

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y QUÍMICAS EN EL DISEÑO DE
MEZCLA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ARRECIFES ARTIFICIALES: UNA
ESTRATEGIA PARA MITIGAR LA EROSIÓN COSTERA**

**TÉSIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL**

**PRESENTA:
ROCIO VELÁZQUEZ GUTIÉRREZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. OMAR SALVADOR AREU RANGEL
CO-DIRECTOR:
DR. IVÁN ERICK CASTAÑEDA ROBLES**

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO.

ABRIL, 2026





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 23 de abril de 2026

Número de control: ICBI-D/844/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Rocio Velázquez Gutiérrez**, quien presenta el trabajo de titulación **"Análisis de las propiedades mecánicas y químicas en el diseño de mezcla para la construcción de arrecifes artificiales: una estrategia para mitigar la erosión costera"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

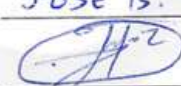
Presidente: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Secretario: Dr. José Belisario Leyva Morales

Vocal: Dr. Omar Salvador Areu Rangel

Suplente: Dra. Valeria Chávez Cerón



JOSÉ B. LEYVA M.




Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

ÍNDICE

Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	11
Índice de gráficas.....	15
Glosario de términos.....	16
Resumen	19
Abstract.....	20
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	21
1.1. Introducción	22
1.2. Antecedentes.....	25
1.2.1. Arrecifes artificiales en el Caribe mexicano	25
1.2.2. Arrecifes artificiales en el Golfo de México.....	31
1.3. Planteamiento del problema.....	37
1.4. Justificación	39
1.5. Hipótesis	41
1.6. Objetivo general	41
1.7. Objetivos específicos	41
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	42
2.1. Arrecifes naturales.....	43
2.2. Arrecifes artificiales	44
2.3. Propiedades mecánicas y químicas relevantes para arrecifes artificiales.....	45
2.3.1. Resistencia a la compresión	45
2.3.2. pH del material.....	45
2.3.3. Porosidad	45
2.4. Limitaciones de la infraestructura gris en el control de la erosión costera en Latinoamérica	47
2.5. Soluciones Basadas en la Naturaleza para mitigar la erosión en Latinoamérica	49
2.6. Estudios previos de arrecifes artificiales	50
2.6.1. Arrecifes artificiales de concreto con agregados extraídos del mar	50
2.6.2. Arrecifes artificiales de material cerámico.....	51
2.6.3. Arrecifes artificiales hechos con bioplásticos	52
2.6.4. Arrecifes artificiales de concreto a base de escorias granuladas de altos hornos.....	53
2.6.5. AA hechos con sustratos de mortero de cal	54
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	55

3.1. Descripción de agregados	56
3.1.1. Aragonita y calcita (piedra caliza)	56
3.1.2. Tezontle.....	57
3.1.3. Agregado fino y grueso comercial	58
3.2. Instrumentación.....	59
3.2.1. Prensa mecánica para compresión de cilindros	60
3.3. Pruebas granulométricas	62
3.3.1. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso comercial (grava).....	64
3.3.2. Resultados de prueba granulométrica de agregado fino comercial (arena)	65
3.3.3. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso (tezontle)	66
3.3.4. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso (caliza)	67
3.3.5. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso (aragonita)	68
3.4. Diseño de concreto por el método del ACI (ACI PRC-211.5-14,2023).....	69
3.5. Elaboración de la mezcla	78
3.5.1 Preparación de agregados gruesos	79
3.5.2 Cálculo de pesos y volúmenes de agregados gruesos	80
3.5.3. Elaboración de mezcla de concreto blanco	82
3.5.4. Elaboración de mezcla de las tres combinaciones de concreto	82
3.5.5. Revenimiento	83
3.5.6. Elaboración de cilindros de concreto.....	86
3.5.7. Desmontaje y curado de cilindros	86
3.6. Descripción de la prueba de resistencia a la compresión	87
3.6.1. Método estándar para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C 39/C 39M – 05)	87
3.6.2. Ensayo de cilindros.....	89
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN	90
4.1. Peso y densidad	91
4.1.1. Blancos	92
4.1.2. Combinación 1	93
4.1.3. Combinación 2	94
4.1.4. Combinación 3	95
4.2. Resistencia a la compresión.....	96
4.3. Medición de pH.....	99

