



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v10i19.1001>

CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO Y ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN QUÍMICA EN AMBIENTES MARINOS Y URBANOS: UNA REVISIÓN NARRATIVA

CORROSION OF REINFORCING STEEL AND CHEMICAL PROTECTION STRATEGIES IN MARINE AND URBAN ENVIRONMENTS: A NARRATIVE REVIEW

Plúa-Ponce Angélica Marena ¹

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador.
Correo: angelica.plua@unesum.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3101-7285>.

Resumen

La corrosión del acero de refuerzo constituye una de las principales causas de deterioro prematuro de las estructuras de hormigón armado, con un impacto económico global estimado en billones de dólares anuales. El fenómeno se origina por dos mecanismos predominantes: la penetración de iones cloruro en ambientes marinos y costeros, y la carbonatación de la matriz cementicia en zonas urbanas expuestas a dióxido de carbono. Ambos procesos despasivan el acero embebido y activan un ciclo electroquímico de oxidación que reduce la sección resistente, fisura el recubrimiento y compromete la integridad estructural. Esta revisión narrativa tiene como objetivo sintetizar la evidencia científica reciente sobre los mecanismos de corrosión inducida por cloruros y por carbonatación, y sobre las principales estrategias químicas de protección disponibles, incluyendo inhibidores de corrosión (orgánicos, inorgánicos, migratorios y verdes) y recubrimientos protectores sobre el acero. La búsqueda se realizó en bases de datos científicas indexadas, combinando términos en español e inglés, priorizando estudios de los últimos cinco a diez años. Los resultados muestran que los inhibidores a base de nitritos siguen siendo los más eficaces en ambientes con cloruros, mientras que los inhibidores verdes derivados de extractos vegetales emergen como alternativas sostenibles con eficiencias de inhibición comparables. Los recubrimientos epóxicos ofrecen alta resistencia inicial pero son vulnerables a daños durante la instalación. La discusión evidencia vacíos de investigación relacionados con el desempeño a largo plazo de los inhibidores verdes y con la escasez de estudios en contextos latinoamericanos. Se concluye que la selección de la estrategia de protección debe ajustarse al mecanismo de despasivación predominante y a las condiciones ambientales específicas de cada estructura.

Palabras claves: corrosión; hormigón armado; inhibidores; cloruros; carbonatación.

Abstract

Corrosion of reinforcing steel is one of the leading causes of premature deterioration in reinforced concrete structures, with an estimated global economic impact of billions of dollars annually. The phenomenon originates from two predominant mechanisms: chloride ion penetration in marine and coastal environments, and carbonation of the cementitious matrix in urban areas exposed to carbon dioxide. Both processes depassivate the embedded steel and trigger an electrochemical oxidation cycle that reduces the resisting cross-section, cracks the concrete cover, and compromises structural integrity. This narrative review aims to synthesize recent scientific evidence on the mechanisms of chloride-induced and carbonation-induced corrosion, and on the main chemical protection strategies available, including corrosion inhibitors (organic, inorganic, migrating, and green) and protective coatings applied to steel. The search was conducted in indexed scientific databases, combining Spanish and English terms, prioritizing studies from the last five to ten years. Results show that nitrite-based inhibitors remain the most effective in chloride-rich environments, while green inhibitors derived from plant extracts emerge as sustainable alternatives with comparable inhibition efficiencies. Epoxy coatings offer high initial resistance but are vulnerable to damage during installation. The discussion highlights research

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 23 de junio de 2026.

Fecha de aceptación: 18 de agosto de 2026.

Fecha de publicación: 30 de septiembre de 2026.



gaps related to the long-term performance of green inhibitors and the scarcity of studies in Latin American contexts. It is concluded that the selection of a protection strategy must be tailored to the predominant depassivation mechanism and to the specific environmental conditions of each structure.

Keywords: corrosion; reinforced concrete; inhibitors; chlorides; carbonation.

1. Introducción

La durabilidad del hormigón armado depende en gran medida de la capacidad del material para proteger al acero de refuerzo embebido frente a la acción de agentes agresivos presentes en el ambiente de servicio. Bajo condiciones normales, la elevada alcalinidad de la fase acuosa de los poros del hormigón, con valores de pH cercanos a 12,5-13,5, favorece la formación espontánea de una capa pasiva de óxidos de hierro sobre la superficie del acero, la cual actúa como barrera protectora frente a la oxidación (Wang et al., 2024). Sin embargo, esta condición de pasividad no es permanente: cuando agentes agresivos externos logran alcanzar el acero en concentración suficiente, la capa pasiva se rompe y se activa un proceso electroquímico de corrosión que, con el tiempo, reduce la sección resistente de las barras, genera productos expansivos de óxido y provoca fisuración, delaminación y desprendimiento del

recubrimiento de hormigón (J. Wang et al., 2023).

