos susceptibles (Leitão *et al.*, 2020). En cucurbitáceas (melón, sandía) también se han descrito genes y programas de selección para generar resistencias a distintas cepas de *F. oxysporum* f. sp. *melonis*, si bien en la mayoría de los casos la resistencia es poligénica o parcial, lo que restringe su durabilidad (Sandlin y Webb, 2021; Schmidt *et al.*, 2015). Sin embargo, la eficacia de esta estrategia se ve limitada por la aparición de nuevas cepas del patógeno. Al respecto, Swett *et al.* (2023) indican que la resistencia introducida puede durar aproximadamente una década antes de que aparezca una nueva cepa que la supere.

Fungicidas químicos sintéticos y control biológico

El uso de fungicidas sintéticos contra hongos patógenos de importancia agrícola se estableció como práctica común hacia finales de la década de los sesenta, cuando compuestos como los benzimidazoles y derivados de ditiocarbamatos representaron un gran avance para la protección de cultivos gracias a su alta y rápida eficacia. Sin embargo, estas mismas ventajas llevaron a su empleo desmedido y, por ende, a problemas de resistencia. Así, para 1971 se documentaron cepas resistentes en poblaciones de hongos como *Botrytis cinerea*, lo cual evidenció que las estrategias basadas en una sola clase de fungicidas y el exceso de químicos no eran sostenibles. Luego, se descubrió que la resistencia provino de una mutación en el gen de la β -tubulina, que no afectaba la viabilidad del hongo, por lo que las cepas permanecían en campo por años, situación que mostró con claridad los límites del manejo químico (Hahn, 2014).

Ante estos desafíos, surgen alternativas a través del biocontrol con microorganismos antagonistas como *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp., que aminoran la población del patógeno en el suelo y la planta mediante la competencia, antibiosis y estimulación de defensas en esta última (Yao *et al.*, 2023). Estas acciones representan una opción sostenible frente al uso intensivo de fungicidas químicos para el control de *Fusarium*;

sin embargo, también poseen restricciones que es importante considerar. La eficacia de estos agentes biológicos puede variar debido a factores edáficos, ambientales y genéticos, lo cual se traduce en resultados inconsistentes entre las condiciones controladas y las de campo (Khan *et al.*, 2018). Además, aunque contribuyen a reducir la severidad de la enfermedad, no siempre logran eliminar completamente el inóculo ni controlar las micotoxinas o los efectos sistémicos asociados al patógeno (Bubici *et al.*, 2019). Si bien dichas limitaciones no le restan relevancia a esta aplicación, exhiben la necesidad de desarrollar un abanico de estrategias para el control de *Fusarium*.

Transición a biotecnologías y control molecular para el control de *Fusarium*

RNAi vía HIGS y SIGS

En los últimos años, en el manejo de *Fusarium* se han incorporado estrategias basadas en el silenciamiento génico mediante RNA de interferencia (RNAi) como alternativa prometedora frente al uso de fungicidas químicos convencionales. Entre estas destacan dos enfoques principales: el silenciamiento génico inducido por el huésped (HIGS, por sus siglas en inglés) y el silenciamiento génico inducido por pulverización (SIGS, por sus siglas en inglés).

El enfoque HIGS consiste en generar plantas transgénicas que expresan dsRNA procesado en moléculas siRNA capaces de silenciar genes esenciales del hongo durante la infección, con el fin de reducir su virulencia y la producción de micotoxinas (Nowara *et al.*, 2010). Por su parte, SIGS ofrece una alternativa no transgénica al aplicar dsRNA en la superficie foliar, de manera análoga a los pesticidas convencionales, lo cual permite que las moléculas sean absorbidas por la planta o directamente por el patógeno, y se induzca así el silenciamiento génico (Koch *et al.*, 2019).

Ambas estrategias se basan en el fenómeno RNAi y destacan por su alta especificidad y su potencial para reducir el impacto negativo de los métodos convencionales sobre el metabolismo vegetal. Sin embargo, la duración y consistencia del efecto de silenciamiento pueden variar según el sistema biológico y las condiciones de aplicación. En particular, en SIGS el efecto suele ser transitorio y depende de la estabilidad del dsRNA en el ambiente, de su captación por el patógeno o la planta y, en algunos casos, de la capacidad del organismo para amplificar la señal interferente (Koch *et al.*, 2019; Akbar *et al.*, 2022).

Asimismo, estos enfoques presentan limitaciones relevantes: en el caso de HIGS, el uso de plantas transgénicas implica regulaciones estrictas, procesos de aprobación prolongados

y altos costos, además de una baja aceptación pública en varias regiones, lo que dificulta su adopción a gran escala (Sang y Kim, 2019). SIGS, en cambio, representa una alternativa no transgénica que puede reducir algunas barreras regulatorias asociadas al uso de organismos genéticamente modificados, pero aún se requiere su evaluación de bioseguridad. La comparación entre estas dos tecnologías se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1
Comparación entre las estrategias HIGS
y SIGS para el control de *Fusarium*

Características	HIGS (Host-Induced Gene Silencing/silenciamiento génico inducido por el huésped)	SIGS (Spray-Induced Gene Silencing/silenciamiento génico inducido por pulverización)
Tipo de estrategia	Molecular transgénica	Molecular no transgénica
Mecanismo	Se integra genéticamente en el genoma vegetal bajo el control de promotores específicos	Se sintetiza <i>in vitro</i> y se aplica mediante pulverización o formulaciones con nanopartículas
Longitud del dsRNA	Puede influir en la eficiencia del silenciamiento, aunque su efecto depende del diseño de la construcción y del sistema vegetal empleado	Influye en la eficacia, pero no existe un tamaño óptimo universal. Suele utilizarse dsRNA de varios cientos de nucleótidos, y su desempeño depende también de la estabilidad, captación y procesamiento
Duración del efecto de silenciamiento	Puede ser más prolongado que en SIGS, pero su eficacia depende del sistema de expresión, del procesamiento intracelular del RNA y del cultivo empleado	Generalmente es transitorio; depende de la estabilidad del dsRNA en el ambiente y de su captación efectiva
Ventajas	Permite un silenciamiento potencialmente duradero. La especificidad depende de la secuencia diseñada	No requiere modificación genética y permite una aplicación flexible. La especificidad depende de la secuencia diseñada

Limitaciones	Requiere plantas genéticamente modificadas, está sujeto a regulaciones estrictas y depende de una construcción genética capaz de producir hpRNA o dsRNA en el tejido adecuado	Tiene un efecto menos estable, es posible que el dsRNA sufra degradación ambiental y requiere de aplicaciones repetidas
--------------	---	---

Fuente: elaboración propia (2026), con base en Das y Sherif (2020), Doggalli *et al.* (2024), Höfle *et al.* (2019), Koch *et al.* (2019) y Qiao *et al.* (2023)

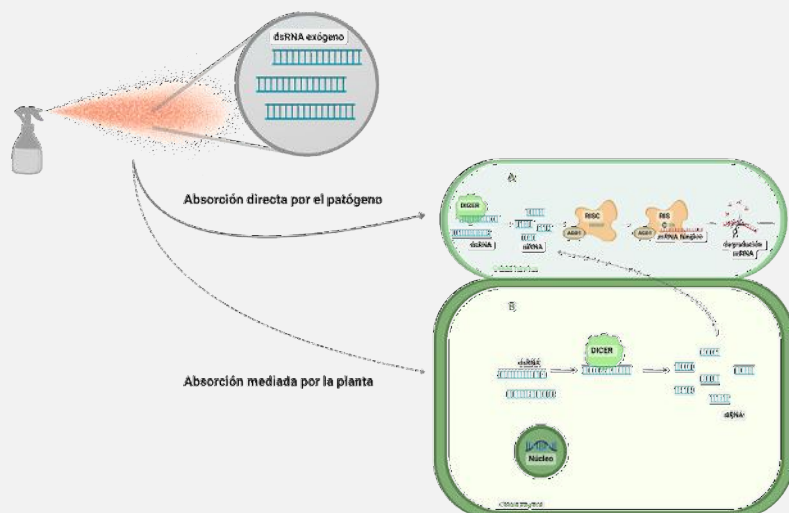
SIGS como alternativa tecnológica basada en RNAi

Como se mencionó anteriormente, SIGS representa una alternativa no transgénica con ventajas regulatorias. Uno de sus principales beneficios es que ofrece una vía más rápida de implementación comparada con el uso de organismos genéticamente modificados (vía HIGS), cuya aprobación está sujeta a marcos regulatorios estrictos y largos procesos de experimentación, además de que la percepción pública de los cultivos transgénicos ha limitado su adopción. Por otra parte, en algunos contextos, el uso exógeno de dsRNA en estrategias como SIGS ha sido considerado como una alternativa con menor complejidad regulatoria que los enfoques transgénicos. Sin embargo, su evaluación debe considerar tanto la especificidad de secuencia como los posibles efectos en organismos no objetivo y su comportamiento en condiciones ambientales reales (Chen *et al.*, 2025; De Schutter *et al.*, 2022).

En la Figura 2 se ilustra el mecanismo de RNAi por SIGS mediante dos posibles rutas: la absorción directa de dsRNA por el hongo, donde es procesado por la enzima DICER, generando siRNAs que silencian genes esenciales; y la absorción por las células de la planta, que procesan el dsRNA y exportan los siRNAs al patógeno, activando la respuesta de silenciamiento génico (Ray *et al.*, 2022).

Figura 2. Mecanismo de RNAi en un hongo patógeno vía SIGS

El dsRNA puede ser absorbido directamente por el patógeno o mediado por la planta



Fuente: elaboración propia

La aplicación foliar de dsRNA ha demostrado ser eficaz para atacar genes de virulencia, el desarrollo o funciones vitales en hongos fitopatógenos (Chen *et al.*, 2025). En ese sentido, el trabajo de Koch *et al.* (2016) es pionero, pues plantea que la aspersión de un dsRNA de 791 nucleótidos dirigido a tres genes (*CYP51A*, *CYP51B* y *CYP51C*) permitió controlar *Fusarium graminearum* en cebada al afectar la biosíntesis de ergosterol en el hongo, el cual es un componente clave de la membrana celular fúngica y blanco de muchos fungicidas químicos. En este trabajo se reporta que la aspersión de dicho dsRNA genera siRNAs que degradan eficazmente los mRNA fúngicos, reduciendo el crecimiento y la infección.

Se han registrado múltiples dsRNA dirigidos contra *Fusarium* spp. en distintos cultivos, incluyendo cebada, trigo y tomate, con potencial de un uso cruzado entre especies vegetales (Chen *et al.*, 2025). En la Tabla 2 se muestran cepas de *Fusarium* que han sido tratadas por SIGS de manera exitosa. Esta evidencia fortalece la SIGS como una estrategia de control de *Fusarium* de aplicación flexible y compatible con marcos regulatorios menos restrictivos que los correspondientes a las opciones transgénicas.

Tabla 2

Cepas de *Fusarium* spp. tratadas por SIGS

Hongo patógeno	Enfermedad que causa	Cultivo hospedero	Gen o genes blanco	Efecto y resultado	Referencia
<i>Fusarium graminearum</i>	Fusariosis de la espiga (FHB)	Trigo y cebada	<i>Fg-CYP51A</i> , <i>Fg-CYP51B</i> , <i>Fg-CYP51C</i>	Reduce el crecimiento del hongo y reduce la severidad de FHB	Koch <i>et al.</i> (2016)
<i>Fusarium graminearum</i>	FHB	Cebada	<i>Fg10360</i> , <i>Fg13150</i> , <i>Fg06123</i>	Reduce el desarrollo de la enfermedad	Kim <i>et al.</i> (2023)
<i>Fusarium asiaticum</i>	----	Múltiples cultivos	$\beta 1, \beta 2$ - <i>tubulin</i>	Ofrece un silenciamiento efectivo y promueve la sensibilidad del hongo	Gu <i>et al.</i> (2019)
<i>Fusarium oxysporum</i>	Marchitez	Tomate y plátano	<i>Fg-ERG11</i>	Reduce el crecimiento del hongo y los síntomas de marchitez	Singh <i>et al.</i> (2020)
<i>Fusarium oxysporum</i>	Marchitez	Tomate	<i>Tup1</i>	Reduce los síntomas de marchitez	Fan <i>et al.</i> (2024)

Fuente: elaboración propia (2026)

Aunque el principio general de SIGS puede describirse de forma sencilla como la aplicación externa de RNA para silenciar genes del patógeno, su implementación efectiva depende de varias decisiones de diseño molecular. A continuación, se resumen los aspectos más relevantes de ese proceso con un enfoque conceptual, a fin de mostrar cómo las propiedades de las moléculas interferentes influyen en su desempeño biológico.

Consideraciones
para el diseño de RNAi
vía SIGS en el control
de *Fusarium*

En términos generales, las moléculas de RNAi deben reconocerse de manera específica con transcritos esenciales del hongo y, al mismo tiempo, mantener características estructurales que favorezcan su procesamiento por la maquinaria celular asociada al RNAi. Si bien existen múltiples variantes, en esta revisión se

enfatisa en formatos de dsRNA y siRNA comúnmente utilizados en estudios experimentales por su compatibilidad con los mecanismos canónicos de silenciamiento génico.

Componentes básicos de la maquinaria de RNAi

Para que una estrategia basada en RNAi funcione en *Fusarium*, es importante que el hongo conserve la maquinaria molecular mínima asociada al silenciamiento génico, principalmente las proteínas tipo DICER y AGO. Estas participan en el procesamiento del dsRNA y en el reconocimiento del RNA mensajero diana, por lo que su presencia sugiere que el patógeno puede responder a moléculas diseñadas para interferir con genes esenciales.

En especies de *Fusarium* se ha reportado la presencia de proteínas tipo DICER y AGO, lo que respalda la factibilidad biológica de este enfoque. No obstante, la eficiencia del silenciamiento puede variar entre especies, cepas y formatos de RNA aplicados, por lo que esta compatibilidad debe considerarse al diseñar estrategias de control (Koch *et al.*, 2016; Werner *et al.*, 2021).

Selección del sitio diana en el mRNA e interacción con el siRNA candidato

Un paso primordial en el diseño de moléculas interferentes consiste en seleccionar genes diana cuya inhibición afecte los procesos esenciales del patógeno, como su crecimiento, virulencia, síntesis de membrana o capacidad de infección. En el caso de *Fusarium*, diversos transcritos asociados a estas funciones ya han sido evaluados experimentalmente, como se resume en la Tabla 2.

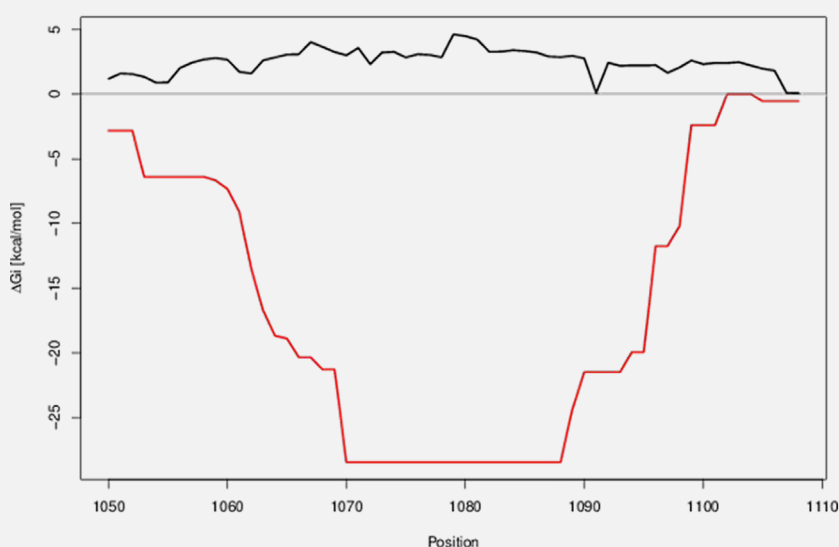
La eficacia del silenciamiento no depende solo del gen seleccionado, sino también de la región específica del transcrito a la que se dirige la molécula de RNA. En general, se prefieren regiones accesibles y con menor probabilidad de formar estructuras secundarias complejas, ya que ello favorece el reconocimiento entre el RNA interferente y el RNA mensajero blanco. Además, se consideran propiedades de secuencia y estabilidad del dúplex, debido a que estas influyen en la incorporación de la hebra guía a los complejos de silenciamiento (Filhol *et al.*, 2012).

Una forma de respaldar esta selección es utilizar herramientas bioinformáticas que permitan estimar la accesibilidad estructural, afinidad de unión y especificidad potencial. Estos análisis no representan la única estrategia de diseño, pero sí constituyen una aproximación útil para priorizar los candidatos con una alta probabilidad de tener una interacción efectiva con el transcrito diana (Gruber *et al.*, 2008). En la Figura 3 se muestra la energía libre de Gibbs en la interacción entre el mRNA blanco y el siRNA, donde la línea negra es la energía de apertura del mRNA que se espera que sea muy cercana a 0, y en rojo se

observa la energía de interacción del siRNA con el mRNA. En la región de interacción, los valores más negativos de energía libre sugieren una unión potencialmente más estable entre el siRNA y el mRNA blanco.

Figura 3. Ejemplo de gráfico de energía de interacción

Se muestra la energía libre de interacción (rojo) y la energía que se requiere para abrir estructuras existentes en la secuencia más larga (negro) para la región objetivo (arriba) y todo el rango (abajo). De manera resumida, el gráfico permite identificar regiones accesibles y con alta afinidad de unión, lo que aumenta la probabilidad de que el siRNA diseñado funcione de manera correcta



Fuente: creada con The ViennaRNA Web Services
(<http://rna.tbi.univie.ac.at/index.html>)

Otro criterio significativo es la especificidad, de manera que los candidatos seleccionados deben contrastarse frente a transcriptomas de la planta hospedera y de organismos no blanco, con la finalidad de reducir los posibles efectos fuera de objetivo. Este aspecto posee especial relevancia en el contexto agrícola, donde la seguridad biológica es igual de esencial que la eficacia del control (Dai y Zhao, 2011). En conjunto, el diseño de siRNA requiere integrar criterios de la selección del gen diana, la accesibilidad estructural, la afinidad de interacción y la especificidad potencial. Se debe entender que ninguno de estos parámetros por sí solos garantizan el silenciamiento, pero su evaluación combinada mejora la probabilidad de obtener candidatos funcionales.

Síntesis del RNA para la conformación de dsRNA

Es posible producir dsRNA por distintos medios, incluidos métodos de síntesis química, plataformas enzimáticas y sistemas libres de células (Hough *et al.*, 2022). La elección del método depende de factores como la pureza, el rendimiento, el costo y la escala de producción. En etapas iniciales de validación experimental suele priorizarse la obtención de moléculas con suficiente calidad y estabilidad para confirmar el efecto interferente, mientras que en fases posteriores cobran mayor importancia aspectos como la formulación, el escalamiento y la protección frente a la degradación ambiental (Chiu y Rana, 2003; Czauderna *et al.*, 2003; Elmén *et al.*, 2008). En esta revisión no se abordan con detalle las estructuras protectoras orientadas a mejorar la estabilidad durante la aplicación, debido a que el énfasis de esta sección se centra en la validación inicial del efecto interferente.

Evaluación del efecto interferente

La evaluación del efecto interferente requiere preparar y aplicar las moléculas de RNA bajo condiciones compatibles con el sistema experimental, considerando la longitud del dsRNA, su concentración de trabajo y el método de aplicación. En etapas iniciales, puede realizarse tanto en sistemas *in vitro* como en tejidos vegetales o semillas, según el objetivo del ensayo y el nivel de desarrollo de la planta. La eficacia del tratamiento se estima a partir de la disminución de los síntomas de infección o del crecimiento del patógeno, y sus efectos deben cuantificarse mediante variables fenotípicas y moleculares apropiadas (Cedillo-Jiménez *et al.*, 2024).

La validación experimental debe integrar observaciones fenotípicas y mediciones moleculares obtenidas a través de ensayos dosis-respuesta con diferentes concentraciones, controles adecuados, réplicas biológicas suficientes y muestreos racionales según la fenología y la cinética del patógeno. En la Figura 4 se muestran dos cultivos de *Fusarium* spp.: el tratamiento control se inoculó en medio PDA, mientras que en el de la fotografía derecha se empleó siRNA diseñado para inhibir *CYP51A*, con lo cual disminuyó el desarrollo del hongo fitopatógeno.