4.4. Porosidad	102
4.5. Composición química	108
4.5.1. Resultados de la composición química de la combinación 1	110
4.5.2. Resultados de la composición química de la combinación 2	113
4.5.3. Composición química de combinación 3	116
4.5.4. Resultados de la composición química de la combinación 3 sumergida en agua salada	119
Conclusiones	120
Apéndice 1	122
Referencias.....	132

Índice de figuras

Fig. 1. Retroceso de la línea costera en Playa del Carmen, Quintana Roo. Fuente: Rodríguez (2025).	22
Fig. 2. Aspecto de las colonias de arrecifes en octubre de 2015. Fuente: Silva et al. (2016)	26
Fig. 3. Localización de arrecifes artificiales, Villa Blanca, Cozumel. Fuente: Santander et al., 2012.	29
Fig. 4. Secuencia de colonización de arrecifes artificiales en Villa Blanca, Cozumel (mayo-septiembre de 2012). Fuente: Qualti, S.A. de C.V.	30
Fig. 5. Opciones para derribar plataformas de petróleo y gas en alta mar durante su desmantelamiento. Fuente: (Sammarco et al., 2014).....	32
Fig. 6. <i>Madracis decactis</i> (coral “Ten-Ray Star”). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.....	34
Fig. 7. <i>Tubastraea coccinea</i> (coral copa naranja). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.....	35
Fig. 8. <i>Phyllangia americana</i> (coral “Hidden Cup”). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.....	35
Fig. 9. <i>Oculina diffusa</i> (coral arbusto de marfil). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.....	36
Fig. 10. Arrecife degradado en Quintana Roo, México. Fuente: Quijano (2024).	37
Fig. 11. Colonia sana de coral en el Banco de Campeche, México. Fuente: Quijano (2024).....	43
Fig. 12. Países que poseen arrecifes artificiales. Fuente: Céplamar (2015).	44

Fig. 13. Mapa de diferencias en la línea costera de Riohacha, Colombia en 2023 y 2003. Fuente: Pimienta (2023).	48
Fig. 14. Espigón y línea costera en Playa Unión, Argentina. Fuente: Donini (2021).	48
Fig. 15. Biodiversidad afectada por la erosión costera en Gandoca, Costa Rica. Fuente: Castillo-Chinchilla et al. (2019).	49
Fig. 16. Arrecifes artificiales hechos con concreto y conchas marinas. - (a) Muestras sumergidas en la zona del Reino Unido. (b,c) Biomasa colonizada después de un mes y tres meses de inmersión, respectivamente. Fuente: Boukhelf et al. (2022).	51
Fig. 17. Arrecife cerámico. Fuente: Kalam et al. (2018).	52
Fig. 18. La instalación de coral impreso en 3D. Fuente: Tarazi et al. (2019).	52
Fig. 19. Crecimiento de las algas fijadas en los especímenes después de ocho meses. Fuente: Huang et al. (2016).	53
Fig. 20. Proyecciones de: a) estructuras de calcita; b) aragonita. Fuente: Subramani et al. (2019).	57
Fig. 21. Prensa hidráulica de la marca CONTROLS, modelo 50-C43C04. Fuente: elaboración propia.	60
Fig. 22. Pruebas granulométricas de tezontle, aragonita y caliza. Fuente: Elaboración propia.	63
Fig. 23. Lavado de agregados. Fuente: Elaboración propia.	79
Fig. 24. Secado de agregado en horno de secado. Fuente: Elaboración propia.	80
Fig. 25. Elaboración de concreto modificado. Fuente: Elaboración propia.	83
Fig. 26. Revenimiento de la mezcla en blanco. Fuente: Elaboración propia.	84
Fig. 27. Revenimiento de la combinación 1. Fuente: Elaboración propia.	84