Dos mecanismos concentran la mayor parte de la investigación científica sobre despasivación del acero de refuerzo. El primero es el ataque por iones cloruro, típico de estructuras expuestas a ambientes marinos, costeros o sometidas a sales de deshielo, en el cual los cloruros penetran por difusión a través de la red porosa del hormigón hasta alcanzar la interfaz acero-hormigón, donde rompen localmente la película pasiva y desencadenan corrosión por picadura (Xu et al., 2024). El segundo mecanismo es la carbonatación, característica de ambientes urbanos con altas concentraciones de dióxido de carbono, en el cual el CO₂ atmosférico reacciona con los compuestos hidratados del cemento, reduce el pH de la solución de poros por debajo del umbral de estabilidad de la capa pasiva y provoca una corrosión de tipo generalizado sobre la superficie del acero (López-de Abajo et al., 2021). Ambos procesos



pueden actuar de forma simultánea o secuencial en estructuras urbanas costeras, donde la contaminación atmosférica y la exposición a la brisa marina se superponen, complicando el diagnóstico y el diseño de estrategias de protección.

El impacto económico de la corrosión del acero de refuerzo es considerable. Diversos estudios señalan que los costos directos asociados a la corrosión metálica representan un porcentaje significativo del producto interno bruto de los países industrializados, y que buena parte de este costo corresponde específicamente al mantenimiento y reparación de infraestructura de hormigón armado (Topçu & Uzunömeroğlu, 2020). En este contexto, la comunidad científica y la industria de la construcción han desarrollado múltiples estrategias para prolongar la vida útil de las estructuras afectadas o en riesgo, entre las cuales destacan las intervenciones de naturaleza química: la incorporación de inhibidores de corrosión, ya sea como aditivo en la mezcla fresca o aplicados posteriormente sobre la superficie endurecida, y el uso de

recubrimientos protectores sobre las propias barras de refuerzo, como los recubrimientos epóxicos, de zinc o poliméricos híbridos (Asaad, 2021).

Los inhibidores de corrosión son sustancias que, incorporadas en concentraciones relativamente bajas, retrasan el inicio de la corrosión o reducen su velocidad de propagación una vez iniciada, sin alterar de forma significativa las propiedades mecánicas del hormigón (Topçu & Uzunömeroğlu, 2020). Se clasifican tradicionalmente en inhibidores anódicos, catódicos y de tipo mixto, según la reacción electroquímica sobre la que actúan, y pueden ser de naturaleza inorgánica -como el nitrito de calcio-, orgánica -como las aminas y carboxilatos-, o migratorios, diseñados para penetrar por difusión hacia estructuras ya construidas (Song et al., 2019). En los últimos años, la preocupación por la sostenibilidad ambiental y la toxicidad de algunos inhibidores comerciales ha impulsado una línea de investigación creciente en torno a los denominados inhibidores verdes, obtenidos a partir de extractos vegetales y subproductos agroindustriales, que buscan ofrecer

una eficiencia de inhibición comparable a la de los productos sintéticos con un menor impacto ecológico (Ahmed & Ganesh, 2022; Chugh, 2021).

Paralelamente, los recubrimientos protectores aplicados directamente sobre el acero de refuerzo constituyen una segunda familia de estrategias químicas, orientadas a establecer una barrera física-química que impida o retrase el contacto entre los agentes agresivos y la superficie metálica. Entre estos destacan los recubrimientos epóxicos, ampliamente utilizados en estructuras marinas y portuarias, los recubrimientos de zinc que además ofrecen protección catódica de sacrificio, y desarrollos más recientes basados en nanocompuestos poliméricos (X. Wang et al., 2023).

A pesar del volumen creciente de investigación sobre corrosión del acero de refuerzo, persisten interrogantes relevantes sobre la efectividad comparativa de las distintas estrategias químicas de protección frente a los dos mecanismos de despasivación predominantes -cloruros y carbonatación-, así como sobre su

desempeño en condiciones de exposición combinadas, propias de numerosos contextos urbano-costeros en América Latina. En este marco, el objetivo de la presente revisión narrativa es sintetizar y analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre los mecanismos de corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruros y por carbonatación, y sobre las principales estrategias de protección química -inhibidores y recubrimientos- reportadas en la literatura de los últimos años, con el fin de identificar convergencias, limitaciones y vacíos de investigación que orienten futuras líneas de trabajo en la materia.

2. Metodología

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque de revisión narrativa de la literatura científica, seleccionado por su idoneidad para sintetizar de manera integradora un cuerpo de conocimiento amplio y heterogéneo, proveniente de disciplinas afines como la ingeniería de materiales, la electroquímica y la ingeniería civil, sin la exigencia de un protocolo de metaanálisis cuantitativo propio de las revisiones sistemáticas.