Figura 4. Observaciones fenotípicas de *Fusarium* al ser tratado con siRNA

En el tratamiento control de *Fusarium* se aprecia un abundante crecimiento de micelio en condiciones óptimas y una textura algodonosa blanca, rasgos típicos de un buen desarrollo. A su vez, en el tratamiento con siRNA se demuestra su efecto interferente mediante el poco crecimiento de micelio observado, con una textura blanda y viscosa



Fuente: elaboración propia

Las observaciones fenotípicas podrían consistir en cuantificar los síntomas de infección y severidad en la planta, y buscar un gradiente dosis-respuesta consistente. Paralelamente, se debe cuantificar la abundancia del transcrito diana, normalizando con genes de referencia estables por qRT-PCR (Koch *et al.*, 2016; Cedillo-Jiménez *et al.*, 2024). En todos los casos, es indispensable acompañar los datos con análisis estadísticos (ANOVA y curvas dosis-respuesta) y la documentación de las condiciones precisas de preparación y aplicación para garantizar la trazabilidad y reproducibilidad.

Retos técnicos, regulatorios y de bioseguridad para la aplicación de SIGS

Los estudios revisados muestran que SIGS es una alternativa prometedora para el control de *Fusarium*; sin embargo, su aplicación práctica en la agricultura todavía enfrenta retos importantes de naturaleza técnica, regulatoria y de bioseguridad. Estos no dependen de un solo factor, sino de la interacción entre la estabilidad del dsRNA en campo, la eficiencia del ingreso al patógeno, la especificidad biológica, los costos de producción, el escalamiento industrial y la definición regulatoria.

En cuanto al ingreso a las células fúngicas, como las de *Fusarium*, es importante considerar el tamaño del dsRNA y los acarreadores de la formulación. Se ha encontrado que la pared fúngica permite el movimiento de moléculas pequeñas, por lo que los dsRNA largos y desnudos (no formulados) pueden

presentar dificultades para alcanzar la membrana (Walker *et al.*, 2018). Por otro lado, la membrana es más restrictiva para los dsRNA de naturaleza hidrofílica (Shin *et al.*, 2018), por lo que se ha postulado que el ingreso celular más probable es vía endocitosis o mediante la incorporación inicial por la planta y posterior exportación en vesículas al hongo (Cai *et al.*, 2018). Por ello, también se han explorado distintas estrategias de formulación para favorecer la estabilidad y disponibilidad del dsRNA al aplicarlo (Degnan *et al.*, 2023; Mosquera *et al.*, 2025). Esta limitación es relevante porque una molécula con buen diseño de secuencia puede no ser efectiva en condiciones reales si no alcanza las concentraciones adecuadas en el sitio de acción o si se degrada antes de internalizarse. En ese sentido, la formulación no es un aspecto accesorio, sino de los principales determinantes de la viabilidad tecnológica de SIGS en campo.

En cuanto a la bioseguridad, distintos organismos internacionales hacen énfasis en adaptar las guías de evaluación de riesgo para incluir análisis bioinformáticos de especificidad, estudios en matrices ambientales reales y ensayos ecotoxicológicos en especies benéficas (Vatanparast *et al.*, 2024; Hernández-Soto y Chacón-Cerdas, 2021). Los enfoques computacionales para diseñar dsRNA que liberen cientos de siRNAs contra plagas en cultivos destacan la bioseguridad a nivel postranscripcional (Chen, 2025). No obstante, la alta especificidad del RNAi no debe interpretarse como la ausencia automática de riesgo, ya que la necesidad de contrastar secuencias contra transcriptomas de organismos no blanco y de evaluar su comportamiento en matrices ambientales muestra que la seguridad depende tanto del diseño molecular como del contexto ecológico de la aplicación. En este sentido, la validación experimental se debe extender más allá del efecto sobre el patógeno e incorporar escenarios de exposición ambiental plausibles.

La efectividad y la bioseguridad convergen en los marcos regulatorios. A la fecha de corte de este manuscrito, el ejemplo más avanzado corresponde al control del escarabajo de la papa de Colorado con *Calantha* (Ledprona), el primer pesticida SIGS con autorización provisional para usarse en cultivos en Estados Unidos (U.S. EPA, 2023). Dicha autorización cubre tres años y será revisada posteriormente, lo que constituye un hito regulatorio que requirió un proceso de evaluación de cuatro años por la EPA y ha motivado iniciativas en Europa para apoyar la clasificación legal de los productos basados en RNA (Kümin *et al.*, 2024). GreenLight Biosciences, la empresa desarrolladora, proyectó escalar la producción de dsRNA de 2 t/año en 2024

a 20 t/año hacia finales de 2025, con un costo de producción aproximado de 1 USD/g de dsRNA (Stokstad, 2024). Si bien el marco regulatorio y el escalamiento productivo sugieren la llegada de nuevos productos de la misma clase, el avance regulatorio de casos puntuales no garantiza una adopción rápida y generalizada. Cada nuevo producto deberá demostrar estabilidad, eficacia, especificidad y seguridad bajo condiciones de uso definidas, de modo que la regulación puede convertirse en un cuello de botella tan relevante como la propia optimización molecular o el escalamiento productivo.

Ante este panorama, SIGS se perfila como una estrategia con alto potencial para complementar o reemplazar parcialmente algunos esquemas convencionales de control de *Fusarium*. Sin embargo, la transición de pruebas experimentales exitosas a aplicaciones agrícolas dependerá de que se resuelvan de manera integrada los problemas de entrega, estabilidad, bioseguridad, escalamiento productivo y evaluación regulatoria. De tal forma, las investigaciones futuras no solo deben optimizar el silenciamiento génico, sino también obtener evidencia sobre riesgos no postranscripcionales, efectos epigenéticos no intencionados y posibles respuestas inmunológicas en organismos no objetivo (Dalakouras *et al.*, 2024), con el fin de sostener el desarrollo responsable de esta tecnología.

Finalmente, se concluye que el uso de RNAi vía SIGS representa una alternativa prometedora para el control de *Fusarium* debido a su especificidad y a su potencial como estrategia no transgénica. No obstante, su aplicación agrícola efectiva está sujeta a que se superen las limitaciones relacionadas con la estabilidad del dsRNA, su ingreso al patógeno, la bioseguridad, la regulación y el escalamiento productivo. En conjunto, la evidencia revisada indica que el avance de esta tecnología requiere integrar fundamentos moleculares sólidos con evaluaciones biológicas, ambientales y regulatorias.

Información sobre el financiamiento

Trabajo realizado con apoyo del Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría de la Universidad Autónoma de Querétaro clave FOPER-2025-FQU04150. Agradecimientos al Centro de Investigaciones Aplicadas en Biosistemas por el uso de sus instalaciones y equipos.

Declaración de conflictos de interés

Las personas autoras no declaran ningún potencial conflicto de interés.

Referencias

- Akbar, S., Wei, Y. y Zhang, M.-Q. (2022). RNA interference: promising approach to combat plant viruses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5312. <https://doi.org/10.3390/ijms23105312>
- Alkemade, J.A., Hawkins, N.J., Baraldi, E., Buddie, A.G., Cockerton, H.M., Corkley, I., Fraaije, B.A., Gaya, E., Gifford, D.R., Hartig, F., Kanyuka, K., Koch, A., Niño Sánchez, J., Preston, G.M., Seidl, M.F., Spanu, P.D., Werner, B.T., Lyu, J. y Barraclough, T.G. (2025). Learning from fungicide resistance: evolutionary insights to guide RNAi-based control of fungal crop pathogens. *Fungal Biology Reviews*, 53, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2025.100443>
- Bakker, M.G., Brown, D.W., Kelly, A.C., Kim, H.-S., Kurtzman, C.P., McCormick, S.P., O'Donnell, K.L., Proctor, R.H., Vaughan, M.M. y Ward, T.J. (2018). *Fusarium* mycotoxins: a trans-disciplinary overview. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 40(2), 161-171. <https://doi.org/10.1080/07060661.2018.1433720>
- Bubici, G., Kaushal, M., Prigigallo, M.I., Gómez-Lama Cabanás, C. y Mercado-Blanco, J. (2019). Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 10, 616. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>
- Cai, Q., Qiao, L., Wang, M., He, B., Lin, F.-M., Palmquist, J., Huang, S.-D. y Jin, H. (2018). Plants send small RNAs in extracellular vesicles to fungal pathogen to silence virulence genes. *Science*, 360(6393), 1126-1129. <https://doi.org/10.1126/science.aar4142>
- Cedillo-Jimenez, C.A., Guevara-Gonzalez, R.G. y Cruz-Hernandez, A. (2024). Exogenous dsRNA sequence based on miR1917 down-regulates its target gene related to ethylene signaling in tomato seedlings and fruit. *Scientia Horticulturae*, 331, 113090. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113090>
- Chen, C., Imran, M., Feng, X., Shen, X. y Sun, Z. (2025). Spray-induced gene silencing for crop protection: recent advances and emerging trends. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1527944. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1527944>
- Chitwood-Brown, J., Vallad, G.E., Lee, T.G. y Hutton, S.F. (2021). Breeding for resistance to *Fusarium* wilt of tomato: a review. *Genes*, 12(11), 1673. <https://doi.org/10.3390/genes12111673>
- Chiu, Y.-L. y Rana, T.M. (2003). siRNA function in RNAi: a chemical modification analysis. *RNA*, 9, 1034-1048. <https://doi.org/10.1261/rna.5103703>
- Czauderna, F., Fechtner, M., Dames, S., Aygün, H., Klippel, A., Pronk, G.J., Giese, K. y Kaufmann, J. (2003). Structural variations and stabilising modifications of synthetic siRNAs in mammalian cells. *Nucleic Acids Research*, 31(11), 2705-2716. <https://doi.org/10.1093/nar/gkg393>

- Dai, X. y Zhao, P.X. (2011). psRNATarget: a plant small RNA target analysis server. *Nucleic Acids Research*, 39(2), W155-W159. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr319>
- Dalakouras, A., Koidu, V. y Papadopoulou, K. (2024). DsRNA-based pesticides: considerations for efficiency and risk assessment. *Chemosphere*, 352, 141530. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141530>
- Das, P.R. y Sherif, S.M. (2020). Application of exogenous dsRNAs-induced RNAi in agriculture: challenges and triumphs. *Frontiers in Plant Science*, 11, 946. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00946>
- Degnan, R.M., McTaggart, A.R., Shuey, L.S., Pame, L.J.S., Smith, G.R., Gardiner, D.M., Nock, V., Soffe, R., Sale, S., Garrill, A., Carroll, B.J., Mitter, N. y Sawyer, A. (2023). Exogenous double-stranded RNA inhibits the infection physiology of rust fungi to reduce symptoms in planta. *Molecular Plant Pathology*, 24(3), 191-207. <https://doi.org/10.1111/mpp.13286>
- De Schutter, K., Taning, C.N.T., Van Daele, L., Van Damme, E.J.M., Dubruel, P. y Smagghe, G. (2022). RNAi-based biocontrol products: market status, regulatory aspects, and risk assessment. *Frontiers in Insect Science*, 1, 818037. <https://doi.org/10.3389/finsc.2021.818037>
- Doggalli, G., Manjula, M., Lohithaswa, H.C. y Santhoshinii, E. (2024). RNA interference (RNAi) technology in crop improvement. En R.P. Meena, N.Y. Akshitha, M.M. Dange, V.G. Wuike y U. Devi (Eds.), *Agricultural biotechnology: collaborative insight* (vol. 2, pp. 229-258). Stella International Publication.
- Ekwomadu, T.I., Dada, T.A., Nleya, N., Gopane, R., Sulyok, M. y Mwanza, M. (2020). Variation of *Fusarium* free, masked, and emerging mycotoxin metabolites in maize from agriculture regions of South Africa. *Toxins*, 12(3), 149. <https://doi.org/10.3390/toxins12030149>
- Ekwomadu, T.I. y Mwanza, M. (2023). *Fusarium* fungi pathogens, identification, adverse effects, disease management, and global food security: a review of the latest research. *Agriculture*, 13(9), 1810. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091810>
- Elmén, J., Lindow, M., Schütz, S., Lawrence, M., Petri, A., Obad, S., Lindholm, M., Hedtjärn, M., Frydenlund Hansen, H., Berger, U., Gullans, S., Kearney, P., Sarnow, P., Straarup, E.M. y Kauppinen, S. (2008). LNA-mediated microRNA silencing in non-human primates. *Nature*, 452, 896-899. <https://doi.org/10.1038/nature06783>
- Fan, J., Urban, M., Parker, J.E., Brewer, H.C., Kelly, S.L., Hammond-Kosack, K.E., Fraaije, B.A., Liu, X. y Cools, H.J. (2013). Characterization of the sterol 14 α -demethylases of *Fusarium graminearum* identifies a novel genus-specific CYP51 function. *New Phytologist*, 198(3), 821-835. <https://doi.org/10.1111/nph.12193>

- Fan, S., Zhou, Y., Zhu, N., Meng, Q., Zhao, Y., Xu, J., Tang, Y., Dai, S. y Yuan, X. (2024). Exogenous application of dsRNA-inducing silencing of the *Fusarium oxysporum* *Tup1* gene and reducing its virulence. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(19), 10286. <https://doi.org/10.3390/ijms251910286>
- Fang, H., Zhong, C., Sun, J. y Chen, H. (2023). Revealing the different resistance mechanisms of banana 'Guijiao 9' to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 using comparative proteomic analysis. *Journal of Proteomics*, 283-284, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2023.104937>
- Filhol, O., Ciais, D., Lajaunie, C., Charbonnier, P., Foveau, N., Vert, J.-P. y Vandenbrouck, Y. (2012). DSIR: assessing the design of highly potent siRNA by testing a set of cancer-relevant target genes. *PLoS ONE*, 7(10), e48057. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048057>
- Gruber, A.R., Lorenz, R., Bernhart, S.H., Neuböck, R. y Hofacker, I.L. (2008). The Vienna RNA websuite. *Nucleic Acids Research*, 36(2), W70-W74. <https://doi.org/10.1093/nar/gkn188>
- Gu, K.-X., Song, X.-S., Xiao, X.-M., Duan, X.-X., Wang, J.-X., Duan, Y.-B., Hou, Y.-P. y Zhou, M.-G. (2019). A $\beta 2$ -tubulin dsRNA derived from *Fusarium asiaticum* confers plant resistance to multiple phytopathogens and reduces fungicide resistance. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 153, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2018.10.005>
- Hahn, M. (2014). The rising threat of fungicide resistance in plant pathogenic fungi: *Botrytis* as a case study. *Journal of Chemical Biology*, 7, 133-141. <https://doi.org/10.1007/s12154-014-0113-1>
- Hernández-Soto, A. y Chacón-Cerdas, R. (2021). RNAi crop protection advances. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12148. <https://doi.org/10.3390/ijms222212148>
- Höfle, L., Biedenkopf, D., Werner, B.T., Shrestha, A., Jelonek, L. y Koch, A. (2019). Study on the efficiency of dsRNAs with increasing length in RNA-based silencing of the *Fusarium* *CYP51* genes. *RNA Biology*, 17(4), 463-473. <https://doi.org/10.1080/15476286.2019.1700033>
- Hong, S., Yuan, X., Yang, J., Yang, Y., Jv, H., Li, R., Jia, Z. y Ruan, Y. (2023). Selection of rhizosphere communities of diverse rotation crops reveals unique core microbiome associated with reduced banana *Fusarium* wilt disease. *New Phytologist*, 238(5), 2194-2209. <https://doi.org/10.1111/nph.18816>
- Hough, J., Howard, J.D., Brown, S., Portwood, D.E., Kilby, P.M. y Dickman, M.J. (2022). Strategies for the production of dsRNA biocontrols as alternatives to chemical pesticides. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 980592. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.980592>

- Huang, X.Q., Wen, T., Zhang, J.B., Meng, L., Zhu, T.B., Liu, L.L. y Cai, Z.C. (2015). Control of soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* by biological soil disinfestation with incorporation of various organic matters. *European Journal of Plant Pathology*, 143, 223-235. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0676-x>
- Kedir, B., Fininsa, C., Bekeko, Z. y Mohammed, A. (2025). Resistance of banana cultivars against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in southern Ethiopia. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(2), e70111. <https://doi.org/10.1002/agg2.70111>
- Khan, N., Martínez-Hidalgo, P., Ice, T.A., Maymon, M., Humm, E.A., Nejat, N., Sanders, E.R., Kaplan, D. y Hirsch, A.M. (2018). Antifungal activity of *Bacillus* species against *Fusarium* and analysis of the potential mechanisms used in biocontrol. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2363. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02363>
- Kim, S., Lee, R., Jeon, H., Lee, N., Park, J., Moon, H., Shin, J., Min, K., Kim, J.-E., Yang, J.-W. y Son, H. (2023). Identification of essential genes for the establishment of spray-induced gene silencing-based disease control in *Fusarium graminearum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(49), 19302-19311. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04557>
- Koch, A., Biedenkopf, D., Furch, A., Weber, L., Rossbach, O., Abdellatef, E., Linicus, L., Johannsmeier, J., Jelonek, L., Goesmann, A., Cardoza, V., McMillan, J., Mentzel, T. y Kogel, K.-H. (2016). An RNAi-based control of *Fusarium graminearum* infections through spraying of long dsRNAs involves a plant passage and is controlled by the fungal silencing machinery. *PLoS Pathogens*, 12(10), e1005901. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1005901>
- Koch, A., Höfle, L., Werner, B.T., Imani, J., Schmidt, A., Jelonek, L. y Kogel, K.-H. (2019). SIGS vs HIGS: a study on the efficacy of two dsRNA delivery strategies to silence *Fusarium FgCYP51* genes in infected host and non-host plants. *Molecular Plant Pathology*, 20(12), 1636-1644. <https://doi.org/10.1111/mpp.12866>
- Koch, A., Kumar, N., Weber, L., Keller, H., Imani, J. y Kogel, K. (2013). Host-induced gene silencing of cytochrome P450 lanosterol C14 α -demethylase-encoding genes confers strong resistance to *Fusarium* species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(48), 19324-19329. <https://doi.org/10.1073/pnas.1306373110>
- Kümin, M., Eyer, K., Hall, J., Koch, A., Pascolo, S. y Romeis, J. (2024). RNA-Technologien: Wirkmechanismen, Anwendungen und Verabreichungsformen. *Swiss Academies Reports*, 19(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10926878>
- Leitão, S.T., Malosetti, M., Song, Q., Van Eeuwijk, F., Rubiales, D. y Vaz Patto, M.C. (2020). Natural variation in Portuguese common bean germplasm reveals new sources of resistance against *Fusarium*

- oxysporum* f. sp. *phaseoli* and resistance-associated candidate genes. *Phytopathology*, 110(3), 633-647. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-19-0207-R>
- Leslie, J.F. y Summerell, B.A. (2006). *The Fusarium laboratory manual*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470278376>
- Mosquera, S., Ginésy, M., Bocos-Asenjo, I.T., Amin, H., Diez-Hernando, S., Diez, J.J. y Niño-Sánchez, J. (2025). Spray-induced gene silencing to control plant pathogenic fungi: a step-by-step guide. *Journal of Integrative Plant Biology*, 67(3), 801-825. <https://doi.org/10.1111/jipb.13848>
- Nowara, D., Gay, A., Lacomme, C., Shaw, J., Ridout, C., Douchkov, D., Hensel, G., Kumlehn, J. y Schweizer, P. (2010). HIGS: host-induced gene silencing in the obligate biotrophic fungal pathogen *Blumeria graminis*. *The Plant Cell*, 22(9), 3130-3141. <https://doi.org/10.1105/tpc.110.077040>
- Qiao, L., Niño-Sánchez, J., Hamby, R., Capriotti, L., Chen, A., Mezzetti, B. y Jin, H. (2023). Artificial nanovesicles for dsRNA delivery in spray-induced gene silencing for crop protection. *Plant Biotechnology Journal*, 21(4), 854-865. <https://doi.org/10.1111/pbi.14001>
- Ray, P., Sahu, D., Aminedi, R. y Chandran, D. (2022). Concepts and considerations for enhancing RNAi efficiency in phytopathogenic fungi for RNAi-based crop protection using nanocarrier-mediated dsRNA delivery systems. *Frontiers in Fungal Biology*, 3, 977502. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.977502>
- Sandlin, C. y Webb, K.M. (2021). Guidelines for the identification of races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* using differential melon lines. *Collaboration for Plant Pathogen Strain Identification*. University of California, Davis. <https://cppsi.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk8206/files/inline-files/Melon%20Fusarium%20Wilt%20V4%20June%202021.pdf>
- Sang, H. y Kim, J.-I. (2019). Advanced strategies to control plant pathogenic fungi by host-induced gene silencing (HIGS) and spray-induced gene silencing (SIGS). *Plant Biotechnology Reports*, 14, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11816-019-00588-3>
- Schmidt, S.M., Lukasiewicz, J., Farrer, R., Van Dam, P., Bertoldo, C. y Rep, M. (2015). Comparative genomics of *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* reveals the secreted protein recognized by the *Fom-2* resistance gene in melon. *New Phytologist*, 209(1), 307-318. <https://doi.org/10.1111/nph.13584>
- Shin, H., Park, S.-J., Yim, Y., Kim, J., Choi, C., Won, C. y Min, D.-H. (2018). Recent advances in RNA therapeutics and RNA delivery systems based on nanoparticles. *Advanced Therapeutics*, 1(7), 1800065. <https://doi.org/10.1002/adtp.201800065>