Fig. 28. Revenimiento de la combinación 2. Fuente: Elaboración propia.....	85
Fig. 29. Revenimiento de la combinación 3. Fuente: Elaboración propia.....	85
Fig. 30. Esquema de los patrones típicos de falla. Fuente: ASTM.	88
Fig. 31. Especímenes blancos, 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.	92
Fig. 32. Especímenes de la combinación 1. 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.	93
Fig. 33. Especímenes de la combinación 2. 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.	94
Fig. 34. Especímenes de la combinación 3. 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.	95
Fig. 35. Solución de agua salada al 3.5 %. Fuente: elaboración propia.....	100
Fig. 36. Resultados de la medición de pH con bandas indicadoras de pH. Fuente: elaboración propia.....	100
Fig. 37. Resultados de la medición de pH con pHmetro. Fuente: elaboración propia.	101
Fig. 38. Imagen microscópica de la superficie de la zona 1 de la combinación 1, analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	103
Fig. 39. Imagen microscópica de la superficie de la zona 2 de la combinación 1 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	103
Fig. 40. Imagen microscópica de la superficie de la zona 3 de la combinación 1 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	104
Fig. 41. Imagen microscópica de la superficie de la zona 1 de la combinación 2 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	104

Fig. 42. Imagen microscópica de la superficie de la zona 2 de la combinación 2 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	105
Fig. 43. Imagen microscópica de la superficie de la zona 3 de la combinación 2 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	105
Fig. 44. Imagen microscópica de la superficie de la zona 1 de la combinación 3 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	106
Fig. 45. Imagen microscópica de la superficie de la zona 2 de la combinación 3 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	106
Fig. 46. Imagen microscópica de la superficie de la zona 3 de la combinación 3 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.	107
Fig. 47. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 1, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	110
Fig. 48. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 2 de la combinación 1, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	111
Fig. 49. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 3 de la combinación 1, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	112
Fig. 50. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 2, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	113
Fig. 51. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 2 de la combinación 2, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	114

Fig. 52. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 3 de la combinación 2, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	115
Fig. 53. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 3, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	116
Fig. 54. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 2 de la combinación 3, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	117
Fig. 55. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 3 de la combinación 3, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	118
Fig. 56. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 3 sumergida en agua salada, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.	119

Índice de tablas

Tabla 1. Lista de materiales utilizados.....	59
Tabla 2. Ficha técnica de prensa hidráulica (Prensa de Compresión PILOT C-34C02-Serviam, 2023).....	61
Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado grueso (Grava).....	64
Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado fino (Arena)	65
Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado grueso (Tezontle)	66
Tabla 6. Análisis granulométrico del agregado grueso (Caliza).....	67
Tabla 7. Análisis granulométrico del agregado grueso (Aragonita)	68
Tabla 8. Datos del proyecto.....	69
Tabla 9. Especificaciones de los agregados.....	70
Tabla 10. Resistencia promedio requerida	70
Tabla 11. Contenido de aire dependiendo del TMN del AG	71
Tabla 12. Contenido de agua para los TMN	72
Tabla 13. Relación agua/cemento por resistencia	72
Tabla 14. Interpolación para obtener la relación agua/cemento	73
Tabla 15. Contenido de cemento.....	73
Tabla 16. Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto	74
Tabla 17. Volumen absoluto de la mezcla por m ³	75
Tabla 18. Material requerido sin considerar su porcentaje de humedad	76

Tabla 19. Valores corregidos de los agregados.....	76
Tabla 20. Aporte de agua que contienen los agregados.....	77
Tabla 21. Proporcionamiento de diseño	78
Tabla 22. Proporcionamiento para cilindros blancos de 10x20 cm.....	81
Tabla 23. Proporcionamiento para combinación 1	81
Tabla 24. Proporcionamiento para combinación 2	81
Tabla 25. Proporcionamiento para combinación 3	81
Tabla 26. Densidades de los especímenes blancos.....	92
Tabla 27. Densidades de los especímenes de la combinación 1	93
Tabla 28. Densidades de los especímenes de la combinación 2	94
Tabla 29. Densidades de los especímenes de la combinación 3	95
Tabla 30. Resultados del ensaye de cilindros a 28 días de curado. Fuente: elaboración propia.	97
Tabla 31. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 1 de la combinación 1.....	110
Tabla 32. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 2 de la combinación 1.....	111
Tabla 33. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 3 de la combinación 1.....	112
Tabla 34. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 1 de la combinación 2.....	113