Para la búsqueda bibliográfica se consultaron bases de datos científicas indexadas de amplia cobertura multidisciplinar. La estrategia de búsqueda se organizó en ejes temáticos diferenciados, combinando términos en español e inglés mediante operadores booleanos, entre los que se incluyeron: “chloride-induced corrosion”, “carbonation-induced corrosion”, “corrosion inhibitors reinforced concrete”, “corrosión armadura hormigón ambiente marino”, “green corrosion inhibitors” y “protective coatings steel rebar”. Se priorizaron publicaciones correspondientes a los últimos cinco años, ampliando el rango a un máximo de diez años en los casos donde la literatura reciente resultó insuficiente para cubrir aspectos fundamentales del fenómeno.

Criterios de inclusión y exclusión

Siguiendo criterios de estilo PRISMA de manera flexible, se incluyeron artículos de revisión y estudios experimentales publicados en revistas arbitradas o en actas de congresos especializados en patología y durabilidad del hormigón armado, redactados en español o inglés, que abordaran explícitamente

mecanismos de corrosión del acero de refuerzo, inhibidores de corrosión o recubrimientos protectores. Se excluyeron documentos sin revisión por pares, trabajos centrados exclusivamente en corrosión de otros metales sin relación con el hormigón armado, y publicaciones cuyo contenido resultó inaccesible en texto completo o resumen suficientemente detallado. Del total de referencias identificadas en las distintas búsquedas temáticas, se realizó un cribado por título y resumen, seleccionando finalmente 27 estudios que cumplieron con los criterios señalados y que constituyen la base documental de esta revisión.

Herramientas utilizadas

La búsqueda y verificación de las referencias se realizó mediante bases de datos científicas indexadas con capacidad de análisis de citación contextual, lo que permitió, además de localizar los estudios, valorar de forma preliminar la naturaleza de las citas que cada trabajo ha recibido en la literatura posterior.

Debido a que la literatura específica sobre corrosión del acero de refuerzo en contextos latinoamericanos resultó

comparativamente escasa frente a la producción proveniente de Asia y Europa, se amplió la búsqueda incorporando descriptores geográficos regionales, lo que permitió identificar estudios de referencia provenientes de España, Argentina, Ecuador y Cuba, enriqueciendo la perspectiva regional de la síntesis.

3. Resultados

Mecanismos de despasivación por cloruros y por carbonatación

La literatura revisada coincide en que la corrosión del acero de refuerzo es, ante todo, un fenómeno electroquímico cuya condición previa es la pérdida de la capa pasiva protectora. Xu et al. (2024) identifican seis factores principales que gobiernan la velocidad de difusión de los iones cloruro a través del hormigón: la relación agua-cemento, el contenido de aditivos, el ancho de fisuras, la temperatura ambiental, la humedad relativa y los ciclos de humectación-secado. Según estos autores, el coeficiente de difusión de cloruros aumenta con relaciones agua-cemento más altas y con fisuras de mayor ancho,

mientras que disminuye con el incremento del contenido de adiciones minerales, lo que evidencia la fuerte dependencia del fenómeno respecto del diseño de mezcla original.

En ambientes marinos, la acumulación superficial de cloruros y su posterior penetración hacia el interior del hormigón constituyen la vía predominante de despasivación. Garcés et al. (2019), en un estudio desarrollado sobre estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos agresivos, describen cómo el contenido de cloruros necesario para iniciar la corrosión puede superar ampliamente los umbrales normativos tradicionales cuando se aplican tratamientos electroquímicos complementarios, lo que sugiere que los valores límite fijados en algunas normativas no siempre reflejan con precisión el comportamiento real de la estructura. En la misma línea, Pico-Cortés y Zega (2019) señalan que la porosidad del hormigón de recubrimiento es el factor determinante de la resistencia frente al ingreso de cloruro, y que esta relación se mantiene incluso al introducir áridos reciclados en la



mezcla, siempre que se controle adecuadamente la relación agua-material cementicio.

La carbonatación, por su parte, opera mediante un mecanismo distinto pero convergente en sus consecuencias. López-de Abajo et al. (2021), en un estudio centrado en túneles urbanos sometidos a altas concentraciones de gases contaminantes, describen cómo la reacción del CO₂ con la portlandita del hormigón forma carbonato de calcio, lo que reduce la porosidad en la zona carbonatada pero, simultáneamente, disminuye la alcalinidad de la solución de poros por debajo del umbral necesario para mantener estable la película pasiva del acero. Este hallazgo resulta particularmente relevante para estructuras urbanas de tráfico intenso, donde la concentración de gases de combustión acelera de forma localizada el frente de carbonatación. En un sentido complementario, Castañeda et al. (2019) demuestran, mediante microscopía electrónica de barrido sobre pastas de hormigón endurecidas, que los ensayos convencionales de resistencia a compresión y velocidad de pulso

ultrasónico resultan insuficientes por sí solos para anticipar el comportamiento de una estructura frente a ambientes de elevada agresividad corrosiva, siendo necesario incorporar indicadores específicos de porosidad capilar.