- Singh, N., Mukherjee, S.K. y Rajam, M.V. (2020). Silencing of the ornithine decarboxylase gene of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by host-induced RNAi confers resistance to *Fusarium* wilt in tomato. *Plant Molecular Biology Reporter*, 38, 419-429. <https://doi.org/10.1007/s11105-020-01205-2>
- Stokstad, E. (27 de junio del 2024). *The perfect pesticide? Insecticides made of RNA could offer a safer and more targeted weapon against crop pests*. Science. <https://www.science.org/content/article/perfect-pesticide-rna-kills-crop-destroying-beetles-unprecedented-accuracy>
- Swett, C.L., Del Castillo Munera, J., Hellman, E., Helpio, E., Gastelum, M., Lopez Raymundo, E., Johnson, H., Oguchi, R., Hopkins, A., Beau-lieu, J. y Rodriguez, F. (2023). Monitoring for a new *I3* resistance gene-breaking race of *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* (*Fusarium* wilt) in California processing tomatoes following recent widespread adoption of resistant (F3) cultivars: challenges with race 3 and 4 differentiation methods. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1088044. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1088044>
- Tziros, G.T., Samaras, A. y Karaoglanidis, G.S. (2024). Soil solarization efficiently reduces fungal soilborne pathogen populations, promotes lettuce plant growth, and affects the soil bacterial community. *Biology*, 13(8), 624. <https://doi.org/10.3390/biology13080624>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (29 de septiembre del 2023). *Proposed registration decision for the new active ingredient Ledprona (Leptinotarsa decemlineata-specific recombinant double-stranded interfering Oligonucleotide GS2) in GS2 formulation and GS2 technical*. Regulations.gov. <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2021-0271-0008>
- Vatanparast, M., Merkel, L. y Amari, K. (2024). Exogenous application of dsRNA in plant protection: Efficiency, safety concerns and risk assessment. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(12), 6530. <https://doi.org/10.3390/ijms25126530>
- Walker, L., Sood, P., Lenardon, M.D., Milne, G., Olson, J., Jensen, G., Wolf, J., Casadevall, A., Adler-Moore, J. y Gow, N.A.R. (2018). The viscoelastic properties of the fungal cell wall allow traffic of Am-Bisome as intact liposome vesicles. *mBio*, 9, e02383-17. <https://doi.org/10.1128/mBio.02383-17>
- Wang, H., Chen, Y., Hou, T., Jian, Y. y Ma, Z. (2022). The very long-chain fatty acid elongase FgElo2 governs tebuconazole sensitivity and virulence in *Fusarium graminearum*. *Environmental Microbiology*, 24(11), 5362-5377. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16212>
- Werner, B.T., Koch, A., Šečić, E., Engelhardt, J., Jelonek, L., Steinbrenner, J. y Kogel, K.-H. (2021). *Fusarium graminearum* DICER-like-dependent sRNAs are required for the suppression of host immune

- genes and full virulence. *PLoS ONE*, 16(8), e0252365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252365>
- Yan, X., Guo, S., Gao, K., Sun, S., Yin, C. y Tian, Y. (2023). The impact of the soil survival of the pathogen of *Fusarium* wilt on soil nutrient cycling mediated by microorganisms. *Microorganisms*, 11(9), 2207. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092207>
- Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J. y Chen, J. (2023). *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1160551. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>
- Yin, Y., Miao, J., Shao, W., Liu, X., Zhao, Y. y Ma, Z. (2023). Fungicide resistance: progress in understanding mechanism, monitoring, and management. *Phytopathology*, 113(4), 707-718. <https://doi.org/10.1094/phyto-10-22-0370-kd>
- Zakaria, L. (2023). *Fusarium* species associated with diseases of major tropical fruit crops. *Horticulturae*, 9(3), 322. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030322>
- Zuriegat, Q., Zheng, Y., Liu, H., Wang, Z. y Yun, Y. (2021). Current progress on pathogenicity-related transcription factors in *Fusarium oxysporum*. *Molecular Plant Pathology*, 22(7), 882-895. <https://doi.org/10.1111/mpp.13068>

Energía undimotriz: revisión del desarrollo de absorbedores puntuales y su madurez tecnológica

Wave energy: a review of point absorber development and associated TRLs

Claudia Belén Álvarez Sánchez* 

María Guadalupe Navarro Rojero 

Julio César Sánchez Jiménez** 

CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro, México

*claudia.alvarez@ciateq.edu.mx

**julio.sanchez@ciateq.mx

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2206

Fecha de recepción: 13 de marzo del 2026

Fecha de aceptación: 19 de mayo del 2026

Resumen

La energía undimotriz es una fuente renovable con potencial para diversificar la matriz energética global. Sin embargo, la amplia gama de diseños, geometrías y principios de funcionamiento de los dispositivos existentes ha dificultado la convergencia hacia soluciones estandarizadas. Este trabajo presenta una revisión sistemática del desarrollo reciente de absorbedores puntuales mediante una consulta en PRIMRE, Google Scholar, Scopus, Elsevier e IEEE Xplore, con un periodo de búsqueda de noviembre del 2024 a diciembre del 2025. A partir de 130 convertidores de energía marina identificados, se filtraron 59 absorbedores puntuales, de los cuales 22 contaban con un $TRL \geq 6$. Con base en una función de puntuación ponderada que considera madurez tecnológica, potencia nominal, actualidad de la documentación, estado operativo y verificabilidad de los datos, se seleccionaron cinco dispositivos para un análisis detallado: CorPower C4, Archimedes Waveswing, Triton-C, PB3 PowerBuoy y Wavestar. Los resultados evidencian una heterogeneidad tecnológica significativa, con TRLs de entre 7 y 9, potencias nominales de 15 a 600 kW y diferencias notables entre los datos reportados por los fabricantes y los valores verificados experimentalmente.



Palabras clave: conversión de energía undimotriz, dispositivos flotantes, energía renovable marina, estado del arte

Abstract

Wave energy is a renewable source with significant potential to diversify the global energy matrix. However, the wide diversity of designs, geometries, and operating principles among existing devices has hindered convergence toward standardized solutions. This work presents a systematic review of the recent development of point absorber wave energy converters through searches in PRIMRE, Google Scholar, Scopus, Elsevier, and IEEE Xplore, covering the period from November 2024 to December 2025. From 130 identified marine energy devices, 59 point absorbers were filtered, of which 22 had TRLs ≥ 6 . Using a weighted scoring function considering technology readiness level, nominal power, documentation recency, operational status, and data reliability, five devices were selected for detailed analysis: CorPower C4, Archimedes Waveswing, Triton-C, PB3 PowerBuoy, and Wavestar. Results reveal significant technological heterogeneity, with TRL values between 7 and 9, nominal power ranging from 15 to 600 kW, and notable differences between manufacturer-reported data and experimentally verified values.

Keywords: floating devices, marine renewable energy, state of the art, wave energy conversion

Introducción

El aprovechamiento de fuentes de energías renovables es una prioridad en la transición energética global para cumplir los objetivos del Acuerdo de París, particularmente la meta de no sobrepasar el aumento de temperatura de 1.5° C. En este contexto, el sector energético global continúa siendo la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que subraya la necesidad de acelerar la transición hacia fuentes limpias y diversificar la matriz energética más allá de las ya consolidadas, como la solar y la eólica (IRENA, 2024). Por ello, se debe impulsar el desarrollo de tecnologías renovables, así como profundizar la investigación de aquellas que se encuentran en fases avanzadas, pero no han alcanzado la madurez comercial.

Un ejemplo de energía renovable poco difundida es la oceánica. Las estimaciones globales de su potencial energético varían según la metodología empleada. IRENA (2014) reportó que el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático del 2012 calculaba un potencial teórico de 29,500 TWh por año y el del 2007 un potencial técnico de 500 GW de capacidad

instalable, asumiendo que estas tecnologías se desplegarían únicamente en el 2% de los 800,000 km de costa mundial.

En este sentido, la energía undimotriz, obtenida a partir del movimiento de las olas, destaca por su abundancia, alta predictibilidad y densidad energética (IRENA, 2020). Sin embargo, su avance enfrenta retos técnicos y económicos que han limitado su implementación a gran escala. En 2020, su capacidad instalada fue de 2.31 MW (IRENA, 2020), cifra que contrasta marcadamente con el potencial teórico estimado. Este dato revela la magnitud del desafío tecnológico para aprovechar este tipo de energías con los convertidores de energía undimotriz (WECs) actuales.

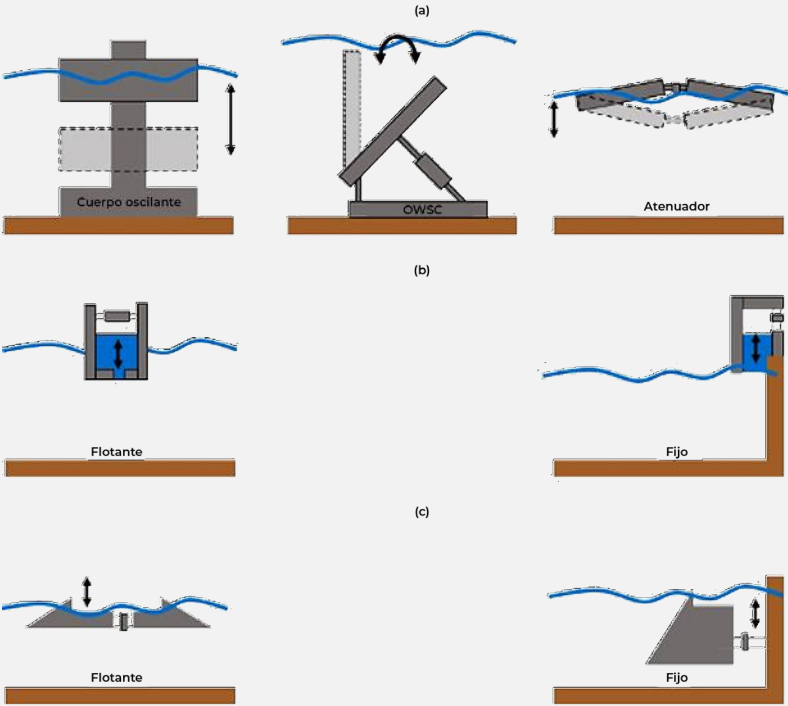
Del mismo modo, uno de los obstáculos para su consolidación es la falta de consenso en el diseño, geometrías y principios de funcionamiento de los WECs. Esta diferencia dificulta su estandarización, ya que solo pueden mejorarse en torno a condiciones específicas, lo cual limita su transferencia a otras regiones. Pese a ello, de acuerdo al reporte de IRENA (2020), se prevé que en los próximos años la energía undimotriz experimentará un crecimiento significativo, siguiendo el ejemplo de la mareomotriz.

En 2019, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) publicó la especificación técnica IEC TS 62600, que indica las pautas para el diseño, prototipado, evaluación y caracterización del recurso de dispositivos relacionados con energía marina (undimotriz, eólica, de corrientes y de marea). El apartado 101 de este referente, con la caracterización del recurso energético en condiciones reales, se ha utilizado en dispositivos como el CorPower y el PB3 PowerBuoy. Mientras tanto, los apartados 2 y 3, que abordan el diseño de los dispositivos y las cargas mecánicas, rara vez han sido empleados en la energía undimotriz, siendo más común su aplicación en la mareomotriz, particularmente en turbinas marinas.

Según el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC, s.f.), los WECs se clasifican en tres tipos generales en función de su principio de funcionamiento: cuerpos oscilantes, columnas oscilantes de agua y convertidores de sobretensión de onda, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Clasificación de los WECs de acuerdo a su principio de funcionamiento: a) cuerpos oscilantes, b) columnas oscilantes de agua y c) convertidores de sobretensión de onda



Fuente: adaptado de “On the scalability of wave energy converters” (p. 10) [Imagen], por Jin et al., 2022 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801821015274?via%3Dihub>)

En la Tabla 1 se presentan los grados de libertad asociados a los distintos WECs, usando la clasificación de la EMEC.

Tabla 1

Clasificación de los WECs y sus grados de libertad

Clasificación	Tipo	Grado de libertad
Cuerpos oscilantes	De movimiento vertical (<i>heaving</i>)	1
	Convertidor de oleaje oscilante (OWSC)	1
	Articulado	2
Columnas oscilantes de agua	Flotante	3
	Fijo	0
Convertidores de sobretensión de onda	Flotante	3
	Fijo	0

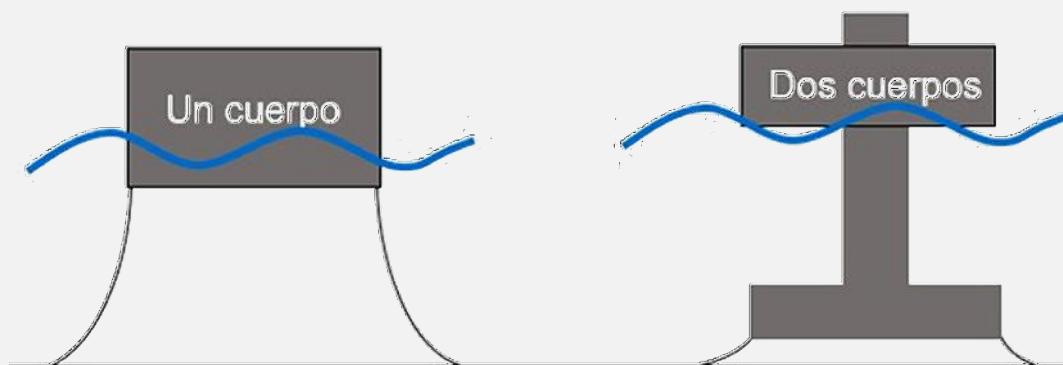
Fuente: elaboración propia (Álvarez, 2026)

Los convertidores de cuerpos oscilantes, en especial los absorbedores puntuales, representan una solución prometedora por su diseño compacto, capacidad de operación con hasta 6 grados de libertad y facilidad de adaptación ante diversas condiciones oceánicas. Los absorbedores puntuales se basan en el movimiento relativo inducido por el oleaje y pueden adoptar dos configuraciones principales:

- a) **Absorbedores puntuales de un solo cuerpo:** consisten en un flotador anclado al fondo marino mediante un sistema de toma de potencia (PTO). La energía se captura con el movimiento vertical del flotador, como se muestra a la izquierda en la Figura 2. Esta configuración es más simple pero menos eficiente en mares con componentes direccionales complejas.
- b) **Absorbedores puntuales de dos cuerpos:** consisten en un flotador y una masa generalmente sumergida que se desplazan de forma relativa entre sí (Asai y Sugiyura, 2021; Fard *et al.*, 2025). Obtienen la energía a partir de dos modos de movimiento, como se muestra a la derecha de la Figura 2. Esta configuración permite sintonizar la frecuencia natural del sistema con la frecuencia predominante del oleaje, mejorando así la captura de energía.

Figura 2

Clasificación de los absorbedores puntuales según su configuración



Fuente: elaboración propia (Álvarez, 2025)

A diferencia de otros sistemas más complejos, estos dispositivos combinan la simplicidad mecánica y la escalabilidad, por lo que son candidatos ideales para superar los desafíos de estandarización que limitan el desarrollo de este tipo de tecnologías. Esta ventaja coincide con las proyecciones que anticipan el despegue de la energía undimotriz.

Este trabajo se centra en absorbedores puntuales con un nivel de madurez tecnológica igual o superior a 6 o, en otras palabras, aquellos que han sido probados en condiciones reales y tienen potencial para comercializarse. Se excluyeron los terminadores y atenuadores con el fin de priorizar diseños compactos que podrían adaptarse mejor a contextos locales. A través de una revisión sistemática, se busca reunir información técnica clave que suele encontrarse dispersa en fuentes académicas, reportes gubernamentales y documentación industrial. El propósito es ofrecer una visión clara y actualizada del estado de esta tecnología, identificando tendencias, brechas de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones.

Principios físicos de los absorbedores puntuales

Los absorbedores puntuales operan sobre la base de la interacción entre una estructura flotante y el campo de ondas incidentes. Su principio fundamental es la resonancia hidrodinámica: cuando la frecuencia natural de oscilación del sistema coincide con la frecuencia predominante del oleaje, la amplitud de movimiento se maximiza, lo que incrementa la energía disponible para el sistema de PTO. Esta condición de resonancia se describe con la ecuación de Cummins (1962), que modela la dinámica del cuerpo flotante en el dominio del tiempo considerando las fuerzas de excitación del oleaje, las fuerzas de radiación (representadas por coeficientes de la masa añadida y el amortiguamiento de radiación) y las fuerzas de restauración hidrostáticas.

El sistema de PTO desempeña un papel central en la eficiencia del absorbedor puntual, ya que se encarga de transformar la energía mecánica del movimiento del cuerpo en energía eléctrica utilizable. Los PTO pueden clasificarse en cuatro categorías principales según su principio de operación: hidráulicos, electrohidráulicos, de accionamiento directo y mecánicos. Los hidráulicos convierten el movimiento lineal o rotacional en presión de fluido a través de pistones o bombas, que a su vez accionan un motor hidráulico acoplado a un generador eléctrico. Su principal ventaja es la capacidad de suavizar la potencia de salida mediante acumuladores, aunque existe el riesgo de que el fluido hidráulico se fugue en el entorno marino. Por su parte, los de accionamiento directo generan electricidad sin etapas intermedias, por lo que eliminan ineficiencias de conversión, a cambio de una mayor complejidad en la electrónica de potencia (Guo y Ringwood, 2021).

La geometría del cuerpo flotante influye directamente en la respuesta hidrodinámica del dispositivo. Esta relación entre

la geometría y el clima de oleaje es una de las razones por las cuales la mayoría de los dispositivos analizados ha sido optimizada para ajustarse a las condiciones específicas del lugar de interés, y su desempeño puede degradarse de manera significativa al transferirse a otras regiones oceánicas (Fard *et al.*, 2025).

Finalmente, la escalabilidad es un aspecto crítico en el diseño de los absorbedores puntuales. Jin *et al.* (2022) demuestran que la potencia que capturan escala de manera no lineal con sus dimensiones, de modo que duplicar el diámetro del flotador no implica necesariamente duplicar la potencia generada, ya que la eficiencia de captura depende de la relación entre el tamaño del dispositivo y la longitud de onda del oleaje incidente. Esta relación limita el beneficio de aumentar de forma indiscriminada el tamaño del dispositivo y motiva el interés en arreglos de múltiples absorbedores puntuales, donde el efecto de interacción entre dispositivos tiene el potencial de aumentar la eficiencia colectiva del sistema.

Metodología

Los convertidores se seleccionaron mediante un proceso de revisión técnica sistemática en fuentes académicas, informes de proyectos, documentación gubernamental del país de origen de los dispositivos y reportes de instituciones de energía entre noviembre del 2024 y diciembre del 2025. Como base de datos principal se utilizó el Portal y Repositorio de Información de Energía Marina Renovable (PRIMRE, 2026) del Departamento de Energía de Estados Unidos. Para verificar la existencia de literatura académica asociada a los modelos estudiados se consultaron fuentes como Google Scholar, Scopus, Elsevier e IEEE Xplore, con los términos de búsqueda “*point absorber*”, “*wave energy device*”, “*WEC point absorber*” y “*WEC technology readiness level*”, en combinación con el nombre específico de cada dispositivo o su desarrollador. En los casos donde contaban con financiamiento gubernamental, la búsqueda condujo también a informes oficiales de agencias de energía del país de origen. Adicionalmente, se consultó Google Patents para comprobar que hubiera propiedad industrial activa.