Tabla 35. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 2 de la combinación 2.....	114
Tabla 36. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 3 de la combinación 2.....	115
Tabla 37. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 1 de la combinación 3.....	116
Tabla 38. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 2 de la combinación 3.....	117
Tabla 39. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 3 de la combinación 3.....	118
Tabla 40. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química en los puntos analizados de la combinación 3 sumergida en agua salada.	119
Tabla 41. Resultados de la composición química de la combinación 1, zona 1. Fuente: elaboración propia.....	122
Tabla 42. Resultados de la composición química de la combinación 1, zona 2. Fuente: elaboración propia.....	123
Tabla 43. Resultados de la composición química de la combinación 1, zona 3. Fuente: elaboración propia.....	124
Tabla 44. Resultados de la composición química de la combinación 2, zona 1. Fuente: elaboración propia.....	125
Tabla 45. Resultados de la composición química de la combinación 2, zona 2. Fuente: elaboración propia.....	126
Tabla 46. Resultados de composición química de la combinación 2, zona 3. Fuente: elaboración propia.....	127

Tabla 47. Resultados de la composición química de la combinación 3, zona 1. Fuente: elaboración propia.....	128
Tabla 48. Resultados de la composición química de la combinación 3, zona 2. Fuente: elaboración propia.....	129
Tabla 49. Resultados de la composición química de la combinación 3, zona 3. Fuente: elaboración propia.....	130
Tabla 50. Resultados de la composición química de la combinación 3 sumergida en agua salada. Fuente: elaboración propia.	131

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva granulométrica de agregado grueso (grava)	64
Gráfica 2. Curva granulométrica agregado fino (arena)	65
Gráfica 3. Curva granulométrica de agregado grueso (tezontle).....	66
Gráfica 4. Curva granulométrica agregado grueso (caliza)	67
Gráfica 5. Curva granulométrica de agregado grueso (aragonita)	68
Gráfica 6. Desviación estándar de la resistencia (kg/cm^2)	98

Glosario de términos

Arrecife artificial: Estructura creada por el ser humano e instalada en ambientes marinos con el objetivo de imitar las funciones ecológicas de los arrecifes naturales, tales como proporcionar hábitat, promover la colonización de organismos marinos y contribuir a la protección costera frente a la erosión y el oleaje.

Arrecife natural: Ecosistema marino formado principalmente por organismos coralinos que secretan carbonato de calcio, el cual se acumula a lo largo del tiempo y da lugar a estructuras biogénicas complejas que albergan una alta biodiversidad.

Erosión costera: Proceso de desgaste, transporte y pérdida de sedimentos en la línea de costa, causado principalmente por la acción del oleaje, las corrientes marinas, las mareas y las actividades humanas, lo que provoca el retroceso del litoral y la degradación de los ecosistemas costeros.

Colonización coralina: Proceso mediante el cual larvas de coral se asientan, adhieren y desarrollan sobre un sustrato sólido, iniciando la formación de nuevas colonias coralinas en ambientes naturales o artificiales.

Carbonato de calcio (CaCO_3): Compuesto químico fundamental en la formación de esqueletos coralinos y estructuras marinas, presente principalmente en forma de aragonita y calcita, y de gran relevancia en el diseño de materiales compatibles con el medio marino.

Aragonita: Forma cristalina del carbonato de calcio utilizada por los corales para la formación de sus esqueletos, caracterizada por una mayor solubilidad y biocompatibilidad en ambientes marinos en comparación con otras fases cristalinas.

Piedra caliza (calcita): Roca sedimentaria compuesta principalmente por calcita, una forma estable del carbonato de calcio, comúnmente utilizada como agregado en mezclas de concreto debido a su disponibilidad y propiedades físicas.

Tezontle: Roca volcánica de alta porosidad y baja densidad, empleada como agregado ligero en mezclas de concreto, que favorece la rugosidad superficial y la retención de agua, características útiles en aplicaciones ambientales y marinas.

Agregado: Material granular, como arena, grava o partículas recicladas, que forma parte esencial del concreto y contribuye a sus propiedades mecánicas, físicas y estructurales.

Diseño de mezclas: Proceso técnico mediante el cual se determinan las proporciones óptimas de cemento, agua, agregados y aditivos para obtener un concreto con propiedades específicas, como resistencia, durabilidad y compatibilidad ambiental.

Concreto: Material compuesto formado por cemento, agua y agregados, que al endurecer adquiere resistencia mecánica, siendo ampliamente utilizado en infraestructura marina y en la fabricación de arrecifes artificiales.

Resistencia a compresión: Capacidad del concreto para soportar cargas axiales sin fallar, considerada una de las propiedades mecánicas más importantes para garantizar la estabilidad y vida útil de estructuras marinas.