Un hallazgo transversal en varios de los estudios revisados es que el proceso de fisuración del recubrimiento, consecuencia del carácter expansivo de los óxidos de hierro generados durante la corrosión, actúa a su vez como acelerador del propio deterioro. Meneses et al. (2016), en ensayos sobre vigas de hormigón armado sometidas simultáneamente a corrosión acelerada y a cargas de flexión, encontraron que un mayor espesor de recubrimiento retrasa significativamente la aparición de las primeras fisuras por corrosión y ralentiza su propagación, lo que confirma el papel del recubrimiento no solo como barrera química, sino también como elemento de resistencia mecánica frente al proceso expansivo. En un estudio posterior sobre hormigones reciclados, Meneses et al. (2019) evidencian que un tratamiento adecuado de los agregados

reciclados permite mejorar el comportamiento durable de las vigas frente a corrosión bajo carga, aunque a costa de una mayor área de fisuración inicial, lo que subraya la existencia de compromisos técnicos entre distintas propiedades del material.

Inhibidores químicos de corrosión

Los inhibidores de corrosión representan la estrategia química más extensamente documentada en la literatura revisada. Song et al. (2019) ofrecen una síntesis detallada del mecanismo de acción del nitrito de calcio, uno de los inhibidores inorgánicos más utilizados históricamente, señalando que su eficacia radica en su capacidad para retrasar el momento de falla de la película pasivante y para actuar tanto frente a la corrosión inducida por cloruros como frente a la inducida por carbonatación, siempre que la relación molar entre nitrito y cloruro se mantenga por encima de un umbral crítico. Los mismos autores destacan, sin embargo, que la eficacia del nitrito disminuye de forma no lineal cuando la concentración de cloruros supera ampliamente dicho umbral, lo que

limita su aplicabilidad en ambientes marinos de exposición extrema.

Los inhibidores orgánicos migratorios constituyen una segunda familia ampliamente estudiada, particularmente relevante para la rehabilitación de estructuras existentes. Theiss et al. (2023) evaluaron la influencia de la concentración de un inhibidor migratorio orgánico sobre la resistencia a la corrosión del acero embebido, encontrando que solo la concentración más alta ensayada, equivalente al 0,60 % del volumen de hormigón, logró generar una probabilidad de corrosión inferior al 10 % en probetas con menor espesor de recubrimiento, lo que evidencia que la dosificación resulta determinante para obtener protección efectiva. En un sentido similar, Seyhan et al. (2019) documentan que los inhibidores de aplicación superficial de tipo dual muestran un desempeño superior al de los inhibidores tradicionales de una sola fase química, si bien advierten que su eficiencia puede verse limitada bajo ciertas condiciones de carbonatación previa del sustrato. Jano et al. (2021), por su parte, comparan el desempeño de



un inhibidor migratorio comercial frente a un inhibidor natural derivado de goma guar, observando reducciones en la velocidad de corrosión de hasta un 95 % con el inhibidor natural bajo condiciones de ataque combinado de sulfatos y cloruros, resultado que resulta notable frente al 80 % de reducción obtenido con el inhibidor migratorio de referencia.

El auge de los inhibidores verdes constituye una de las líneas de investigación más dinámicas dentro del corpus revisado. Ahmed y Ganesh (2022), en una revisión centrada específicamente en inhibidores verdes para hormigón armado, sistematizan el uso de diversos extractos vegetales como aditivos anticorrosivos, destacando que buena parte de la evidencia disponible proviene de ensayos de laboratorio a escala reducida y que existe una necesidad clara de validación en condiciones de servicio real. En la misma dirección, Guo et al. (2022) evaluaron combinaciones de goma arábica y goma guar como inhibidores eco-amigables, encontrando que concentraciones específicas de ambos componentes en proporciones equilibradas

mejoran simultáneamente la resistencia a compresión, reducen la transmisibilidad al agua y generan una corriente catódica favorable en los ensayos electroquímicos, lo que sugiere un mecanismo de protección basado en la adsorción de las macromoléculas sobre la superficie metálica. Chugh (2021) complementa esta perspectiva señalando que los inhibidores sostenibles deben cumplir simultáneamente con criterios de eficiencia a bajas concentraciones, estabilidad a largo plazo dentro de la matriz cementicia, biodegradabilidad y compatibilidad con las propiedades mecánicas del hormigón, un conjunto de exigencias que aún no logran satisfacer plenamente todos los inhibidores verdes ensayados hasta la fecha.