A partir de PRIMRE, se identificaron inicialmente 130 dispositivos cosechadores de energía marina de distintos tipos. De estos, solo se contemplaron aquellos clasificados como absorbedores puntuales, es decir, 59. El primer criterio de filtrado fue un $TRL \geq 6$, lo que redujo el conjunto a 22, los cuales fueron

sometidos al proceso de búsqueda descrito y evaluados con la siguiente función de puntuación ponderada:

$$s_f = 0.25(TRL) + 0.3(Pn) + 0.2(Ac) + 0.15(Eo) + 0.1(Vd)$$

Donde:

- **TRL (25%)**: nivel de madurez tecnológica, normalizado en una escala 0-5, proporcional a la escala de TRL máxima de 9. Refleja el grado de validación experimental del dispositivo.
- **Pn (30%)**: potencia nominal reportada, evaluada por rangos en una escala 1-5 (> 1,000 kW = 5; 501-1,000 kW = 4; 101-500 kW = 3; 11-110 kW = 2; < 10 kW = 1).¹
- **Ac (20%)**: actualidad de la documentación, evaluada como el promedio de dos subcriterios con igual peso: año de la publicación más reciente (2023-2024 = 5; 2020-2022 = 3; anterior a 2020 = 1) y cantidad de estudios identificados (≥ 3 estudios = 5; 1-2 estudios = 3; ninguno = 0).
- **Eo (15%)**: estado operativo (activos = 5, inactivos = 2.5).
- **Vd (10%)**: verificabilidad de los datos (datos oficiales o respaldados por dos o más fuentes independientes = 5, información parcial o de una sola fuente = 3, información no verificable = 1).

Las ponderaciones fueron definidas con base en la relevancia de cada criterio respecto al objetivo de la revisión: identificar absorbedores puntuales que cuenten con un respaldo documental sólido y madurez tecnológica demostrada, a partir de contrastes del estado del arte, donde métodos formales, como el proceso de análisis jerárquico (AHP), son más apropiados para estudios de selección de sitio o inversión. La Tabla 2 resume las características destacadas de los 22 dispositivos evaluados, incluyendo la ponderación final.

¹ Se reconoce que los valores no verificados experimentalmente pueden introducir un sesgo, por lo que la tabla comparativa distingue entre potencia reportada y potencia verificada.

Tabla 2
Resumen comparativo de los absorbedores puntuales

Dispositivo	Nivel de madurez tecnológica (25%)	Energía en kW (30%)	Energía en kW verificada	Cantidad de estudios (20%)	Estado del dispositivo (15%)	Información comprobable (10%)	Ponderación
Archimedes Waveswing (AWS)	7	500	500	9	Activo	Sí	7.5
Azura	7	20	20	4	Activo	Sí	6.5
BOLT Lifesaver	7	50	50	6	Activo	Sí	7
CorPower C4	7	300	300	+ 20	Activo	Sí	8.2
MANTA	6	4.6	4.6	3	Activo	Sí	5.8
MPS WaveSub	6	5,000	500-1,000	4	Activo	Parcialmente	6.3
NEMOS WEC	6	1000	1,000	8	Activo	Sí	7.5
Neptune Model 3.1	6	225	No verificable	0	Inactivo	No	3
OSCAR	6	Sin datos	No verificable	0	Activo	No	2.5
PB3 PowerBuoy	9	15	15	5	Activo	Sí	9
Protean Wave Technology	6	Sin datos	No verificable	0	Inactivo	No	2
Resen Smart Power Buoy	8	0.6	0.6	3	Activo	Sí	6.2
Rotary Wave Butterfly Device	6	500	No verificable	1	Inactivo	No	7.2
Seabased WEC	8	2,000	200-500	7	Activo	Sí	7.2
SeaDog Wave Pump	6	Sin datos	No verificable	1	Activo	No	3.2
SINN Power WEC	6	750	50-150	12	Activo	Sí	6.8
Squid 6	6	7.5	7.5	5	Activo	Sí	5.2
Triton-C	8	100	100	5	Activo	Sí	7.2
Waverider	7	Sin datos	No verificable	2	Activo	No	5

Wavestar WEC	7	600	600	+ 10	Activo	Sí	8
WaveSurfer	6	2,100	No verificable	0	Activo	No	3.5
Wedge W1	8	400	No verificable	1	Activo	No	5.5

Fuente: elaboración propia (Álvarez, 2026)

Resultados

Si bien la función de puntuación ponderada orientó el proceso de selección como un criterio estructurado, al final se priorizó la representatividad tecnológica del conjunto. En este sentido, a partir de la matriz comparativa de 22 dispositivos, se eligieron cinco que destacaron por su nivel de madurez tecnológica, documentación técnica disponible y relevancia en el campo. Por ejemplo, el PB3 PowerBuoy se incluyó por ser el único del grupo con un TRL de 9, representando el estado más avanzado de validación comercial, y el Triton-C por su diseño de múltiples grados de libertad y sus recientes pruebas en condiciones reales del océano Pacífico, características excepcionales dentro del conjunto. Esta combinación permitió llevar a cabo una comparación más completa del panorama tecnológico actual que la que resultaría al solo contemplar los dispositivos con mayor puntaje agregado.

A continuación, se muestran de forma individual los cinco dispositivos seleccionados, describiendo su principio de funcionamiento, tipo de PTO, potencia alcanzada, estado actual y ventajas frente a otros absorbedores puntuales, así como los retos tecnológicos predominantes. Adicionalmente, se incluyen dos dispositivos complementarios que, aunque no se analizaron a detalle, presentan características significativas para la discusión.

CorPower C4

Desarrollado por la empresa sueca CorPower Ocean, se trata de un absorbedor puntual cuyo principio de funcionamiento se basa en el movimiento relativo entre un flotador esférico y una estructura reactiva anclada al fondo marino. Una de sus innovaciones notables es el sistema WaveSpring, un mecanismo neumático pretensado que permite almacenar energía potencial y sincronizar el movimiento del dispositivo con el de las olas. Esta tecnología, descrita en la patente US20130236347A1 (Lundbäck, 2016), está inspirada en el bombeo del corazón humano: genera una fuerza de retorno que impulsa el flotador

hacia abajo tras cada cresta de la ola, mejorando hasta tres veces la producción de energía para un mismo tamaño de boya en comparación con otras tecnologías (CorPower Ocean, s.f.).

Este dispositivo cuenta con 9 m de diámetro, 19 m de largo y 70 t de peso, y una sola boya puede generar entre 300 y 700 kW en condiciones óptimas de oleaje (CorPower Ocean, s.f.). En la Figura 3 se puede observar el dispositivo siendo preparado para las pruebas en mar abierto.

Figura 3

Preparación del CorPower C4 para las pruebas en mar abierto



Fuente: CorPower C4 WEC at quayside 'launchpad' [Fotografía], por CorPower Ocean, 2022 (<https://corpowerocean.com/cor-power-c4-wec-at-quayside-launchpad/>)

En 2022, el CorPower C4 fue sometido a la prueba IronMan en un banco de pruebas en seco ubicado en la sede de la empresa en Estocolmo. Bajo una carga de olas simuladas de 7.2 MW, el dispositivo se evaluó bajo condiciones representativas de diversas regiones oceánicas, con una fase de funcionamiento continuo de tres meses y exposición a cargas equivalentes a una tormenta severa con olas de 18.5 m. CorPower Ocean (2022) indica que los resultados demostraron la robustez del diseño y la eficacia del sistema WaveSpring para proteger el dispositivo en condiciones extremas. Se proyecta que en 2025 alcance un nivel de madurez tecnológica de 8 (CorPower Ocean, s.f.).

Entre sus ventajas destacan su alta eficiencia por unidad de masa, su capacidad de sintonización activa con el oleaje y su diseño robusto demostrado en pruebas en seco. El sistema WaveSpring permite que el dispositivo opere en condiciones de resonancia de manera controlada, lo que maximiza la captura de energía sin exponer la estructura a sobrecargas.

Triton-C

El Triton-C, desarrollado por Oscilla Power, Inc., es un absorbedor puntual diseñado para operar en seis grados de libertad (Oscilla Power, Inc., s.f./a) debido a su configuración de dos cuerpos: un flotador superficial y un plato verticalmente asimétrico conectado mediante correas flexibles de alta resistencia. De acuerdo a su ficha técnica, esta disposición permite que el dispositivo funcione en múltiples modos de movimiento generados por el oleaje, incluyendo arfada, empuje, oscilación, cabeceo, balanceo y guiñada. La capacidad de aprovecharlos simultáneamente le confiere una ventaja significativa frente a los absorbedores puntuales convencionales de un solo grado de libertad, ya que incrementa el ancho de banda de captura de energía y reduce la sensibilidad a la direccionalidad del oleaje.

Oscilla Power, Inc. (s.f./b) indica que el sistema de PTO consiste en transmisiones hidráulicas rotativas instaladas en el flotador y optimizadas para transformar el movimiento relativo entre ambos cuerpos en energía con alta eficiencia y confiabilidad operativa. Cada correa flexible está conectada a un cilindro hidráulico que presuriza el fluido, lo cual acciona un motor hidráulico acoplado a un generador eléctrico, como se describe en la patente US11293398B2 (Mundon, 2022).

El Triton-C fue creado para suministrar energía a comunidades remotas con acceso limitado a la infraestructura eléctrica. La Oficina de Tecnologías de Energía Hidráulica (WPTO, 2022) señala que su diseño modular y capacidad de autodespliegue favorecen una instalación rápida mediante embarcaciones de bajo costo, lo que reduce los tiempos y costos de implementación.

Este dispositivo se encuentra actualmente en un nivel de madurez tecnológica de 8 y fue evaluado con éxito en 2023 en el Sitio de Pruebas de Energía Marina (WETS) de Hawái, donde se demostró que es capaz de operar de forma estable en condiciones reales de oleaje (Ingram, 2023). Durante las pruebas, el dispositivo registró datos de rendimiento que validaron los modelos numéricos calculados de manera previa, incluyendo la generación eléctrica bajo diferentes estados de mar y la respuesta del sistema de PTO ante cargas variables. Estos ensayos suponen un hito, ya que el entorno de Hawái reproduce condiciones del océano Pacífico que son de interés para un eventual despliegue en regiones costeras de América.

Gracias a su construcción innovadora y su capacidad de operar de forma autónoma, el Triton-C representa una opción prometedora entre los absorbedores puntuales de dos cuerpos. A diferencia de los dispositivos que requieren infraestructura

portuaria especializada para instalarse, como se mencionó, este puede desplegarse con embarcaciones convencionales, lo que reduce los costos logísticos y amplía el rango de sitios potenciales de instalación. La Figura 4 muestra el dispositivo durante su preparación para las pruebas realizadas.

Figura 4

Preparación del Triton-C para las pruebas en un espacio controlado



Fuente: Oscilla Power - model Triton-C - wave energy converter [Fotografía], por Oscilla Power, Inc., 2023 (<https://www.energy-xprt.com/products/oscilla-power-model-triton-c-wave-energy-converter-911070>)

Archimedes Waveswing

El Archimedes Waveswing (AWS) es un absorbedor puntual desarrollado por AWS Ocean Energy Ltd en Escocia. Contrario a la mayoría de los dispositivos de su tipo, este se encuentra completamente sumergido en el mar, lo que le permite operar protegido frente a tormentas oceánicas severas y minimizar el impacto acústico y visual (AWS Ocean Energy Ltd, 2022). Esta característica lo distingue de los absorbedores superficiales, ya que la ausencia de partes visibles desde la superficie reduce el riesgo de daños por condiciones climáticas extremas y facilita su integración en zonas con restricciones visuales o de navegación.

El dispositivo consta de dos componentes principales: un silo anclado al fondo marino y un flotador que actúa como carcasa o tapón del silo (Ali et al., 2025), como se observa en la Figura 5. Su principio de funcionamiento se basa en los cambios de presión hidrostática generados por el paso de las olas. A medida que aumenta la presión sobre el flotador, este se desplaza hacia abajo y, cuando disminuye, el flotador asciende.

AWS Ocean Energy Ltd (s.f.) indica que este movimiento vertical es aprovechado por un sistema de conversión de energía de tipo directo (*direct-drive*) que transforma la energía mecánica sin etapas intermedias.

Figura 5

Archimedes Waveswing, completamente ensamblado, previo a las pruebas operativas



Fuente: AWS wave energy converter takes shape in Glasgow ahead of testing [Fotografía], por AWS Ocean Energy, 2022 (<https://awsocan.com/2021/06/waveswing-takes-shape-in-glasgow/>)

El documento *Advanced Archimedes Waveswing. WES novel wave energy converter. Stage 3 project. Public report* (AWS Ocean Energy Ltd, 2022) informó que la potencia teórica alcanzada por el dispositivo en su diseño a escala real se estima en 500 kW, mientras que su nivel de madurez tecnológica es de 7, tras ser evaluado en una escala de 1:2 en condiciones reales de operación en el EMEC, ubicado en las islas Orcadas, Escocia. Las pruebas a escala incluyeron ciclos continuos de operación bajo distintos estados del mar, validando tanto el sistema de PTO de accionamiento directo como la estructura del silo. Por otro lado, la inmersión total del dispositivo requiere al menos 25 m de profundidad, lo que restringe su aplicabilidad geográfica (AWS Ocean Energy Ltd, 2022). Además, con esta característica, las acciones de mantenimiento correctivo

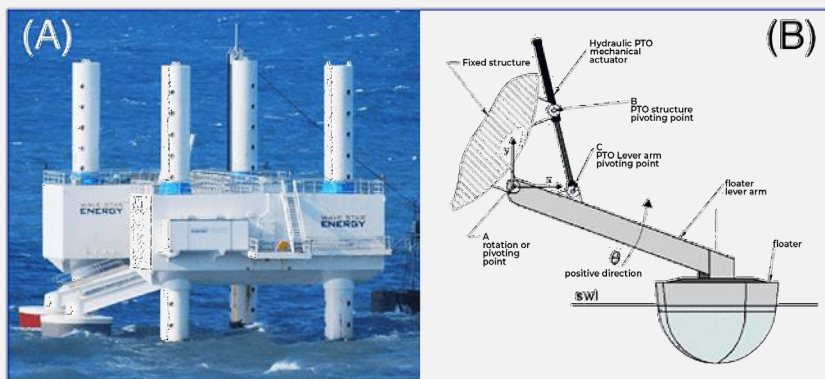
resultan más complejas y costosas que en dispositivos superficiales, puesto que se precisan equipos de buceo o vehículos submarinos controlados de manera remota.

Wavestar

El Wavestar es un dispositivo de energía undimotriz desarrollado en Dinamarca por Wave Star Energy A/S. Se diseñó bajo el concepto de absorbedor puntual múltiple, por lo que se compone de una estructura elevada montada sobre postes, a la cual se integran flotadores semiesféricos distribuidos a lo largo de su base. Estos flotadores se mueven de forma independiente con el vaivén de las olas, y dicho movimiento se transmite a un sistema hidráulico que acciona un generador eléctrico, como se describe en las patentes US7956478B2 (Steenstrup, 2011) y US7694513B2 (Steenstrup *et al.*, 2010). La Figura 6 muestra el diseño de planta y el método de captación de energía de Wave Star.

Figura 6

a) Plataforma del Wavestar en el mar del Norte, en Dinamarca, y b) esquema del flotador



Fuente: “Balancing power output and structural fatigue of wave energy converters by means of control strategies” (p. 2246) [Imagen], por A. Ferri *et al.*, 201425 (<https://doi.org/10.3390/en7042246>), *Energies*, 7(4).

Durante su creación, el dispositivo fue probado en escalas de 1:40, 1:10 y 1:2 (Wave Star Energy, s.f./b). El prototipo a escala 1:2, instalado en el mar del Norte, incorporaba dos de los veinte flotadores contemplados para la versión a escala real (Wave Star Energy, s.f./a). Con esta configuración se logró generar una potencia de salida de 110 kW, mientras que el diseño completo tenía como objetivo alcanzar una potencia nominal de 600 kW.

Hoy día, el proyecto se encuentra inactivo, ya que en abril del 2016 fue discontinuado al no conseguir el autofinanciamiento requerido como contraparte del financiamiento otorgado por el programa EU Horizon 2020 para la construcción de un WEC de 1 MW en Bélgica, lo que llevó al cierre definitivo de Wave Star A/S (EUDP, s.f.). No obstante, el concepto tecnológico del Wavestar ha sido retomado en investigaciones recientes como las de Li *et al.* (2025), Luan *et al.* (2024) y Jahangir *et al.* (2025), donde se proponen sistemas híbridos que integran absorbedores puntuales con turbinas eólicas marinas en plataformas compartidas, aprovechando sinergias de infraestructura en instalación, amarre y transmisión eléctrica.

PB3 PowerBuoy

El PB3 PowerBuoy es un absorbedor puntual desarrollado por la empresa estadounidense Ocean Power Technologies (OPT). Su principio de funcionamiento se basa en el movimiento lineal relativo entre el flotador y el cuerpo central de la boya, el cual permanece fijo debido a su masa y al sistema de anclaje (Parsa *et al.*, 2017). Este desplazamiento vertical activa un sistema de PTO de accionamiento directo que convierte la energía mecánica del oleaje en energía eléctrica.

La energía generada se almacena localmente en un conjunto de baterías integrado en el dispositivo, lo que permite un suministro eléctrico continuo. El PB3 PowerBuoy cuenta con un diámetro de 2.65 m y una longitud total de 13.3 m, así como una capacidad de generación de hasta 15 kW (Parsa *et al.*, 2017; PRIMRE, 2026). La Figura 7 muestra el PB3 durante su instalación en el Puerto de San Antonio, previo a su despliegue en la bahía de Cartagena, Chile.

En la actualidad, el nivel de madurez tecnológica de 9 del PB3 lo convierte en un referente de madurez comercial en el campo de la energía undimotriz (PRIMRE, 2026). Su diseño está optimizado para aplicaciones de generación a pequeña escala, lo cual explica su potencia considerablemente menor a la de otros dispositivos como el CorPower C4 y el AWS. La filosofía de su diseño no apunta a maximizar la potencia por unidad, sino a garantizar la confiabilidad operativa a largo plazo, la facilidad de despliegue y la capacidad de autoalimentación de sistemas de monitoreo remoto en entornos oceánicos.

En contraste con otros dispositivos pensados para generar mayor potencia, el PB3 se concibió como un sistema autónomo, enfocado en el suministro de energía a comunidades remotas, boyas oceanográficas y sistemas de vigilancia marítima. Ha sido desplegado en proyectos como el Open Sea Lab en

Chile, donde alimentó sensores oceanográficos continuamente durante su operación en el océano Pacífico Sur (Cortés *et al.*, 2022). Sus principales diferenciadores competitivos son su autonomía energética y la capacidad de operar sin conexión a la red eléctrica, aunque su potencia limitada lo excluye de aplicaciones que requieran alimentar infraestructura de mayor consumo. No obstante, el PB3 abre la puerta a mercados nicho de alto valor en los que la confiabilidad supera en importancia el costo por kWh generado.

Figura 7

PB3 PowerBouy previo al despliegue para pruebas



Fuente: Ocean Power Technologies deploys commercial PowerBuoy with energy storage [Fotografía], por Power Magazine, 2016 (<https://www.powermag.com/ocean-power-technologies-deploys-commercial-powerbuoy-energy-storage/>)

Dispositivos adicionales relevantes

Además de los cinco dispositivos seleccionados, otros absorbedores puntuales merecen mención por sus características notables:

- **Seabased WEC:** desarrollado por Seabased AB (Suecia), es un absorbedor puntual de un solo cuerpo con un generador lineal de imanes permanentes conectado al flotador. Su arquitectura de accionamiento directo elimina componentes mecánicos intermedios, lo que reduce los puntos de falla y simplifica su mantenimiento. Ha sido objeto de estudios numéricos comparativos por ser un referente en el diseño de generadores lineales en el contexto de los absorbedores puntuales (Jahangir *et al.*, 2025).
- **NEMOS WEC:** desarrollado por NEMOS GmbH (Alemania), es un absorbedor de dos cuerpos con un sistema de PTO hidráulico cuyo diseño modular apunta al despliegue en configuraciones de múltiples unidades. Se enfoca en ge-

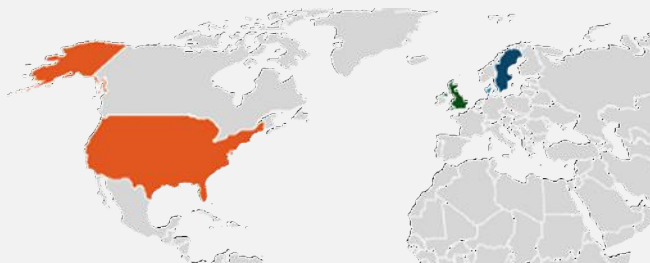
nerar energía para microrredes costeras y ha sido incluido en evaluaciones comparativas del ciclo de vida de WECs (Jahangir et al., 2025).