Porosidad: Relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un material, propiedad que influye directamente en la permeabilidad, la durabilidad y la capacidad de colonización biológica del concreto.

pH: Medida de la acidez o alcalinidad de una solución o superficie; en el concreto, un pH elevado puede afectar negativamente la colonización coralina, por lo que su control es crucial en aplicaciones marinas.

Durabilidad: Capacidad de un material para mantener sus propiedades físicas, mecánicas y químicas a lo largo del tiempo bajo a condiciones ambientales agresivas, como el ambiente marino.

Rugosidad superficial: Característica física de una superficie que describe su grado de irregularidad, la cual influye en la colonización de organismos marinos.

Disipación de energía del oleaje: Capacidad de una estructura para reducir la energía de las olas mediante su forma, masa y rugosidad, contribuyendo a la protección de la costa contra la erosión.

Colonización biológica: Proceso mediante el cual organismos marinos se fijan a una superficie sólida, influenciado por propiedades físicoquímicas del material como pH, rugosidad y composición química.

Cura del concreto: Conjunto de procedimientos destinados a mantener condiciones adecuadas de humedad y temperatura durante el endurecimiento del concreto, con el fin de garantizar el desarrollo óptimo de sus propiedades mecánicas.

Ensayo mecánico: Prueba de laboratorio realizada para evaluar las propiedades mecánicas de un material, como resistencia, deformación o módulo elástico, bajo condiciones controladas.

Hábitat marino: Ambiente natural del océano que proporciona las condiciones físicas, químicas y biológicas necesarias para la supervivencia y desarrollo de organismos marinos.

Resumen

La degradación de los arrecifes naturales ha incrementado la vulnerabilidad de las costas ante la erosión y la pérdida de biodiversidad, lo que evidencia la necesidad de desarrollar estructuras artificiales que repliquen las funciones protectoras y ecológicas de los ecosistemas coralinos. El objetivo de este estudio fue analizar las propiedades mecánicas y químicas de diseños de mezcla de concreto que incorporan materiales alternativos para la construcción de arrecifes artificiales (AA) orientados a mitigar la erosión costera. La metodología consistió en el diseño de mezcla conforme a los lineamientos del ACI PRC-211.5-14 del American Concrete Institute (ACI), así como en las normas de la ASTM International (American Society for Testing and Materials), las cuales establecen métodos de ensayo y especificaciones para el control de calidad de los materiales., empleando aragonita, tezontle y piedra caliza como agregados gruesos en diversas proporciones para evaluar parámetros de granulometría, revenimiento y resistencia a la compresión a los 28 días. Los resultados determinaron que la combinación con proporciones equilibradas de los tres agregados (25% de cada uno, incluida la grava convencional) alcanzó la mayor resistencia mecánica, con 132.16 kg/cm², además de presentar un pH de 8.82 en solución salina, un valor significativamente más compatible con la vida marina que el concreto convencional. Se concluye que el uso de materiales con alto contenido de carbonato de calcio y porosidad natural no solo garantiza la estabilidad estructural frente al oleaje, sino que optimiza la bioreceptividad del sustrato para la futura colonización de coral natural, consolidándose como una estrategia técnica y ecológicamente viable para la restauración de litorales.

Abstract

The degradation of natural reefs has increased coastal vulnerability to erosion and biodiversity loss, highlighting the need to develop artificial structures that replicate the protective and ecological functions of coral ecosystems. The objective of this study was to analyze the mechanical and chemical properties of concrete mix designs incorporating alternative materials for constructing artificial reefs to mitigate coastal erosion. The methodology consisted of a mixed design following ACI PRC-211.5-14 guidelines and ASTM standards, using aragonite, tezontle, and limestone as coarse aggregates in various proportions to evaluate parameters such as particle size distribution, slump, and compressive strength at 28 days. Results showed that the combination with balanced proportions of the three aggregates (25% each, including conventional gravel) achieved the highest mechanical strength of 132.16 kg/cm², while also exhibiting a pH of 8.82 in saline solution, a value significantly more compatible with marine life than conventional concrete. It is concluded that the use of materials with high calcium carbonate content and natural porosity not only ensures structural stability against wave action but also optimizes the substrate's bioreceptivity for future natural coral attachment, establishing it as a technically and ecologically viable strategy for coastal restoration.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La erosión costera representa un desafío global crítico que amenaza la estabilidad de las regiones litorales en todo el mundo. Este fenómeno es particularmente alarmante en el Caribe y otras zonas vulnerables ya que el retroceso de las líneas costeras genera pérdida de territorio en las playas (Fig. 1), lo cual desencadena graves impactos en los ecosistemas y en actividades socioeconómicas clave, afectando sectores como el turismo y la pesca, esto deriva en procesos de migración forzada donde familias enteras se ven obligadas a abandonar sus hogares debido a la pérdida de sus medios de subsistencia (Córdova et al., 2020). Este proceso se ve agravado por la intensificación del oleaje y la degradación de barreras naturales, como los arrecifes de coral, que desempeñan un papel fundamental en la protección costera. Además, el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático incrementa la energía de las olas y la penetración de agua salada, lo que exacerba el problema (Restrepo et al., 2012; Ferrario et al., 2014).