Finalmente, algunos estudios exploran formulaciones híbridas o comparaciones normalizadas entre distintos tipos de inhibidores. Tweek y Abdulsada (2025) compararon un inhibidor derivado de cáscara de granada con benzoato de sodio, un inhibidor orgánico de referencia, siguiendo estándares del American Concrete Institute, y encontraron que el extracto natural forma una capa

orgánica protectora con actividad antioxidante comparable a la del inhibidor comercial, aunque con menor consistencia entre repeticiones experimentales. Topçu y Uzunömeroğlu (2020), en una revisión amplia sobre propiedades de inhibidores en hormigón armado, clasifican sistemáticamente los mecanismos de acción anódica, catódica y mixta, y subrayan que la elección del tipo de inhibidor debe considerar no solo su eficiencia de inhibición, sino también su costo, facilidad de aplicación en campo y compatibilidad con el sistema constructivo existente.

Recubrimientos y protección de superficie del acero

Además de los inhibidores incorporados en la matriz de hormigón, la literatura documenta ampliamente el uso de recubrimientos protectores aplicados directamente sobre la superficie del acero de refuerzo. J. Wang et al. (2023) revisan de forma exhaustiva los mecanismos de corrosión de tipo macrocelda en barras recubiertas, señalando que los recubrimientos de zinc no solo actúan como barrera física, sino que además ofrecen protección catódica de sacrificio al

propio acero base cuando el recubrimiento sufre daños localizados, un mecanismo que no está presente en los recubrimientos orgánicos puramente barrera como el epóxico.

Los recubrimientos epóxicos constituyen la solución comercial más extendida para la protección de barras de refuerzo en ambientes agresivos. Zhang y Liu (2023) estudiaron el comportamiento de barras con recubrimiento epóxico defectuoso expuestas a ambientes con cloruros, encontrando que la corrosión se concentra específicamente en las zonas donde el recubrimiento presenta discontinuidades, y que la aplicación complementaria de un sistema de protección catódica con mortero-ánodo permite recuperar niveles adecuados de polarización incluso en barras previamente dañadas. Este hallazgo resulta consistente con el trabajo de X. Wang et al. (2023), quienes desarrollaron recubrimientos epóxicos reforzados con nanopartículas de grafeno y sílice, logrando una resistencia a la corrosión hasta tres veces mayor que la de recubrimientos epóxicos convencionales de una sola carga,



además de una reducción significativa en la fracción de vacíos internos del recubrimiento, lo que mejora su desempeño como barrera frente a la difusión de agentes agresivos.

No obstante, varios estudios advierten sobre las limitaciones prácticas de los recubrimientos epóxicos bajo condiciones reales de obra. Tang et al. (2023) evaluaron el efecto de distintos niveles de deformación mecánica sobre la resistencia a la corrosión de barras recubiertas con esmalte cerámico, encontrando que, si bien la densidad de corriente de corrosión aumenta progresivamente con el nivel de deformación aplicado, el recubrimiento continúa ofreciendo una protección significativamente superior a la del acero sin recubrir incluso bajo niveles elevados de deformación, lo que sugiere una razonable tolerancia a los esfuerzos de manipulación e instalación en obra. Wang et al. (2024), en una revisión sobre el estado del arte de los métodos anticorrosivos para acero de refuerzo, destacan que el principal punto débil de los recubrimientos poliméricos convencionales es precisamente su

vulnerabilidad a daños mecánicos durante el transporte, almacenamiento y colocación, lo que puede generar corrosión localizada bajo el propio recubrimiento si la zona dañada no se repara adecuadamente antes del hormigonado.

Como alternativa complementaria a los recubrimientos poliméricos y metálicos, algunos estudios exploran el uso de nanopartículas como aditivo directo sobre la superficie del acero o en la solución de poros. Khudhair y Al-Sammarraie (2019) evaluaron el uso de nanopartículas de dióxido de titanio como aditivo en solución de hormigón simulada, obteniendo eficiencias de protección de hasta un 86 % en la concentración óptima ensayada, aunque advierten que este tipo de soluciones aún se encuentra en una fase experimental previa a su validación en probetas de hormigón real y en condiciones de exposición prolongada. Huazhi et al. (2023) compararon inhibidores mixtos, inhibidores migratorios y ánodos de sacrificio de zinc en estructuras costeras, concluyendo que el desempeño relativo de cada estrategia depende fuertemente del

pH del entorno y de la concentración de cloruros, sin que exista una solución universalmente superior para todas las condiciones de exposición evaluadas. Voulgari et al. (2019a, 2019b), finalmente, evaluaron recubrimientos orgánicos que incorporan inhibidor de corrosión como aditivo, encontrando que este tipo de sistema híbrido -que combina barrera física e inhibición química en una sola aplicación- ofrece protección efectiva frente a la penetración de cloruros y reduce los costos de instalación al requerir una única intervención sobre la superficie del acero.