Análisis geográfico y madurez tecnológica

La Figura 8 muestra la ubicación geográfica de los dispositivos descritos y que cumplen con un nivel de madurez tecnológica mayor o igual a 6. Se concentran en Europa (especialmente Reino Unido, Suecia, Dinamarca y Portugal) y Estados Unidos (Hawái y Oregón), regiones que poseen zonas ideales para pruebas, como el mar del Norte, el Atlántico Norte y las costas de Hawái.

Figura 8

Ubicación geográfica de los absorbedores puntuales con TRLs ≥ 6

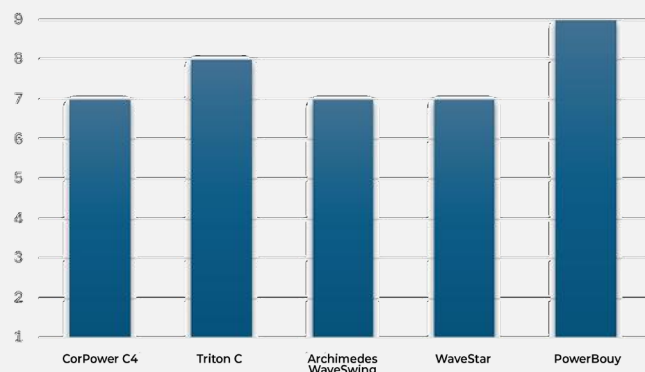


Fuente: elaboración propia (Sánchez, 2025)

La Figura 9 resume el nivel de madurez tecnológica de los cinco absorbedores puntuales analizados. Se observa que la mayoría se encuentra en el punto 7, con solo el PB3 en el 9, seguido del Triton-C en el 8. Esto indica que, si bien la tecnología ha avanzado significativamente, aún queda camino por recorrer para alcanzar la madurez comercial en aplicaciones de media y alta potencia.

Figura 9

Madurez tecnológica de los cinco absorbedores puntuales



Fuente: elaboración propia (Sánchez, 2025)

Discusión

El análisis comparativo de los cinco dispositivos elegidos, junto con la revisión de los otros absorbedores puntuales, evidencian la amplia gama de enfoques tecnológicos de los convertidores de energía undimotriz. Cada ejemplar refleja un diseño condicionado tanto por el entorno operativo como por su objetivo funcional. Esta diversidad no solo afecta la estandarización tecnológica, sino que limita la posibilidad de trasladar un diseño exitoso de una región oceánica a otra (Mahmoodi *et al.*, 2020; Guo y Ringwood, 2021), de modo que un dispositivo concebido para el mar del Norte puede no ser viable en el océano Pacífico debido a las diferencias en la batimetría y el clima de las zonas. Ejemplo de ello es el AWS, que al estar completamente sumergido necesita ser instalado cuando menos a una profundidad de 25 m para funcionar de manera óptima, lo cual restringe su aplicabilidad geográfica (AWS Ocean Energy Ltd, 2022).

En cuanto a los sistemas de PTO, se observa una tendencia hacia configuraciones de accionamiento directo, presentes en el AWS y el PB3. Este tipo de PTO elimina etapas intermedias de conversión mecánica, lo que simplifica el sistema y reduce los puntos de falla. Sin embargo, los generadores lineales de accionamiento directo presentan una mayor complejidad en la electrónica de potencia asociada y son más costosos de fabricar que las soluciones hidráulicas convencionales (Guo y Ringwood, 2021). Los PTO hidráulicos, como los del Triton-C, ofrecen más madurez industrial y permiten desacoplar la generación eléctrica de las fluctuaciones del oleaje mediante acumuladores de presión.

Un hallazgo clave es la evidente falta de documentación técnica accesible. Gran parte de la información disponible sobre los dispositivos es genérica, enfocada en el PTO o en pruebas de laboratorio, sin detalles de elementos críticos como la geometría del flotador, el acoplamiento mecánico, los materiales estructurales o los resultados cuantitativos de las pruebas de campo. Esta limitación se acentúa porque muchos proyectos son financiados por empresas privadas o agencias gubernamentales cuyos datos se consideran confidenciales. Resulta relevante distinguir entre la información declarada por el fabricante y aquella validada experimentalmente, ya que en varios de los 22 dispositivos seleccionados, la potencia nominal reportada no pudo corroborarse mediante fuentes independientes, lo que produce incertidumbre en la comparación. Esta opacidad dificulta la evaluación objetiva entre tecnologías y ralentiza la curva de aprendizaje del sector.

La mayoría de los 22 dispositivos analizados en la etapa comparativa aún se encontraban en niveles de madurez tecnológica inferiores a 7, lo cual se traduce en una escasez de patentes publicadas y una falta de resultados comparables entre prototipos a escala real. De los cinco dispositivos seleccionados para una revisión minuciosa, solo el PB3 ha alcanzado el máximo nivel de madurez, aunque con una potencia nominal de apenas 15 kW y un enfoque orientado a aplicaciones de monitoreo oceánico. El CorPower C4 y el AWS, los más prometedores en términos de potencia, se encuentran en el nivel 7, con miras a escalar al 8 en los próximos años de acuerdo con sus desarrolladores. Esta disparidad entre la madurez tecnológica y la potencia generada refleja la dificultad inherente del campo: los dispositivos más avanzados tecnológicamente tienden a ser los de menor potencia, mientras que los de mayor capacidad aún requieren validación adicional en entornos reales.

Finalmente, la tendencia a construir los dispositivos en torno a sitios y condiciones particulares incrementa los costos de diseño, validación y operación. Esta personalización contrasta con la trayectoria de maduración de la energía eólica marina, donde la estandarización de plataformas y componentes redujo de forma drástica el costo nivelado de energía (LCOE) en menos de dos décadas (IRENA, 2024). El LCOE actual de la energía undimotriz, significativamente superior al de la eólica o la solar, limita su competitividad en mercados de electricidad convencionales (Guo y Ringwood, 2021).

No obstante, el sector muestra señales de avance: la tendencia hacia sistemas híbridos, como los propuestos por Li *et al.* (2025) y Luan *et al.* (2024), que integran absorbedores puntuales con plataformas eólicas flotantes, podría reducir los costos de instalación y mantenimiento al compartir infraestructura. Asimismo, el ciclo de vida ambiental de los absorbedores puntuales ha comenzado a evaluarse de manera sistemática (Jahangir *et al.*, 2025), lo que representa un indicador de madurez del campo y un requisito previo para acceder a financiamiento climático internacional.

Conclusión

La revisión del estado del arte sobre los absorbedores puntuales de energía undimotriz revela una gran cantidad de desarrollos e iniciativas en diferentes partes del mundo. No obstante, casi todos han caído en abandono en etapas tempranas, quedando relegados a prototipos teóricos o cancelados a causa de desafíos técnicos o económicos. De los 59 dispositivos identificados

como absorbedores puntuales, solo 22 alcanzaron un TRL ≥ 6 y únicamente cinco cuentan con la documentación técnica suficiente para someterse a un análisis comparativo robusto.

Los dispositivos revisados presentan una heterogeneidad significativa en cuanto al diseño, PTO, escala de potencia y nivel de madurez. Si bien el PB3 es el único con un TRL de 9, está orientado a aplicaciones de baja potencia. El CorPower C4 y el AWS muestran el mayor potencial de escalamiento, con potencias nominales verificadas de 300 kW y 500 kW respectivamente, ambos con un TRL de 7. Esta disparidad entre madurez tecnológica y capacidad de generación refleja la dificultad de validar estos sistemas en entornos reales a escala comercial.

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo presenta limitaciones propias de una revisión del estado del arte. Por ejemplo, la disponibilidad de información dependiente en gran medida de la documentación pública de los fabricantes introdujo una asimetría entre los dispositivos con mayor y menor transparencia de datos. A su vez, la función de puntuación ponderada empleada para la selección, aunque estructurada, no se validó mediante un proceso formal como el AHP, lo que representa una oportunidad de mejora para estudios futuros.

Como líneas prioritarias de investigación futura se identifican la estandarización de protocolos de prueba en entorno real, el desarrollo de metodologías de comparación que integren el LCOE como criterio de selección, la evaluación del ciclo de vida ambiental de los dispositivos más avanzados y la exploración de configuraciones híbridas que combinen absorbedores puntuales con plataformas eólicas flotantes. La colaboración entre las instituciones académicas, la industria y los organismos gubernamentales será clave para superar los retos de financiamiento y estandarización que actualmente limitan el despliegue comercial de estas tecnologías.

Referencias

- Ali, R., Meek, M. y Robertson, B. (2025). Submerged wave energy converter dynamics and the impact of PTO-mooring configuration on power performance. *Renewable Energy*, 243, 122525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122525>
- Asai, T. y Sugiura, K. (2021). Numerical evaluation of a two-body point absorber wave energy converter with a tuned inerter. *Renewable Energy*, 171, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.021>
- AWS Ocean Energy. (2022). AWS wave energy converter takes shape in Glasgow ahead of testing. <https://awsoccean.com/2021/06/waveswing-takes-shape-in-glasgow/>

- AWS Ocean Energy Ltd. (s.f.). *Archimedes Waveswing*. <https://awsocean.com/archimedes-waveswing/>
- AWS Ocean Energy Ltd. (2022). *Advanced Archimedes Waveswing. WES novel wave energy converter. Stage 3 project. Public report*. https://www.waveenergyscotland.co.uk/media/a3tne2my/22-014r1-wes_nw31_aws_publicreport_v10.pdf
- CorPower Ocean. (s.f.). *Wave energy technology*. <https://corpower-ocean.com/technology/>
- CorPower Ocean. (22 de diciembre del 2022). *CorPower C4 WEC at quayside 'launchpad'*. <https://corpowerocean.com/corpower-c4-wec-at-quayside-launchpad/>
- Cortés, J., Lucero, F., Suarez, L., Escauriaza, C., Navarrete, S.A., Tampier, G., Cifuentes, C., Cienfuegos, R., Manriquez, D., Parragué, B., Osia-dacz, N. y Finke, R. (2022). Open Sea Lab: an integrated coastal ocean observatory powered by wave energy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1249. <https://doi.org/10.3390/jmse10091249>
- Cummins, W.E. (25-27 de enero de 1962). The impulse response function and ship motions [Ponencia]. *Symposium on ship theory*. Universidad de Hamburgo, Hamburgo, Alemania. https://dome.mit.edu/bitstream/handle/1721.3/49049/DTMB_1962_1661.pdf
- Energy Technology Development and Demonstration Programme (EUDP) (s.f.). *Final report (Effektivisering af bølgeenergi vha Tryksatte cyklontanke [Efficiency improvement of wave energy via pressurized cyclone tanks])*. https://eudp.dk/files/slutrapporter/slutrapport_tryksat_cyklontank_eudp_2015-i.pdf
- Fard, H.R., Mahmoodi, K. y Vaghefi, M. (2025). Geometry optimization of a two-body heaving point absorber wave energy converter based on the long-term Oman Gulf wave climate. *Renewable Energy*, 253, 123498. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123498>
- Ferri, F., Ambühl, S., Fischer, B. y Kofoed, J.P. (2014). Balancing power output and structural fatigue of wave energy converters by means of control strategies. *Energies*, 7(4), 2246-2273. <https://doi.org/10.3390/en7042246>
- Guo, B. y Ringwood, J.V. (2021). A review of wave energy technology from a research and commercial perspective. *IET Renewable Power Generation*, 15(14), 3065-3090. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12302>
- Ingram, E. (29 de agosto del 2023). *Oscilla Power prepares to launch Triton-C wave energy converter off Hawaii*. Renewable Energy World. <https://www.renewableenergyworld.com/hydro-power/tidal-wave-energy/oscilla-power-prepares-to-launch-triton-c-wave-energy-converter-off-hawaii/>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC TS 62600-1: Marine energy-wave, tidal and other water current converters-Part 1:*

- Terminology*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/17411/4a6f300d-22cc4777ac323bc3223d74f7/IEC-TS-62600-1-2011.pdf>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2014). *Ocean energy: technology readiness, patents, deployment status and outlook*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_Ocean_Energy_report_2014.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Fostering a blue economy: offshore renewable energy*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Fostering_Blue_Economy_2020.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *World energy transitions outlook 2024*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf
- Jahangir, M.H., Tayebi, M. y Najafabadi, S.G. (2025). A comparative life cycle assessment of three wave energy converters with an economic-environmental approach. *Ocean Engineering*, 329, 121080. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121080>
- Jin, S., Zheng, S. y Greaves, D. (2022). On the scalability of wave energy converters. *Ocean Engineering*, 243, 110212. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110212>
- Li, M., Wei, C., Li, L., Yuan, Z., Liu, Y. y Xue, G. (2025). Numerical study of hybrid systems combining different WECs microarrays based on the TGL semi-submersible floating platform. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1563310. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1563310>
- Luan, Z., Chen, B., He, G., Cui, T., Ghassemi, H., Zhang, Z. y Liu, C. (2024). Research on wavestar-like wave energy converter arrays with a truss-type octagonal floating platform in the South China Sea. *Energy*, 313, 134070. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134070>
- Lundbäck, S. (2016). *Energy transforming unit and energy transforming system comprising such a unit* (U.S. Patent No. US20130236347A1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US20130236347A1/en?q=US20130236347A1>
- Mahmoodi, K., Ghassemi, H. y Razminia, A. (2020). Performance assessment of a two-body wave energy converter based on the Persian Gulf wave climate. *Renewable Energy*, 159, 519-537. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.071>
- Mundon, T.R. (2022). *Drivetrain for a wave energy converter* (U.S. Patent No. US11293398B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US11293398B2/en>
- Oscilla Power, Inc. (2023). *Oscilla Power - model Triton-C - wave energy converter*. Energy XPRT. <https://www.energy-xprt.com/products/oscilla-power-model-triton-c-wave-energy-converter-911070>

- Oscilla Power, Inc. (s.f./a). *Technology*. <https://www.oscillapower.com/technology>
- Oscilla Power, Inc. (s.f./b). *Triton-C*. <https://www.oscillapower.com/triton-c-1>
- Parsa, K., Mekhiche, M., Sarokhan, J. y Stewart, D. (2017). Performance of OPT's commercial PB3 PowerBuoyTM during 2016 ocean deployment and comparison to projected model results. *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 10: Ocean Renewable Energy* (V010T09A021). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-62008>
- Power Magazine. (1 de septiembre del 2016). *Ocean Power Technologies deploys commercial PowerBuoy with energy storage* [Fotografía]. <https://www.powermag.com/ocean-power-technologies-deploys-commercial-powerbuoy-energy-storage/>
- PRIMRE. (2026). Recuperado el 10 de noviembre del 2025. <https://openei.org/wiki/PRIMRE>
- Steenstrup, P.R. (2011). *Installation comprising a wave power apparatus and a support structure therefor* (U.S. Patent No. US7956478B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US7956478B2/en?q=US7956478B2>
- Steenstrup, P.R., Hansen, N.A. y Hansen, K. (2010). *Wave power apparatus comprising a plurality of arms arranged to pivot with a mutual phase shift* (U.S. Patent No. US7694513B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US7694513B2/en?q=US7694513B2>
- The European Marine Energy Centre LTD (EMEC). (s.f.). *Wave devices*. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- Water Power Technologies Office (WPTO). (2022). *2022 Project Peer Review*. <https://doi.org/10.2172/1971607>
- Wave Star Energy. (s.f./a). *Technology*. <https://wavestarenergy.com/about/>
- Wave Star Energy. (s.f./b). *Wave Star. Unlimited Clean Energy*. <https://wavestarenergy.com/>

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en conjuntos habitacionales del movimiento moderno en Sevilla

Seismic vulnerability assessment of modernist housing complexes in Seville

Perla Rafael Santa Ana Lozada* 

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

María Victoria Requena García de la Cruz 

Antonio Morales Esteban** 

Universidad de Sevilla, Sevilla, España

*psal@unam.mx

**ame@us.es

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2061

Fecha de recepción: 20 de octubre del 2025

Fecha de aceptación: 13 de mayo del 2026

Resumen

Entre 1923 y 1950, la construcción en Sevilla se centró en la vivienda de tipo social. De este periodo datan dos conjuntos representativos con edificios patrimoniales del movimiento moderno: la barriada del Carmen, en la ribera del río Guadalquivir, y La Estrella, al sur de la ciudad. Si bien las edificaciones preceden a las normas de construcción y sísmicas españolas, actualmente siguen en uso sin daños relevantes. Sin embargo, la región presenta actividad sísmica, por lo que se encuentran en riesgo debido a su solución arquitectónica volumétrica, orgánica e irregular, junto con su cimentación en suelo blando. En este trabajo, se evaluó su vulnerabilidad de manera híbrida utilizando el método de Benedetti y Petrini (1984) y un método mecánico basado en las curvas de capacidad de los edificios. La resistencia y el posible nivel de daño se determinaron mediante modelos de elementos finitos. Los resultados muestran que estas construcciones podrían sufrir daños significativos por su configuración formal, los materiales empleados y el tipo de suelo. La relevancia del estudio radica en que sus conclusiones pueden aplicarse en otras zonas sísmicas con suelos similares, como la Ciudad de México, donde edificaciones con características análogas enfrentan riesgos comparables.



Palabras clave: análisis estructural, arquitectura patrimonial, interacción suelo-estructura, movimiento moderno, solución formal orgánica, vulnerabilidad sísmica

Abstract

Between 1923 and 1950, construction in Seville focused on social housing. Two representative complexes were built during this period: barriada del Carmen, located on the banks of the Guadalquivir River, and La Estrella, in the southern area of the city. Buildings from both places are deemed heritage sites of modernist architecture. Despite being erected prior to Spanish construction and seismic regulations, they remain in use without major damage. Nevertheless, given the region's seismic activity, they are vulnerable to earthquakes due to their architectural solutions –volumetric, organic and irregular–, as well as their foundations on soft soil. This work evaluates their seismic vulnerability through a hybrid approach that combines the Benedetti and Petrini (1984) method, and a mechanical approach based on capacity curves for each building. Structural capacity and potential damage levels were obtained with finite element modeling. Results indicate that the buildings' volumetric configuration, construction materials and soil conditions make them prone to significant damage under seismic action. The study's relevance lies in the applicability of its findings, which can be extended to other seismic regions with similar soil characteristics, notably Mexico City, where comparable vulnerabilities exist.

Keywords: heritage architecture, organic geometry, seismic vulnerability, soil-structure interaction, modernism, structural analysis

Antecedentes

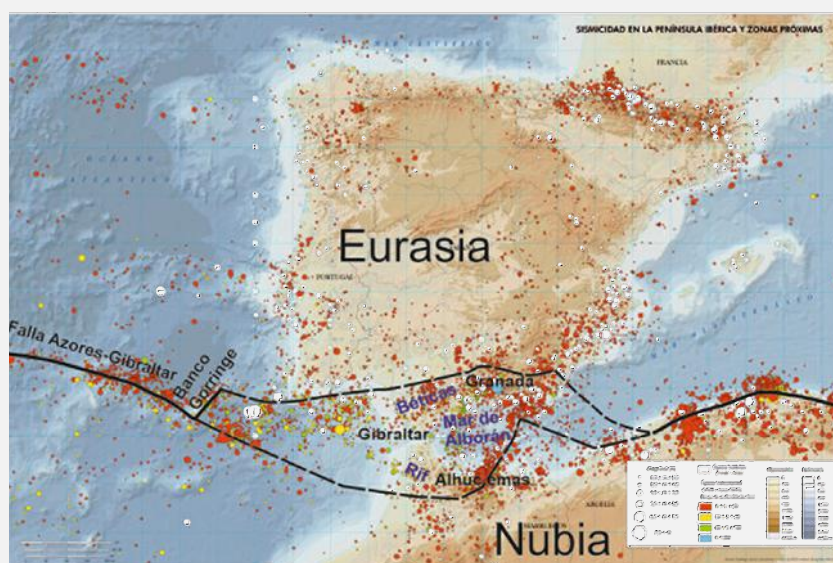
La interacción entre las placas euroasiática y africana (Fig. 1), en el mar Mediterráneo y el estrecho de Gibraltar, ocasiona movimientos sísmicos que provocan numerosas fallas en las regiones sur y suroeste de la península ibérica. Pese al nivel de riesgo del lugar, la población lo ignora debido al largo periodo de retorno de los sismos (Morales-Esteban et al., 2014, citado en Zapico Blanco, 2020).¹ En esta región de alta actividad sísmica se encuentra Sevilla, ubicada en la comunidad autónoma de Andalucía, en España, donde dichos fenómenos se atribuyen tanto a las fallas geológicas mencionadas como a fallas geotécnicas locales.