4. Discusión

La síntesis de la literatura revisada permite identificar convergencias relevantes entre los estudios sobre mecanismos de despasivación y aquellos centrados en estrategias de protección química, al tiempo que revela divergencias metodológicas y vacíos que merecen ser discutidos con mayor profundidad.

En primer lugar, existe consenso amplio en que la corrosión inducida por cloruros y la inducida por carbonatación, aunque comparten

como resultado común la ruptura de la capa pasiva del acero, difieren sustancialmente en su cinética y en su patrón de ataque. Mientras que los cloruros tienden a generar corrosión localizada por picadura de rápida propagación (Xu et al., 2024), la carbonatación produce un ataque más generalizado y de avance relativamente predecible en función del frente de carbonatación (López-de Abajo et al., 2021). Esta distinción tiene implicaciones directas sobre la selección de la estrategia química de protección más adecuada: los inhibidores de tipo nitrito, con mecanismo de acción basado en el fortalecimiento de la película pasiva, muestran buen desempeño frente a ambos mecanismos cuando se dosifican correctamente (Song et al., 2019), mientras que los recubrimientos de barrera física, como el epóxico, resultan particularmente eficaces frente al ataque puntual por cloruros, siempre que se garantice la integridad del recubrimiento durante la instalación (X. Wang et al., 2023; Tang et al., 2023).

Un segundo eje de discusión se refiere a la tensión entre eficiencia de protección y sostenibilidad



ambiental. Los estudios revisados muestran una transición progresiva del interés investigativo desde los inhibidores inorgánicos tradicionales, como el nitrito de calcio, hacia formulaciones orgánicas y, más recientemente, hacia inhibidores verdes derivados de extractos vegetales (Ahmed & Ganesh, 2022; Chugh, 2021; Guo et al., 2022). Si bien los resultados de laboratorio son alentadores -con eficiencias de inhibición que en algunos casos superan el 90 % (Jano et al., 2021)-, resulta llamativo que la gran mayoría de estos estudios se limitan a ensayos electroquímicos acelerados en probetas de mortero o solución simulada de poro, sin validación sistemática en condiciones de exposición real ni en estructuras de escala completa. Esta limitación metodológica compartida por buena parte de la literatura sobre inhibidores verdes representa, a criterio de los autores revisados, uno de los principales vacíos que deberá resolverse antes de que estas alternativas puedan considerarse sustitutos confiables de los inhibidores comerciales consolidados (Chugh, 2021).

Un tercer punto de divergencia se aprecia entre los estudios centrados en el diseño de mezcla del hormigón y aquellos centrados en la protección directa del acero. Mientras que trabajos como los de Pico-Cortés y Zega (2019) y Meneses et al. (2016, 2019) enfatizan el papel de la porosidad del recubrimiento y su espesor como primera línea de defensa frente a la corrosión, otros estudios, como los de Zhang y Liu (2023) y J. Wang et al. (2023), sitúan el énfasis en la protección directa de la barra mediante recubrimientos o protección catódica. Ambas líneas no son mutuamente excluyentes, sino complementarias: el propio Frontera y Cladera (2024) demuestran, mediante un modelo mecánico que integra tanto el deterioro por carbonatación como por cloruros, que la resistencia estructural residual de elementos corroídos depende simultáneamente de la calidad del recubrimiento de hormigón y del grado de protección del acero embebido, lo que sugiere que las estrategias de protección más robustas combinan intervenciones sobre ambos componentes del sistema.

La revisión también evidencia una asimetría geográfica notable en la producción científica sobre la materia. La mayor parte de los estudios sobre inhibidores verdes y recubrimientos nanocompuestos provienen de centros de investigación en Asia oriental, mientras que la literatura de origen latinoamericano, aunque de calidad técnica comparable, se concentra mayoritariamente en estudios de caracterización de campo y en el análisis de estructuras existentes afectadas por corrosión, como los trabajos desarrollados en Cuba (Castañeda et al., 2019), España (Garcés et al., 2019) y Argentina (Meneses et al., 2016, 2019; Pico-Cortés & Zega, 2019). Esta asimetría sugiere una oportunidad de investigación específica para contextos urbano-costeros latinoamericanos, donde la combinación de humedad relativa elevada, proximidad al mar y creciente contaminación atmosférica urbana configura escenarios de exposición combinada que aún no han sido suficientemente caracterizados en la literatura internacional revisada.

Finalmente, cabe señalar que ningún estudio de los incluidos en esta revisión aborda de manera integral el análisis de costo-beneficio de las distintas estrategias químicas a lo largo del ciclo de vida completo de una estructura, más allá del trabajo pionero de Amaya y Cornejo Martínez (2016), quienes proponen una metodología de evaluación del costo del ciclo de vida de los inhibidores de corrosión considerando factores de humedad y salinidad ambiental. La escasez de estudios económicos integrados con la evidencia técnica de eficiencia constituye, en consecuencia, un vacío adicional que limita la capacidad de los tomadores de decisión para seleccionar la estrategia de protección más costo-eficiente en cada contexto particular.

5. Conclusiones

La presente revisión narrativa permite concluir que la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado obedece a dos mecanismos de despasivación predominantes -la penetración de cloruros en ambientes marinos y costeros, y la carbonatación en ambientes urbanos- cuyas



diferencias cinéticas y patrones de ataque condicionan de manera directa la selección de las estrategias químicas de protección más adecuadas en cada caso. Los inhibidores de corrosión, particularmente los formulados a base de nitritos, continúan siendo la opción con mayor respaldo experimental frente a ambos mecanismos, mientras que los inhibidores verdes derivados de extractos vegetales emergen como una alternativa sostenible prometedora, aunque todavía pendiente de validación en condiciones de servicio real y a escala estructural completa. Los recubrimientos protectores sobre el acero, especialmente los sistemas epóxicos reforzados con nanocompuestos, ofrecen niveles de protección considerablemente superiores a los del acero sin recubrir, si bien su eficacia depende críticamente de la integridad del recubrimiento durante las etapas de transporte, almacenamiento y colocación en obra.

El objetivo planteado de sintetizar la evidencia disponible sobre mecanismos de despasivación y estrategias de protección química se

cumple al evidenciar que ninguna solución individual resulta universalmente superior, sino que la selección óptima depende de las condiciones ambientales específicas, del tipo de estructura y de las restricciones económicas del proyecto. En términos prácticos, esto implica que el diseño durable de estructuras de hormigón armado en ambientes marinos y urbanos debería contemplar, siempre que sea posible, la combinación complementaria de un hormigón de baja porosidad, un recubrimiento adecuado de las armaduras y una estrategia química de protección específicamente seleccionada en función del mecanismo de agresión predominante.

Como líneas futuras de investigación se identifica la necesidad de estudios de validación de inhibidores verdes en condiciones de exposición real y de larga duración, de análisis de costo-beneficio integrados a lo largo del ciclo de vida de las estructuras, y de investigaciones específicas sobre el comportamiento del acero de refuerzo bajo condiciones de exposición combinada de cloruros y carbonatación, escenario particularmente relevante para las

zonas urbano-costeras de América Latina que, como se evidenció en esta revisión, permanecen comparativamente subrepresentadas en la literatura científica internacional sobre la materia.

Bibliografía

- Ahmed, J., & Ganesh, G. M. (2022). A comprehensive overview on corrosion in RCC and its prevention using various green corrosion inhibitors. *Buildings*, 12(10), 1682. <https://doi.org/10.3390/buildings12101682>
- Amaya, J., & Cornejo Martínez, M. H. (2016). Análisis del costo del ciclo de vida de inhibidores de corrosión para la protección de estructuras de hormigón armado. LACCEI. <https://doi.org/10.18687/laccei2016.1.1.235>
- Asaad, M. A. (2021). Commercial and green corrosion inhibitors for reinforced concrete structures: A review. *International Journal of Current Science Research and Review*, 4(2). <https://doi.org/10.47191/ijcsrr/v4-i2-04>
- Castañeda, A., Corvo, F., & Howland, J. J. (2019). Evaluación de la calidad del hormigón armado antes de construir estructuras sometidas a condiciones de elevada agresividad atmosférica en Cuba. *CONPAT* 2019. <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v1cc155>
- Chugh, B. (2021). Sustainable corrosion inhibitors for concrete. En *Materials Research Forum LLC* (pp. 130–146). <https://doi.org/10.21741/9781644901496-6>
- Frontera, A., & Cladera, A. (2024). Predicción a largo plazo de la resistencia a cortante de vigas de hormigón armado basada en un modelo mecánico considerando la corrosión de la armadura. *Hormigón y Acero*, 75(302-303), 79-90. <https://doi.org/10.33586/hya.2024.3136>
- Garcés, P., Climent, M. Á., & Carmona, J. M. (2019). Alargamiento de la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos mediante la aplicación de técnicas electroquímicas. *CONPAT* 2019. <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v1cc390sp>
- Guo, R., Zhang, Q., & Wang, Z. (2022). The effect of eco-friendly inhibitors on the corrosion properties of concrete reinforcement in