¹ Los sismos ocurridos en la región Algarve-Huelva, por ejemplo, presentan parámetros M_w (magnitud de momento) superiores a 6 (Zapico Blanco, 2020).

En la ciudad se han registrado sismos con epicentros cercanos, entre los cuales destaca el de febrero de 1969, de 8 M_s (magnitud de ondas superficiales), que causó daños graves en la catedral (donde una bóveda colapsó parcialmente) e intermedios en otras edificaciones. Si bien se considera una zona de riesgo sísmico moderado por presentar valores aproximados de PGA (aceleración máxima del suelo) de entre 0.08 y 0.10 g, puede alcanzar los 0.30 g para sismos con periodos de retorno de 580 años, de acuerdo a Fazendeiro Sá *et al.* (2021).

Figura 1

Límite de las placas tectónicas entre Eurasia y África



Fuente: García Ruiz (2021)

Entre 1920 y 1929, la población de Sevilla tuvo un aumento significativo, acentuado con la Exposición Iberoamericana de 1929, lo que suscitó una crisis habitacional² y una subsecuente construcción masiva de vivienda social. A partir de 1950 se erigieron 43,000 unidades en las periferias de la ciudad. Las denominadas *barriadas* estaban compuestas por edificios que variaban en altura, niveles y número de viviendas. Debido a su ubicación marginal, el proyecto urbano de estos conjuntos carecía de áreas comerciales o de esparcimiento. Mientras tanto, también se levantaron algunas viviendas residenciales con espacios recreativos y cercanas al equipamiento de la zona (Marchena Gómez y Hernández Martínez, 2016).

² Debido a la Guerra Civil que sufrió España (1936-1939), no se construyeron las viviendas necesarias en todas las ciudades. En Sevilla, donde había una demanda de 140,000, se edificaron 13,000 en este periodo (Marín de Terán, 1980).

En su mayoría, ambos tipos de vivienda se proyectaron con edificaciones funcionales, económicas en su construcción y exentas de ornamentos, expresando los principios del movimiento racionalista o moderno (MoMo).³ Muchas de las soluciones arquitectónicas formales fueron orgánicas y volumétricamente irregulares. Por otra parte, la implementación de este estilo se vio limitada por el predominio del regionalismo, que dio lugar a obras singulares donde convergen los ideales modernos y soluciones adaptadas al contexto sevillano (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2012).

La primera norma sísmica española se publicó hasta 1969,⁴ por lo que en el diseño arquitectónico y constructivo de las viviendas procedentes del MoMo sevillano no se siguieron las recomendaciones para soportar ex profeso las fuerzas sísmicas (Presidencia del Gobierno de España, 1969). Adicionalmente, al situarse en la ribera del río Guadalquivir, la ciudad presenta terrenos aluviales y arcillosos que han provocado hundimientos en las construcciones y, en algunos casos, han intensificado los efectos sísmicos (*Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones*, 2005).

La vulnerabilidad sísmica de una edificación se entiende como su predisposición a sufrir daños por movimientos sísmicos. Este riesgo dependerá de los parámetros considerados, comúnmente los correspondientes a los elementos estructurales, dada su importancia en la seguridad de las construcciones. La ingeniería sísmica emplea distintas formas de evaluación, incluyendo los métodos de gran escala, relacionados con el riesgo sísmico a nivel territorial y utilizados para detectar las edificaciones que requieren refuerzo o mantenimiento. Estos se dividen en tres tipos: empíricos, mecánicos e híbridos (Puncello y Caprili, 2023).

Se han realizado diversos estudios sobre la vulnerabilidad de edificios patrimoniales, en particular iglesias, templos y construcciones con bloques de tierra cocida y mampostería de barro cocido sin refuerzo o con refuerzo mínimo (Asteris *et al.*, 2014; Boschi *et al.*, 2018; Cunalata y Caiza, 2022; Moreno González y Bairán García, 2012). Como resultado se han encontrado niveles altos de vulnerabilidad debido a las propiedades de la mampostería sin refuerzo, así como al tipo de suelo. No obstante, pocas veces se han analizado los edificios de concreto reforzado y mampostería integrada que datan de mediados del siglo XX. Algunos trabajos tratan sobre el comportamiento

³ Movimiento promovido en Europa a inicios del siglo XX.

⁴ La primera norma sismorresistente española fue la PGS-1, parte A, aplicada provisionalmente a todos los proyectos.

de edificios italianos contruidos con mampostería sin reforzar (Di Domenico *et al.*, 2023), el comportamiento sísmico de distintos casos generales de edificios sin diseño normativo con muros diafragma y marcos de concreto (Falcão Moreira *et al.*, 2023) o la determinación de la vulnerabilidad de casos generales (Messaoudi *et al.*, 2025).

Esta investigación busca examinar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de vivienda representativas del MoMo en la ciudad de Sevilla. Se emplea un método híbrido que comprende analizar las condiciones de las obras de acuerdo con las normativas española, europea y mexicana, determinar el índice de vulnerabilidad a partir de sus características estructurales según el método empírico de Benedetti y Petrini (1984) y verificar los resultados con un método mecánico basado en los espectros de capacidad. Este último punto contempla modelos de elemento finito, considerando la caracterización del terreno, materiales y elementos estructurales, así como un análisis elástico y no elástico paso a paso de ambos edificios. Los objetos de estudio son la barriada del Carmen y La Estrella, ejemplos pioneros de la vivienda moderna tanto social como residencial y que han sido catalogados por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico como edificios patrimoniales.⁵

Paralelamente, en la Ciudad de México, en la década de 1970, las viviendas multifamiliares de mediana y gran altura se edificaron con sistemas constructivos similares a los ya expuestos (con muros diafragma y marcos de concreto reforzado), y muchas siguen en funcionamiento (Sarmiento Ocampo, 2023). Por lo tanto, se plantea aplicar allí las conclusiones del contexto sevillano. Esta propuesta responde a que, si bien las edificaciones mexicanas tienen un riesgo sísmico mayor que las españolas, casi todos los parámetros en las evaluaciones de vulnerabilidad de ambos países coinciden, debido a que sus sistemas constructivos, condiciones de terreno y exposición sísmica son compatibles.

Características de la barriada del Carmen y La Estrella

Las características geométricas de los edificios se obtuvieron a partir de los planos arquitectónicos originales. Las características de sus elementos estructurales y las propiedades de los materiales de construcción provienen de estudios, memorias de cálculo e información de análisis previos.

⁵ El Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico está integrado en el Documentation and Conservation of buildings, sites and neighbourhoods of the Modern Movement (DOCOMOMO) Ibérico.

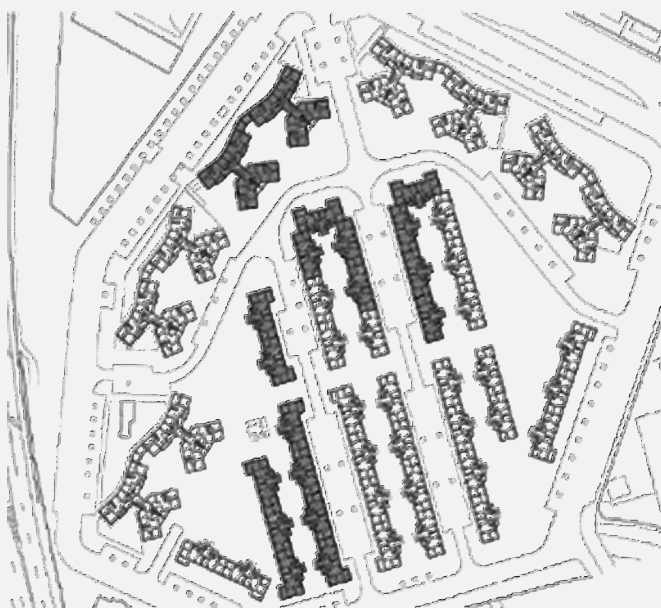
Barriada del Carmen

La barriada de Nuestra Señora del Carmen es un conjunto habitacional de vivienda social colectiva proyectado por el arquitecto Luis Recaséns⁶ y construido entre 1955 y 1958. Fue promovido por el Instituto Nacional de la Vivienda para beneficiar a las clases obreras. El terreno, cedido por el ayuntamiento de Sevilla, se localiza en la periferia, desconectado de la ciudad. En específico, se encuentra al poniente de la barriada El Tardón, en Triana, junto al muro de defensa del río Guadalquivir (re-HABITAR, s.f.).

La barriada se compone de 636 viviendas, distribuidas en 52 edificios que parten de dos prototipos: edificaciones con geometría en forma de “X”, con una altura de 10 niveles en el cuerpo principal y 5 en un cuerpo anexo, ubicadas perimetralmente en el conjunto, y edificaciones rectangulares de media altura con 4 niveles (Fig. 2). Ambos modelos conforman unidades habitacionales reducidas, con un área construida de entre 45 y 50 m². Se dispusieron con base en la geometría de la parcela para asegurar la eficiencia espacial y la orientación solar. En el ámbito urbano, las viviendas se organizan en torno a tres plazas y calles interiores peatonales pensadas para fomentar el encuentro vecinal (re-HABITAR, s.f.).

Figura 2

Planta de la barriada de Nuestra Señora del Carmen, con los dos tipos de edificaciones



Fuente: Gómez Villa *et al.* (2019)

⁶ Luis Recaséns Méndez-Queipo de Llano fue un arquitecto nacido en Madrid, autor de importantes proyectos en Sevilla, como el conjunto de viviendas Los Diez Mandamientos o la Iglesia de San Pedro y San Pablo.

Los materiales de construcción empleados en estas edificaciones fueron concreto reforzado colado en sitio, tabiques de arcilla recocida prefabricados y los elementos para el forjado o sistema de piso: viguetas pretensadas en forma de “T” invertidas y bovedillas de concreto, en consonancia con la practicidad constructiva del MoMo. Las soluciones estructurales son simples y repetitivas para facilitar la ejecución en serie (Pérez Escolano, 1998).

Para el presente análisis de vulnerabilidad sísmica se seleccionó el módulo habitacional con el mayor número de niveles. Este edificio presenta una solución geométrica en planta similar a una “X”, donde un núcleo de circulación vertical une un cuerpo de 10 niveles (Fig. 3) con otro de 5, formando una sola edificación sin juntas constructivas verticales. Los primeros 5 niveles tienen 4 viviendas en total, 1 en cada ala (Fig. 4). Espacialmente, los módulos cuentan con elementos de soporte formados por trabes y columnas de concreto reforzado colado en sitio, espaciados a cada 4.50 m máximo en ambas direcciones. No hay balcones, y las cornisas de la cubierta forman parte de la losa con el mismo espesor y armado.

Figura 3

Edificios altos de la barriada del Carmen en su estado actual



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

Figura 4

Vista posterior de dos edificios tipo “X” en la barriada del Carmen



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

A continuación, se describen las características constructivas de la edificación. En primer lugar, presenta marcos de concreto con acero de refuerzo ligados con muros de arcilla recocida prefabricada (en contacto directo con las trabes de concreto) que actúan como fachada principal perimetral y, por lo tanto, funcionan estructuralmente como muros diafragma. En ningún punto de la planta ni de elevación se encuentran juntas verticales constructivas.

Las secciones de los elementos estructurales en concreto reforzado son las siguientes: columnas de 30 cm [x] 30 cm, trabes de 30 [cm x] 55 cm, muro de mampostería ligado a los marcos de tabique de barro de 12 cm de ancho, muros divisorios de mampostería de 10 cm de base y forjado de 25 cm. Este sistema de piso está formado por viguetas pretensadas en T invertidas y bovedillas de concreto de 20 cm de ancho con 5 cm de capa de compresión (Santa Ana Lozada, 2025, p. 268).

El concreto empleado tiene un esfuerzo resistente a la compresión (f'_c) de 175 kg/cm² y el acero de refuerzo (varilla grado 36) presenta un esfuerzo de fluencia (f_y) de 2,530 kg/cm² y una densidad de 2500 kg/m³.⁷ Las cargas vivas y muertas

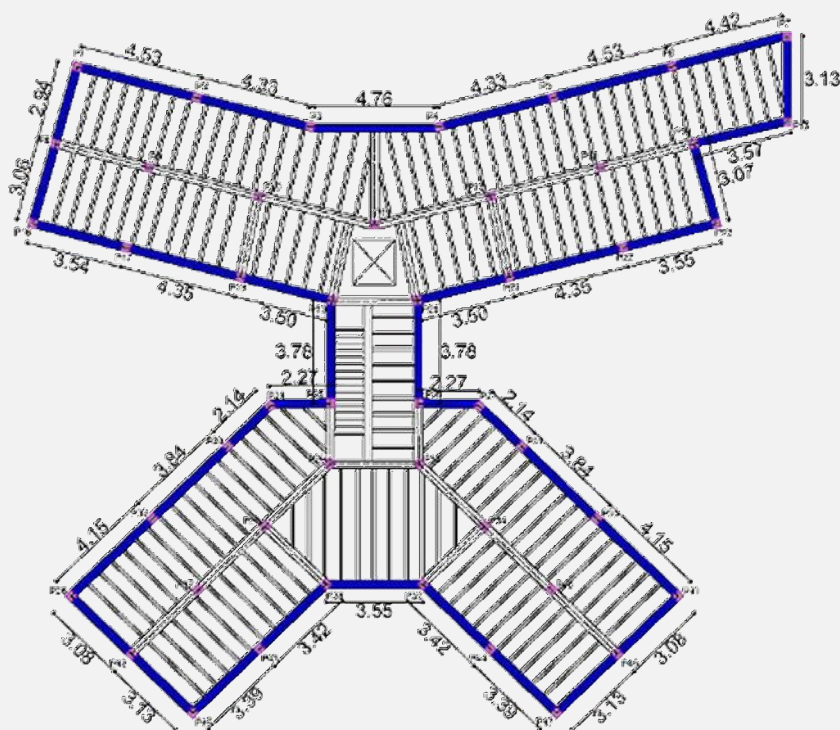
⁷ Las propiedades mecánicas de los materiales se obtuvieron a partir de los planos estructurales originales, mientras que las secciones de los elementos fueron corroboradas en sitio a partir de los planos estructurales del edificio.

se obtuvieron de la norma SE-AE⁸ para uso habitacional y de cubierta (Código Técnico de la Edificación, 2009). Las losas o forjados se encuentran al mismo nivel y están ligadas a las trabes y columnas de concreto, de modo que transmiten adecuadamente la fuerza cortante sísmica a estas últimas. La losa de cubierta, al presentar una sola pendiente, no cuenta con trabe de cumbrera.

Los claros de esta edificación, en promedio, son de 4.50×2.80 m. La altura de entrepiso es de 3 m en todos los niveles. El núcleo de circulación vertical que une los dos cuerpos es de 3.70 m de largo $\times$ 3.20 m de ancho (Fig. 5). La dimensión total de la edificación consta de 28 m de largo en horizontal y 23 m de ancho en vertical.

Figura 5

Planta estructural del cuerpo analizado de la barriada del Carmen



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

El terreno donde se ubica la barriada del Carmen se caracteriza por sus estratos profundos (–10 a –20 m) formados por arcillas limoarenosas con contenido de humedad considerable y plasticidad media. En los niveles intermedios (–3 a –10 m), el suelo

⁸ El Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural. Acciones en la edificación (2009) es la normativa española donde se muestran los valores de sobrecarga por uso (carga viva) para vivienda (61.17 kg/m^2) y azotea (30.57 kg/m^2). El peso propio de la losa es de 387 kg/m^2 .

se compone de arcillas limosas de plasticidad media, con consistencia blanda, mientras que el estrato superficial (0 a -3 m) está constituido por rellenos de arcillas limosas alteradas muy blandas, así como restos de cascajo.⁹ Con base en lo anterior, la solución de cimentación empleada para estas edificaciones consistió en zapatas aisladas de concreto reforzado, desplantadas a una profundidad de -3.5 m, sin trabes de liga.

Conjunto residencial La Estrella

Al sur de Sevilla, en la avenida Manuel Siurot, cerca del parque de María Luisa, con infraestructura y zonas verdes alrededor, se construyó el conjunto residencial La Estrella, conformado por 9 bloques dispuestos de forma perimetral en el terreno (Fig. 6). La conexión entre las alas del edificio dio lugar a un espacio ajardinado central al interior, el cual refuerza el carácter comunitario y la sensación abierta del sitio (Vázquez Consuegra y Consejería de Obras Públicas y Transportes, 1992).

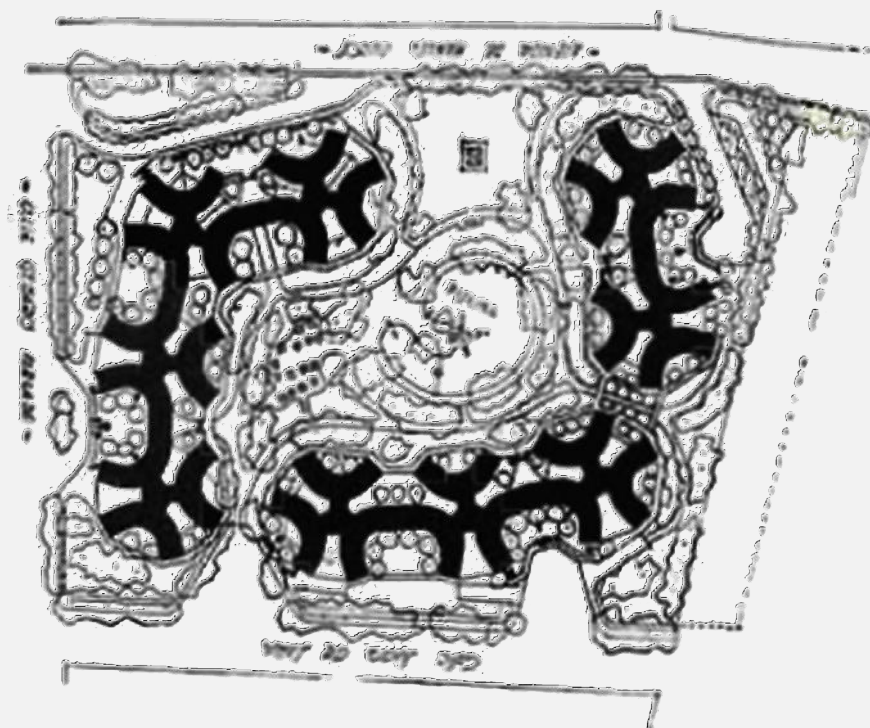
Este proyecto fue realizado por los arquitectos Rodrigo y Felipe Medina Benjumea¹⁰ entre 1955 y 1963, con una propuesta de tres alas curvas en planta que, al estar unidas por un núcleo central, forman una planta en estrella. Se trata de una reinterpretación de la tipología en forma geométrica de “H” empleada en las barriadas, acorde a los cánones arquitectónicos del MoMo y enfocada en las viviendas residenciales intensivas para la clase media. Espacialmente, cada módulo cuenta con trabes y columnas de concreto reforzado colado en sitio, espaciadas a cada 7 m máximo en ambas direcciones. Los balcones están integrados en la misma losa de entrepiso, soportados por trabes principales, y no tienen cornisas debido al pretil con el que cuentan, sujeto adecuadamente a la losa principal de la cubierta.

⁹ La información geotécnica se obtuvo a partir de un estudio de mecánica de suelos realizado en octubre del 2006 por la empresa Codexsa para un conjunto de viviendas plurifamiliares en la calle de Mosquera de Figueroa, en Sevilla.