- harsh environments. Materials, 15(14), 4746. <https://doi.org/10.3390/ma15144746>
- Huazhi, Z., Liu, W., & Hao, Y. (2023). Anti-corrosion study of corrosion inhibitor and sacrificial anode on coastal reinforced concrete structures. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/atde230775>
- Jano, A., Lame, A., & Kokalari, E. (2021). Test of inhibitors for preventing corrosion of steel reinforcement in concrete. Ovidius University Annals of Chemistry, 32(2), 110-113. <https://doi.org/10.2478/auoc-2021-0016>
- Khudhair, N. A., & Al-Sammarraie, A. M. A. (2019). Enhancing of corrosion protection of steel rebar in concrete using TiO₂ nanoparticles as additive. Iraqi Journal of Science, 60(9), 1898-1903. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2019.60.9.2>
- López-de Abajo, L., Gálvez, J. C., & Alberti, M. G. (2021). Simulación del proceso de carbonatación del hormigón en túneles urbanos. CONPAT/ALCONPAT. <https://doi.org/10.4322/conpat2021.691>
- Meneses, R. S., Moro, J. M., & Aveldaño, R. R. (2016). Influencia del espesor del recubrimiento de elementos de hormigón armado expuestos a procesos de corrosión y sometidos a cargas externas. Revista ALCONPAT, 6(2), 129-144. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i2.134>
- Meneses, R. S., Moro, J. M., & Ortega, N. F. (2019). Mejoras en la durabilidad de vigas de hormigón reciclado con tratamiento sometidas a cargas externas. CONPAT 2019. <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat62>
- Pico-Cortés, C., & Zega, C. J. (2019). Incidencia del árido reciclado sobre la durabilidad del hormigón armado frente a la corrosión. CONPAT 2019. <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v3rec385cmp>
- Seyhan, E., Goodwin, F., & Huang, I.-W. (2019). Corrosion protection of steel reinforcement by using surface applied corrosion inhibitors. MATEC Web of Conferences, 289, 05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928905001>
- Song, Y., Liu, J., & Wang, H. (2019). Research progress of nitrite corrosion inhibitor in concrete. International Journal of Corrosion, 2019, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/3060869>

- Tang, F., Cui, H., & Li, G. (2023). Effect of strain levels on the corrosion resistance of an enamel-coated steel rebar. *Coatings*, 13(3), 510. <https://doi.org/10.3390/coatings13030510>
- Theiss, A. F., Effting, C., & Schackow, A. (2023). Influence of migrating inhibitor concentration on corrosion resistance of steel reinforcement in concrete. *Engenharia Civil UM*, 15-29. <https://doi.org/10.21814/ecum.4885>
- Topçu, İ. B., & Uzunömeroğlu, A. (2020). Properties of corrosion inhibitors on reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 3(2), 93-109. <https://doi.org/10.31462/jseam.2020.02093109>
- Tweek, M. K., & Abdulsada, S. A. (2025). Synergistic effect of inhibitors on corrosion of reinforced concrete structures according to American Concrete Institute standards. *Zastita Materijala*, 66(1), 22-29. <https://doi.org/10.62638/zasm.at1105>
- Voulgari, E., Zacharopoulou, A., & Chousidis, N. (2019a). Corrosion behavior of reinforcement steel embedded in cement mortars using different protection systems. *Materials Sciences and Applications*, 10(6), 461-474. <https://doi.org/10.4236/msa.2019.106034>
- Voulgari, E., Zacharopoulou, A., & Chousidis, N. (2019b). Effect of organic coating corrosion inhibitor on protection of reinforced mortar. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 7(1), 20-34. <https://doi.org/10.4236/msce.2019.71003>
- Wang, J., Wang, Q., & Zhao, Y. (2023). Research progress of macrocell corrosion of steel rebar in concrete. *Coatings*, 13(5), 853. <https://doi.org/10.3390/coatings13050853>
- Wang, Q., Wang, Z., & Li, C. (2024). Research progress in corrosion behavior and anti-corrosion methods of steel rebar in concrete. *Metals*, 14(8), 862. <https://doi.org/10.3390/met14080862>
- Wang, X., Cao, Q., & Tang, F. (2023). Mechanical properties and corrosion behavior of dual-filler-epoxy-coated steel rebar under a corrosive environment. *Coatings*, 13(3), 604. <https://doi.org/10.3390/coatings13030604>



- Xu, Q., Liu, B., & Dai, L. (2024). Factors influencing chloride ion diffusion in reinforced concrete structures. *Materials*, 17(13), 3296. <https://doi.org/10.3390/ma17133296>
- Zhang, D., & Liu, G. (2023). Research on the corrosion behavior and cathodic protection of defected-epoxy-coated reinforcement exposed to chloride environment. *CIMNE*. <https://doi.org/10.23967/c.dbmc.2023.042>