¹⁰ Rodrigo y Felipe Medina Benjumea fueron arquitectos sevillanos titulados en la Escuela de Arquitectura de Madrid. Juntos realizaron distintos proyectos en su ciudad natal como la Universidad Laboral, Dos Hermanas o la Sede Social de la Compañía Sevillana de Electricidad.

Figura 6

Planta del conjunto La Estrella, con sus 9 cuerpos



Fuente: Ramos Carranza et al. (2003)

La planta de cada bloque está formada por tres edificaciones semicirculares, unidas en el centro por el núcleo de servicios; cada edificio alberga dos departamentos. Esta solución formal permite una mejor ventilación directa en todos los espacios de la casa, así como una mayor iluminación natural. El uso de tabiques de arcilla horneados prefabricados en la fachada le otorga un valor expresivo con formas orgánicas, al estilo de las que proponían los arquitectos modernos de entonces.¹¹ Cada edificio cuenta con diez niveles y un núcleo central de servicios a 2 m por encima de la cubierta general; sin embargo, un pretil de 3 m de altura cubre todos los equipos de cubierta (Fig. 7) (Sánchez-Cid Endériz et al., 2003).

¹¹ En ese momento, arquitectos como Sven Markelius, al norte de Europa, planteaban proyectos modernos como el Plan General de Estocolmo.

Figura 7

Dos bloques de edificios del conjunto residencial
La Estrella en su estado actual



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

Las secciones de los elementos estructurales de concreto reforzado son las siguientes: columnas de 40 cm × 55 cm, trabes de 25 cm × 65 cm en su eje semicircular interior, 25 cm × 55 cm en sus ejes semicirculares interior y exterior, y 25 cm × 25 cm en los ejes perpendiculares. Los muros de fachada fueron construidos con mampostería de 12 cm de espesor, la cual está vinculada a la estructura principal, y un forjado de 25 cm formado por vigueta y bovedilla con un peralte de 20 cm y una capa de compresión de 5 cm (Santa Ana Lozada, 2025, p. 296).

En la cubierta no hay trabes de cumbrera debido a que cuenta con una sola pendiente; sin embargo, las trabes de la cubierta se encuentran al mismo nivel y están ligadas a las columnas de concreto, de modo que transmiten adecuadamente la fuerza cortante sísmica a estas últimas (Fig. 8).

Obtención de la vulnerabilidad de las edificaciones

Los reglamentos de construcción proporcionan condiciones de regularidad para determinar aspectos que pueden implicar un riesgo de daño en las edificaciones. Conocer estos criterios facilita la evaluación empírica para obtener el índice de vulnerabilidad, ya que se complementan o son similares.

Condiciones de regularidad

El primer punto para determinar la posible vulnerabilidad sísmica de las edificaciones es la revisión denominada “Condiciones de regularidad”.¹⁴ Todos los reglamentos sísmicos solicitan realizar esta verificación, considerando los mismos aspectos geométricos y formales arquitectónicos, con ligeras variaciones en algunos puntos. A continuación, en la Tabla 1 se presentan las revisiones de ambos tipos de edificios, tomadas de la Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02) (Ministerio de Fomento, 2009) de España, el Eurocódigo 8 (2004) y la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo del Reglamento de Construcción de la CDMX (NTCDS, 2023).

Tabla 1
Revisión de las condiciones de regularidad de la barriada del Carmen y La Estrella conforme a las normativas española, europea y mexicana

NCSE-02 Condiciones de regularidad	Edificio “X” de la barriada del Carmen	Edificio de La Estrella
La disposición geométrica en planta es simétrica y regular, con una composición con dos ejes de simetría ortogonales	No	No
Si un edificio es asimétrico, presenta juntas verticales para la separación en cuerpos regulares independientes	No	No
La distribución de los elementos estructurales es uniforme y simétrica	No	No
Si se tienen plantas diáfanas con el resto de las plantas muy compartimentadas, debe tenerse en cuenta la diferencia de rigidez entre las plantas	No aplica	No aplica
Cuando la aceleración sísmica de cálculo (a_c) es mayor a 0.12 g, la masa no debe exceder por más del 15% la de las plantas contiguas	No aplica	No aplica

¹⁴ En la NTCDS, el quinto capítulo “Estructuras irregulares” establece los puntos de evaluación para determinar si un edificio es irregular. La NCSE-02 indica las condiciones geométricas para las edificaciones en el capítulo IV. Finalmente, en el inciso 4.3 del Eurocódigo 8 se evalúa la regularidad de la edificación y sus elementos.

Si se confía la resistencia de los esfuerzos horizontales a elementos como muros, estos deben colocarse al menos en dos direcciones, en posición simétrica y en el perímetro exterior de la planta	Sí	Sí
La distancia entre los ejes de la viga y de los pilares ¹⁵ debe ser menor a $30 \text{ cm}/4 = 7.5 \text{ cm}$ (barriada del Carmen) o menor a $40 \text{ cm}/4 = 10 \text{ cm}$ (La Estrella)	Sí	Sí
Se evita que sobre las vigas principales descansen otros elementos resistentes estructurales	No	No
Los elementos secundarios tendrán la capacidad para desplazarse	No	No
Eurocódigo 8 Condiciones de regularidad		
La forma en planta debe ser compacta. Las salientes deben ser menores al 5% de la dimensión del entrepiso en planta	No	No
La rigidez de las salientes debe ser igual a la rigidez de la parte central	No	No
La relación entre el lado largo y el lado corto debe ser menor a 4. Para la barriada del Carmen, $26 \text{ m}/6 \text{ m} = 4.33 > 4$, y para La Estrella, $36.9 \text{ m}/7.5 \text{ m} = 4.89 > 4$	No	No
Las columnas, trabes y muros portantes no se interrumpen en la altura	Sí	Sí
El peso de los entrepisos se mantiene constante	Sí	Sí
Existe diferencia de tamaño en las plantas de losa de entrepisos	Sí	No
NTCDS Condiciones de regularidad		
El desplazamiento lateral no debe exceder por más del 15% el desplazamiento lateral promedio (irregularidad por torsión)	No	No
El desplazamiento lateral no debe exceder por más del 30% el desplazamiento lateral promedio (fuerte irregularidad por torsión)	Sí	Sí
Sus entrantes y salientes deben ser menores al 40% de la dimensión paralela del edificio en planta	Sí	Sí
No hay irregularidad por flexibilidad excesiva en el diafragma	Sí	Sí
La planta del edificio no debe tener una reducción mayor al 40% del ancho de la losa debido a vanos en esta	Sí	Sí
No hay irregularidad por reducción geométrica en elevación	No	Sí
No hay irregularidad en elevación por reducciones bruscas de rigidez lateral	No	Sí
No hay fuerte irregularidad en elevación por reducciones bruscas de rigidez lateral	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia, con información tomada de la NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009), el Eurocódigo 8 (2004) y la NTCDS (2023)

¹⁵ En este artículo, *viga* es equivalente a *trabe*, mientras que *pilar* es equivalente a *columna*.

Las normas españolas evalúan la solución formal del edificio con base en su simetría y el uso de juntas verticales constructivas. Para zonas con mayor aceleración sísmica, se solicita que el peso de los entrepisos no exceda por más del 15% el de los entrepisos contiguos. Por otra parte, se revisa que todos los elementos portantes (p. ej., columnas y trabes) se encuentren en la misma posición en todos los niveles, que sobre las trabes no se apoyen muros y columnas y que estos últimos lleguen a la cimentación, y que los elementos estructurales secundarios (p. ej., muros divisorios) sean capaces de desplazarse. Asimismo, se consideran las plantas diáfanas y la separación entre los ejes de las columnas y las trabes. Las edificaciones de la barriada del Carmen y La Estrella incumplen cinco de los puntos requeridos para clasificarse como estructuras regulares, lo que implica un alto índice de vulnerabilidad ante un evento sísmico.

El Eurocódigo 8 verifica la ausencia de salientes del edificio con un área mayor al 5% con respecto a la del entrepiso, que la rigidez en planta de los entrepisos no supere la de los elementos portantes verticales y, en el caso de geometrías con salientes, donde la rigidez de las ramas laterales debe ser similar a la del cuerpo central, la esbeltez de la edificación se revisa con la proporción de su geometría en planta. Adicionalmente, se verifica que los elementos portantes principales corran a lo largo del edificio sin interrupciones y que el peso y el tamaño de cada nivel sean similares en altura. En este caso, ambos edificios cumplen con la mitad de las condiciones de regularidad.

Según la regulación mexicana, se debe efectuar un análisis estático del edificio aplicando fuerzas laterales para determinar los desplazamientos laterales en diferentes puntos tanto en planta como en elevación y, con ello, calcular valores como la torsión sísmica del edificio, la flexibilidad del diafragma rígido y el cambio de rigidez lateral en algún entrepiso.¹⁶ En este sentido, a falta de un análisis dinámico elástico, a partir de la solución geométrica sólo es posible obtener los parámetros referentes al tamaño y la posición de los vanos en planta, o visualizar una reducción geométrica en elevación. Por ello, a diferencia de otras normativas, con esta resulta difícil conocer la vulnerabilidad del edificio de forma directa y simplificada.

¹⁶ La torsión sísmica es el giro de un edificio en torno a un eje vertical; se determina de forma aproximada con base en la relación entre los desplazamientos laterales de un extremo del edificio y los de otro contrario al aplicar una fuerza horizontal por nivel en la edificación. El diafragma rígido se refiere a elementos rígidos horizontales (sistemas de piso o losas) que conservan su forma ante las fuerzas laterales de un sismo, y solo pueden desplazarse en dos direcciones. El cambio de rigidez lateral significa el aumento o la disminución del tamaño o el número de elementos verticales portantes en un entrepiso.

De acuerdo con los criterios citados de la NTCDs (2023), el edificio de la barriada del Carmen se clasifica como fuertemente irregular, tanto en planta como en elevación, al incumplir tres de los requerimientos de regularidad. Por su parte, el edificio de la Estrella solo falta al primer punto relativo a la torsión, por lo que se describe como irregular.

Índice de vulnerabilidad

A partir del análisis referente a las normativas, se procede a calcular el índice de vulnerabilidad de ambos edificios mediante una evaluación basada en el método de Benedetti y Petrini (1984). En la Tabla 2 se muestra la matriz de los parámetros utilizados y se desglosan los puntos considerados para determinar sus valores.

Tabla 2
Parámetros de evaluación del método de Benedetti y Petrini

Parámetros	Clase K_i				Peso W_i
	A	B	C	D	
1. Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.00
2. Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3. Resistencia convencional	0	5	25	45	1.50
4. Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5. Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1.00
6. Configuración en planta	0	5	25	45	0.50
7. Configuración en elevación	0	5	25	45	1.00
8. Distancia máxima entre los muros	0	5	25	45	0.25
9. Tipo de cubierta	0	5	25	45	1.00
10. Elementos no estructurales	0	5	25	45	0.25
11. Estado de conservación	0	5	25	45	1.00

Nota: K_i es el grado de vulnerabilidad específico asociado al parámetro i y W_i es su factor de importancia.

Fuente: Benedetti y Petrini (1984)

En la Tabla 3 se presentan los niveles de vulnerabilidad de acuerdo con este método, en función de la relación entre el porcentaje obtenido y el valor total posible.

Tabla 3

Niveles de vulnerabilidad según el método de Benedetti y Petrini

Nivel de vulnerabilidad	Índice de vulnerabilidad en porcentaje
Baja	0-25%
Media	26-50%
Alta	51-100%

Fuente: Benedetti y Petrini (1984)

Para determinar el índice de vulnerabilidad de cada una de las edificaciones, se tomaron en cuenta las siguientes características finales basadas en las condiciones de las normativas antes mencionadas:

- a) **Organización del sistema resistente:** ambas edificaciones se ubican en la clase B, pues en sus estructuras las trabes se conectan a las columnas y forman marcos rígidos que contribuyen a soportar las fuerzas cortantes verticales sísmicas.
- b) **Calidad del sistema resistente:** ambas edificaciones se califican en la clase A, dado que sus muros de mampostería se componen de tabiques prefabricados homogéneos, constantes, de buena calidad y unidos entre sí con mortero.
- c) **Resistencia convencional:** en ambas edificaciones, el sistema de marcos de concreto con muros de mampostería tipo diafragma presenta una resistencia a cortante de la clase A para sismos de diseño en la zona.
- d) **Posición del edificio y cimentación:** ambos casos se ubican en la clase D, ya que la cimentación del edificio en la barriada del Carmen se encuentra desplantada a una profundidad superior a 1 m, igual que ocurre en el edificio de La Estrella, situado sobre un terreno arcilloso con una pendiente aproximada del 10%.
- e) **Diafragmas horizontales:** ambas edificaciones se encuentran en la clase A debido a que, en cuanto a sus forjados, los diafragmas horizontales se encuentran al mismo nivel; su deformabilidad es despreciable y su conexión con los elementos de concreto reforzado es adecuada.
- f) **Configuración en planta:** el edificio de la barriada del Carmen se considera en la clase D, ya que en este parámetro es irregular y asimétrico en una dirección, mientras que el edificio de La Estrella se considera en la clase B,

pues su configuración es asimétrica en una dirección, pero no tiene otro tipo de saliente ni irregularidad.

- g) **Configuración en elevación:** el edificio de la barriada del Carmen se sitúa en la clase D por ser irregular, al presentar una discontinuidad importante en el sexto nivel. A su vez, el edificio de la Estrella es continuo en toda su altura, por lo que se sitúa en la clase A.
- h) **Distancia máxima entre los muros:** ambas edificaciones alcanzan la clase A puesto que la distancia entre los marcos de concreto y la ubicación de los muros perimetrales de mampostería son adecuadas.
- i) **Tipo de cubierta:** ambos casos se calificaron en la clase B porque su tipo de cubierta es estable y está bien conectada a los marcos de concreto, sin una trabe de cumbrera.
- j) **Elementos no estructurales:** el edificio de la barriada del Carmen (colocado en la clase C) presenta cornisas integradas al forjado del último nivel, mientras que el de La Estrella cuenta con balcones integrados a la estructura de los diafragmas. Solo el edificio de La Estrella cuenta con parapetos, los cuales están correctamente sujetos a la estructura principal, por lo que está en la clase B.
- k) **Estado de conservación:** tanto el edificio de La Estrella como el de la barriada del Carmen se consideran en la clase A, ya que mayormente se encuentran en buen estado, sin lesiones ni grietas visibles.

Con base en este método, el edificio de la barriada del Carmen tiene un índice de vulnerabilidad de 114.25, es decir, un nivel medio (30%), mientras que el de La Estrella es de 47.5, por lo que su nivel es bajo (12.03%). Si a estos resultados unimos las observaciones referentes a las normativas, se confirma que la vulnerabilidad sísmica del edificio de la barriada del Carmen es media-alta debido a su solución volumétrica irregular, y que la del edificio de la Estrella es baja, de acuerdo con su solución formal arquitectónica. Para validar estos hallazgos, se utilizó el método mecánico, con conocimiento previo del comportamiento elástico de los edificios.

Evaluación mecánica: respuesta sísmica

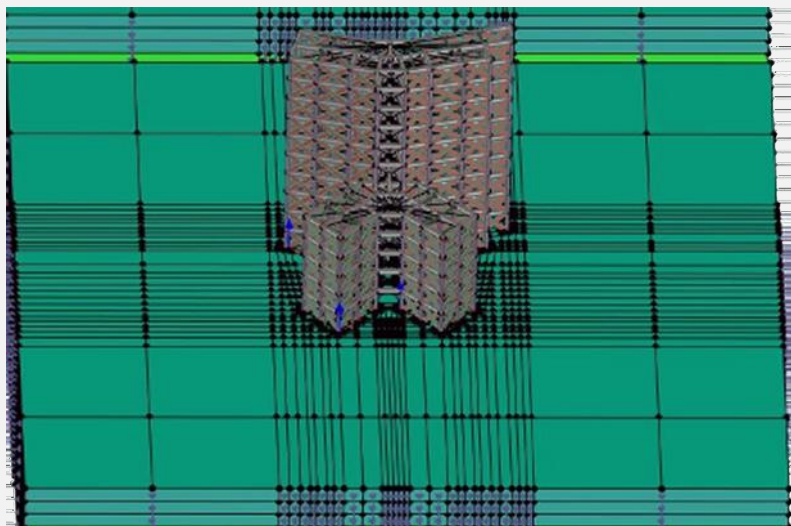
Siguiendo las normativas NCSE-02, Eurocódigo 8 y NTCDS, la respuesta sísmica se evaluó en función de dos parámetros de demanda (propiedades elásticas y espectros de capacidad), con los cuales se comparó la demanda sísmica con la capacidad de las edificaciones, considerando la interacción suelo-estructura. Para ello, se elaboraron modelos numéricos

con el programa OpenSees y la interfaz STKO.¹⁷ Los aspectos principales contemplados para el modelado de los edificios fueron los siguientes: el peso de los entrepisos, distribuido como masa concentrada en los nudos; los elementos estructurales, como columnas, trabes y muros diafragma (perimetrales de fachada); y el sistema de losa prefabricada con capa de compresión, que forma un diafragma rígido porque no se deforma en su propio plano. Los muros divisorios se excluyeron y los muros diafragma se modelaron como puntales equivalentes (macromodelación).

Para el análisis no lineal paso a paso, se recrearon las columnas y trabes teniendo en cuenta la plasticidad distribuida y los materiales uniaxiales (concreto y acero de refuerzo), mientras que los muros perimetrales de fachada de tabique de barro se modelaron como diagonales de compresión.¹⁸ En este tipo de estudios se tiende a representar los edificios empotrados en la base, de modo que se desprecian los efectos del suelo, como mayores deformaciones debidas a la disminución de rigidez. Por lo tanto, en el presente trabajo se decidió modelar el suelo (Fig. 9), empleando sus parámetros principales: densidad, velocidad de onda de cortante y de compresión, así como los módulos de cortante, elásticos, de volumen y de Poisson.

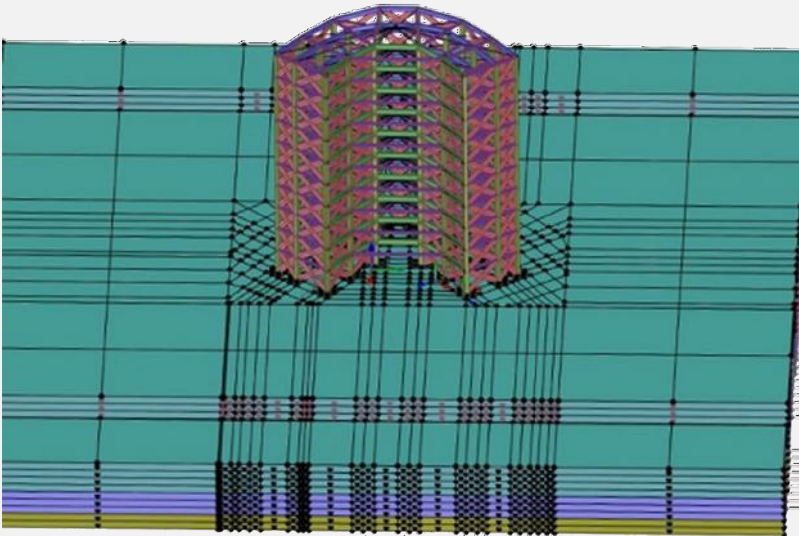
Figura 9

Modelos analíticos de los edificios de la barriada del Carmen (arriba) y de La Estrella (abajo) considerando la participación del suelo



¹⁷ El software Scientific ToolKit for OpenSees (STKO) es una interfaz gráfica de usuario que simplifica el modelado complejo en OpenSees (STKO-OpenSees software GUI, 2026).

¹⁸ El método de diagonal equivalente o de diagonal de compresión biarticulada en sus extremos cumple con las condiciones propuestas por Celarec et al. (2012).



Fuente: elaboración propia

Respuesta elástica Las características dinámicas elásticas de los edificios estudiados se verificaron mediante la obtención del periodo fundamental, del segundo y del tercer modo de vibración, así como de su dirección y de la respectiva masa modal efectiva normalizada, como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4
Propiedades elásticas de los edificios de la barriada del Carmen y La Estrella

Edificio de la barriada del Carmen			Edificio de La Estrella		
Periodo	M_n/M_T	Dirección	Periodo	M_n/M_T	Dirección
$T_1 = 1.98 \text{ s}$	$M_1/M_T = 0.32$	Transversal (lado corto)	$T_1 = 1.58 \text{ s}$	$M_1/M_T = 0.71$	Longitudinal (lado largo)
$T_2 = 1.85 \text{ s}$	$M_2/M_T = 0.19$	Longitudinal (lado largo)	$T_2 = 1.18 \text{ s}$	$M_2/M_T = 0.74$	Transversal (lado corto)
$T_3 = 1.41 \text{ s}$	$M_3/M_T = 0.13$	Torsión (planta)	$T_3 = 0.85 \text{ s}$	$M_3/M_T = 0.66$	Torsión (planta)

Nota: M_n es la masa del modo n y M_T es la masa total.

Fuente: elaboración propia

En ambos casos, se observa que el valor del periodo fundamental es elevado en función del número de niveles, lo cual significa que las edificaciones presentan un comportamiento flexible ante las fuerzas sísmicas. El edificio de La Estrella presenta mayor flexibilidad en el sentido longitudinal debido a su

geometría semicircular y el de la barriada del Carmen lo supera en el sentido transversal (lado corto) porque es el de menor dimensión.

Con base en los periodos de ambos edificios, se concluye que el de la barriada del Carmen es más flexible que el de La Estrella, si bien ambos tienen el mismo número de niveles y la superficie construida del primero es mayor. La diferencia radica en que la solución formal geométrica en la edificación de la barriada del Carmen es más irregular en planta y en elevación, pues la disminución a partir del sexto nivel aumenta la flexibilidad en la parte superior. Este comportamiento corrobora el índice de vulnerabilidad previamente establecido.

Análisis no lineal estático

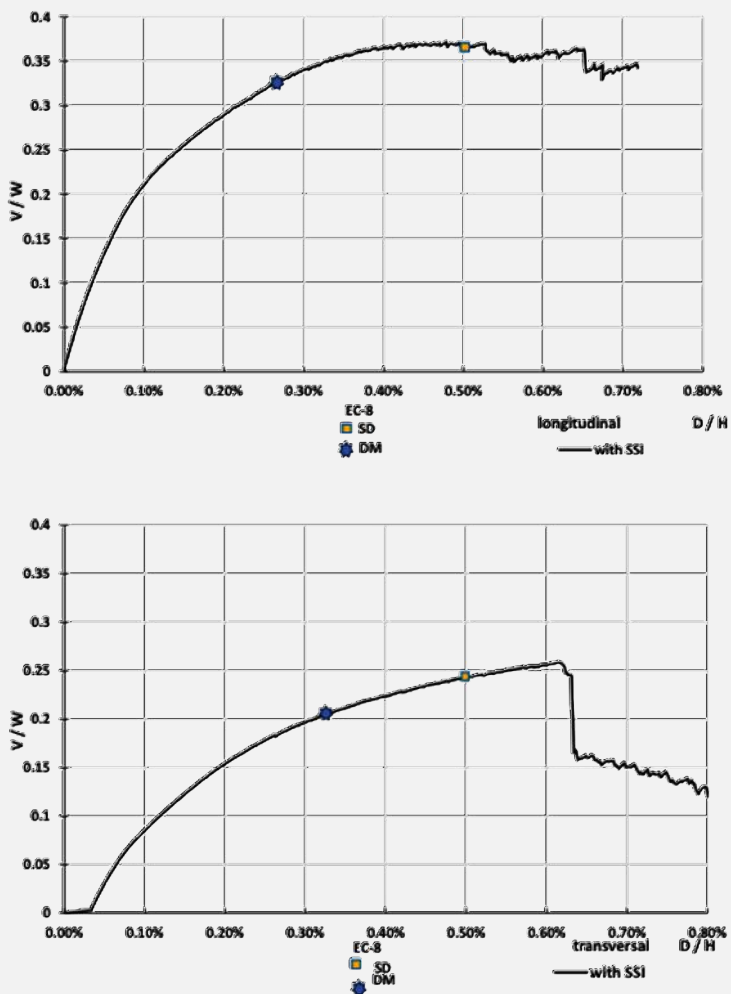
En el análisis no lineal paso a paso, se consideraron los diagramas de interacción entre columnas para generar el modelo de articulaciones plásticas. La degradación de la resistencia se basó en las sugerencias de la normativa ATC-40 (Applied Technology Council, 1996), que contempla el esfuerzo resistente del concreto, la carga axial y los refuerzos longitudinal y transversal (nivel de confinamiento). La relación esfuerzo-deformación utilizada en el comportamiento de las diagonales equivalentes que representan los muros se obtuvo según el método propuesto por Panangiotakos y Fardis (2001).

A partir del análisis anterior, se generaron los espectros de capacidad de los edificios en ambas direcciones. Para elaborar la gráfica correspondiente al edificio de la barriada del Carmen (Fig. 10), el cortante basal (V) se relacionó con el peso total de la edificación (W), y el desplazamiento máximo de la azotea (D) se relacionó con la altura total del edificio (H), a fin de obtener un valor de distorsión total. Asimismo, se estableció el límite de daño, denominado daño significativo (SD), según el Eurocódigo 8 (EC-8), bajo condiciones de diseño, considerando los muros de mampostería de fachada como elementos divisorios. La estrella azul corresponde al punto de desempeño o demanda del edificio (DM) para un periodo de retorno de 475 años (condición de diseño), determinado por la NCSE-02¹⁹ para el sistema de grado de libertad equivalente.

¹⁹ El método N2 se basa en obtener el punto de rendimiento a partir de la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro inelástico sísmico (Anexo B de la norma UNE-EN 1998-1:2011 / A1:2014 (Eurocódigo 8), en combinación con las aceleraciones y espectros definidos en su correspondiente Anejo Nacional Español).

Figura 10

Curva de capacidad del edificio de la barriada del Carmen en los sentidos longitudinal (arriba) y transversal (abajo)



Fuente: elaboración propia

Al comparar las gráficas, se observa que la capacidad resistente del edificio en el sentido longitudinal es mayor en un 30% que la del transversal. En ambas partes, la demanda (DM) presenta valores menores que la capacidad máxima obtenida y la solicitada por el EC-8; esto significa que, pese a la caída de capacidad sufrida en el sentido transversal, el edificio cuenta con la capacidad suficiente para satisfacer de forma adecuada la demanda que será impuesta por el sismo de diseño en ambas direcciones. Dicha caída se atribuye al mecanismo en el sexto nivel derivado de la reducción de los elementos portantes.

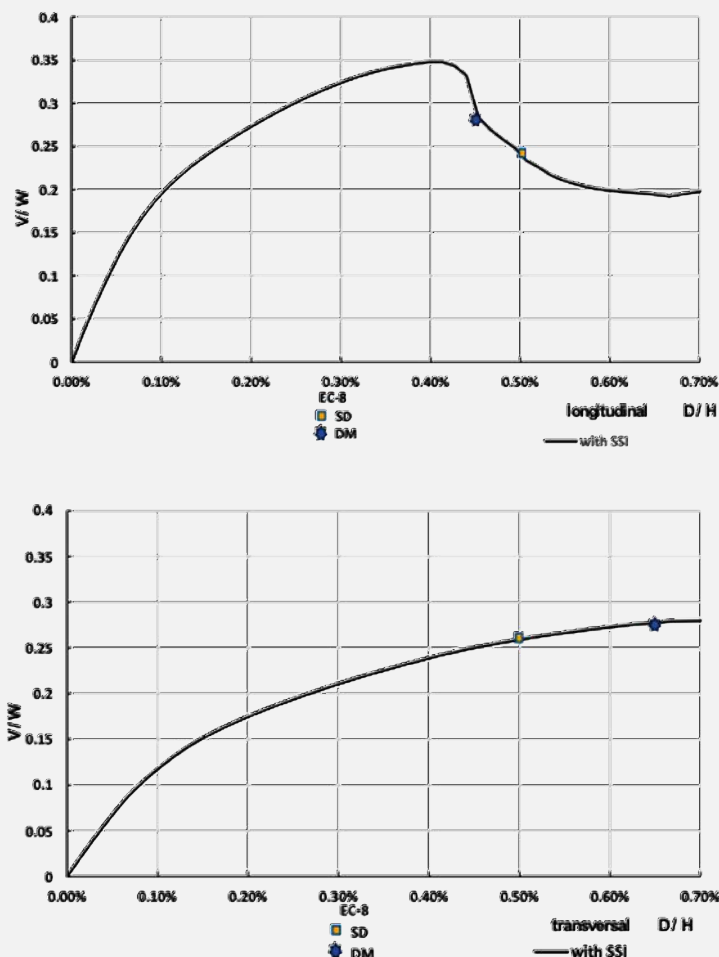
La diferencia en la distribución de capacidad entre el sentido longitudinal y el transversal se debe al mayor número de marcos en el lado largo de la edificación, mientras que en el lado corto hay menos crujeas y elementos portantes para so-

portar las fuerzas sísmicas. Además, en este último influye el ángulo importante de los marcos con respecto a la ortogonal (ejes esviados).

En la gráfica que representa la capacidad del edificio de La Estrella (Fig. 11) se advierte que, si bien tiene dimensiones menores en planta y, por ende, mayor esbeltez,²⁰ sus valores de capacidad máxima superan en sentido transversal y similan en sentido longitudinal los del edificio de la barriada del Carmen. A su vez, su capacidad es ligeramente inferior a la demanda que la NCSE-02 solicita transversalmente al sistema, por lo que resulta vulnerable en ese aspecto. En la parte longitudinal, el valor de la demanda se presenta de manera posterior y por debajo del punto de capacidad máxima, es decir que la configuración estructural-arquitectónica se considera adecuada.

Figura 11

Curva de capacidad del edificio La Estrella en los sentidos longitudinal (arriba) y transversal (abajo)



Fuente: elaboración propia

²⁰ Relación entre la dimensión del lado más corto en planta y la altura total del edificio.

En la Tabla 5 se presentan los valores del índice de vulnerabilidad según Benedetti y Petrini (1984), de la demanda y de la capacidad máxima sísmica de los edificios estudiados. Se aprecia nuevamente que el edificio con menor índice de vulnerabilidad empírica presenta una menor capacidad resistente frente a la demanda requerida, por lo que varía según el método analítico.

Tabla 5

Resumen del índice de vulnerabilidad, de demanda y de capacidad sísmica correspondientes a las edificaciones de la barriada del Carmen y La Estrella

	Edificio de la barriada del Carmen	Edificio de La Estrella
Índice de vulnerabilidad	114.25 (30%)	47.5 (12.03%)
Demanda sísmica máxima	0.32 V/W	0.26 V/W
Capacidad sísmica máxima	0.36 V/W	0.25 V/W

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El análisis sobre los edificios de la barriada del Carmen y de La Estrella, representativos del movimiento moderno en Sevilla, evidencia que la vulnerabilidad sísmica de estas construcciones patrimoniales no solo depende de criterios estructurales generales, sino también de decisiones arquitectónicas propias de su época. La revisión bajo tres marcos normativos (español, europeo y mexicano), junto con la aplicación del método de Benedetti y Petrini, permitió identificar que la irregularidad geométrica, la discontinuidad de los elementos portantes y la configuración volumétrica son factores críticos que amplifican el riesgo sísmico en este tipo de edificaciones y, por ende, su índice de vulnerabilidad.

El edificio de la barriada del Carmen, con una solución formal fuertemente irregular y asentado sobre un terreno de baja rigidez, presenta una alta vulnerabilidad sísmica, especialmente en el sentido transversal. Sin embargo, debido a la dimensión de sus elementos, al número de muros perimetrales que trabajan estructuralmente y a su disposición, resultó tener una mayor capacidad resistente con respecto a la demanda sísmica impuesta de acuerdo con el marco europeo. En contraste, el edificio de La Estrella, calificado como irregular, presenta un índice de vulnerabilidad menor gracias a su geometría semicircular y a una distribución más homogénea de la rigidez. Sin embargo,

carece de la capacidad resistente transversal requerida por la normativa, lo que demuestra una vulnerabilidad importante.

Ambos edificios exhiben periodos fundamentales elevados que indican una respuesta flexible ante solicitaciones sísmicas. Por otra parte, hay diferencias significativas en la capacidad resistente entre sus ejes principales, donde el tipo de suelo sobre el cual se desplantan también incrementa su nivel de vulnerabilidad y contribuye a dicha flexibilidad. Este efecto se observa principalmente en suelos blandos, como el que presenta más notoriamente el edificio en la barriada del Carmen.

Estos hallazgos confirman los resultados de estudios anteriores sobre la vulnerabilidad de edificios históricos construidos previo a la publicación del reglamento de construcción y las normas sísmicas españolas. Sus propiedades materiales y el nivel de refuerzo corresponden a estructuras con poca ductilidad y a una capacidad resistente al límite de la requerida por la norma actual.

También se observó que la vulnerabilidad de los edificios va más allá de la solución formal arquitectónica y la estructuración general. El análisis no lineal paso a paso mostró que uno de los edificios no presenta la capacidad resistente requerida en un sentido, lo que eleva su nivel de vulnerabilidad de forma significativa con respecto al índice obtenido empíricamente.

Los resultados subrayan la necesidad de incorporar criterios de regularidad estructural, análisis dinámicos y contexto geotécnico en la conservación y rehabilitación del patrimonio moderno en zonas sísmicas con suelos blandos. Ejemplo de ello es la Ciudad de México, donde muchos edificios del movimiento moderno mantienen soluciones geométricas formales poco regulares y se componen de marcos de concreto reforzado y muros diafragma de tabique de barro recocido.

De tal forma, la preservación de este tipo de edificios en cualquier zona sísmica debe ir acompañada de estrategias de refuerzo que respeten su valor arquitectónico sin comprometer su seguridad estructural. En este sentido, la vulnerabilidad sísmica representa un parámetro esencial en la gestión patrimonial responsable, puesto que el legado moderno convive con los riesgos naturales latentes. Finalmente, se sugiere emplear métodos híbridos para evaluar con mayor precisión el nivel de vulnerabilidad de las edificaciones.

Referencias

- Applied Technology Council. (1996). ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings.
- Asteris, P.G., Chronopoulos, M.P., Chrysostomou, C.Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N. y Silva, V. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Engineering Structures*, 62-63, 118-134. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.01.031>
- Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings. *L'industria delle Costruzioni*, (149), 66-74.
- Boschi, S., Borghini, A., Pintucchi, B. y Zani, N. (2018). Seismic vulnerability of historic masonry buildings: a case study in the center of Lucca. *Procedia Structural Integrity*, 11, 169-176. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2018.11.023>
- Celarec, D., Ricci, P. y Dolšek, M. (2012). The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry-infilled reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 35, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.007>
- Código Técnico de la Edificación. (2009). *Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural. Acciones en la edificación*. Código Técnico de la Edificación. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
- Cunalata, F. y Caiza, P. (2022). Estado del arte de estudios de vulnerabilidad sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55-64. <https://doi.org/10.33333/RP.VOL50N1.06>
- Di Domenico, M., De Risi, M.T., Manfredi, V., Terrenzi, M., Camata, G., Mollaioli, F., Noto, F., Ricci, P., Franchin, P., Masi, A., Spacone, E. y Verderame, G.M. (2023). Modelling and seismic response analysis of Italian pre-code and low-code reinforced concrete buildings. Part II: infilled frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(6), 1534-1564. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2086189>
- Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. EN-1198-1:2004, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings* (Eurocódigo 8). (2004). European Commission. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
- Falcão Moreira, R., Varum, H. y Castro, J.M. (2023). Influence of masonry infill walls on the seismic assessment of non-seismically designed RC framed structures. *Buildings*, 13(5), 1148. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13051148>
- Fazendeiro Sá, L., Morales-Esteban, A. y Durand Neyra, P. (2021). A deterministic seismic risk macrozonation of Seville. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2392. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08626-7>

- García Ruiz, J.M. (29 de enero del 2021). *Diálogo: los terremotos y la actividad sísmica en Granada*. Fundación Descubre. <https://fundaciondescubre.es/noticias/dialogo-los-terremotos-y-la-actividad-sismica-en-granada/>
- Gómez Villa, J.L., García-Casasola, M. y Del Espino Hidalgo, B. (Eds.). (2019). *re-HABITAR El Carmen: Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo*. Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico. Junta de Andalucía. https://repositorio.iaph.es/bitstream/11532/330631/1/Rehabitar_alan%C3%ADs_alda_almod%C3%B3var_patrimonio_contempor%C3%A1neo_2019.pdf
- Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (Coord.). (2012). *Cien años de arquitectura en Andalucía. El Registro Andaluz de Arquitectura Contemporánea, 1900-2000*. Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.
- Marchena Gómez, M.J. y Hernández Martínez, E. (2016). Sevilla en la primera década del siglo XXI: transformaciones urbanas hacia un nuevo modelo de ciudad. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (70), 393-417. <https://doi.org/10.21138/bage.2176>
- Marín de Terán, L. (1980). *Sevilla: centro urbano y barriadas*. Servicio de Publicaciones del Ayuntamiento de Sevilla.
- Messaoudi, A., Mohamed, H., Chebili, R., Abdesselam, I. y Rodrigues, H. (2025). Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete frames with various masonry infill patterns. *Structures*, 82, 110536. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110536>
- Ministerio de Fomento. (2009). *Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)*. Gobierno de España. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- Morales-Esteban, A., Martínez-Álvarez, F., Scitovski, S. y Scitovski, R. (2014). A fast partitioning algorithm using adaptive Mahalanobis clustering with application to seismic zoning. *Computers & Geosciences*, 73(2), 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.09.003>
- Moreno González, R. y Bairán García, J.M. (2012). Evaluación sísmica de los edificios de mampostería típicos de Barcelona aplicando la metodología Risk-UE. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(3), 161-169. <https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2012.03.007>
- Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo (NTCDS). (2023). https://www.smie.org.mx/uploads/2/2023-11/ntc_cdmx_2023.pdf
- Panagiotakos, T.B. y Fardis, M.N. (2001). Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. *ACI Structural Journal*, 98(2), 135-148.
- Pérez Escolano, V. (1998). Sevilla al final del siglo XX. La transformación de la ciudad. *Cuadernos Hispanoamericanos*, 573, 27-37. <https://>

idus.us.es/server/api/core/bitstreams/a58392fb-c8b4-4328-9687-b965e6644885/content

Presidencia del Gobierno de España. (1969). Decreto 106/1969, de 16 de enero, por el que se aprueba la aplicación de la «Norma sismorresistente PGS-1 (1968), parte A». *Boletín Oficial del Estado*, (30), 1658-1675. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1969-148

Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones. (2005). Colegio de Arquitectos de Sevilla/Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura.

Puncello, I. y Caprili, S. (2023). Seismic assessment of historical masonry buildings at different scale levels: a review. *Applied Sciences*, 13(3), 1941. <https://doi.org/10.3390/app13031941>

Ramos Carranza, A., Sánchez-Cid Endériz, J.I. y Capilla Roncero, I. (2003). *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla. Inicios y continuidades*.

re-HABITAR. (s.f.). *El Carmen*. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. <https://www.iaph.es/rehabitar/el-carmen/>

Sánchez-Cid Endériz, J.I., Capilla Roncero, I. y Ramos Carranza, A. (2003). *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla*. Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla/Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura, Sevilla/Ayuntamiento de Sevilla. <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/0db65496-dd17-4eae-a643-a85cb57892d1/content>

Santa Ana Lozada, P.R. (2025). *Análisis formal de la arquitectura del S. XX y su interrelación con el diseño sísmico; casos de estudio Ciudad de México y la Ciudad de Sevilla* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México/Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/items/d0685c87-eb52-44d3-8f09-f3fad5f614da>

Sarmiento Ocampo, J. (2023). Los multifamiliares en Ciudad de México: laboratorios urbanos y arquitectónicos. *Academia XXII*, 14(28), 195-222. <https://doi.org/10.22201/FA.2007252XP.2023.14.28.87244>

STKO-OpenSees software GUI. (2026). <https://www.stko.net/>

Vázquez Consuegra, G. y Consejería de Obras Públicas y Transportes (1992). *Guía de arquitectura de Sevilla*. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/guia_sevilla.pdf

Zapico Blanco, B. (Coord.). (2020). *Rehabilitación sísmica estructural de colegios de educación primaria. Proyecto PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva)*. Universidad de Sevilla. <https://doi.org/10.12795/9788447230358>

DIGITAL  CIENCIA@UAQRO



SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y POSGRADO