Fig. 1. Retroceso de la línea costera en Playa del Carmen, Quintana Roo. Fuente: Rodríguez (2025).

Los arrecifes naturales constituyen uno de los pilares ecológicos más importantes de los litorales. Debido a su estructura de carbonato de calcio y alta porosidad, generan hábitats complejos que albergan el 25% de la biodiversidad marina (Higgins et al., 2022), funcionando como zonas de reproducción, alimentación y resguardo. Más allá de su valor biológico, estos ecosistemas son fundamentales para la seguridad alimentaria, el ciclo de nutrientes y el sustento económico a través del turismo.

Desde una perspectiva física, los arrecifes actúan como barreras capaces de disipar hasta el 50% de la energía del oleaje (Ferrario et al., 2014), lo que reduce de forma decisiva la erosión de las playas. No obstante, cuando estos sistemas se degradan debido a olas de calor marinas, sobrepesca o contaminación, la costa pierde su defensa natural. Esto acelera los procesos erosivos y altera los patrones de transporte de sedimentos; por ejemplo, las corrientes litorales (con velocidades de hasta 0.6 m/s) transportan sedimentos hacia zonas profundas, lo que dificulta su recuperación natural (Albalawi et al., 2021; Sheppard et al., 2005).

En el Caribe Mexicano, específicamente en Cancún y la Riviera Maya, la degradación del Arrecife Mesoamericano, sumada a la construcción de infraestructura sobre dunas y manglares, ha alterado drásticamente la sedimentación. Esta pérdida de protección natural ha incrementado la vulnerabilidad de las comunidades y la necesidad de costosos proyectos de recuperación artificial (Rodríguez et al., 2010; Álvarez et al., 2009). Una clave para dar solución a esta problemática es el desarrollo de arrecifes artificiales (AA), que son estructuras sumergidas, construidas con materiales deliberadamente colocados en el lecho marino (como concreto de alta resistencia, rocas o estructuras metálicas diseñadas) con el objetivo de imitar las funciones de un arrecife natural. Su diseño busca tanto crear hábitats para la vida marina como modificar el flujo hidrodinámico para proteger la línea de costa. La implementación de AA se remonta a la década de 1980 (Higgins et al., 2022), Sin embargo, aún existen desafíos críticos: los materiales utilizados

en su construcción no siempre replican las propiedades de los arrecifes naturales, lo que limita su eficacia ecológica y costera (Kim et al., 2022).

Esta investigación propone evaluar materiales alternativos para la construcción de AA, buscando su escalabilidad industrial para su producción en serie, y que imiten la porosidad, composición mineral, rugosidad, pH y resistencia mecánica de los arrecifes naturales, para propiciar tanto su resistencia a las condiciones marinas como su capacidad para fomentar la fijación del coral natural.

1.2. Antecedentes

El retroceso de la línea costera a lo largo del mundo se ha agravado a lo largo de los años debido a la deforestación de manglares, la eliminación de dunas y la destrucción de arrecifes coralinos, ya que estos ecosistemas constituyen una defensa natural contra el oleaje y las tormentas. Sin estas barreras, la energía del oleaje aumenta, lo que provoca el transporte de grandes volúmenes de sedimentos y su alteración, generando procesos de erosión o acreción según la dirección y magnitud del oleaje. Este proceso representa una amenaza que pone en riesgo no solo la infraestructura y la economía local, sino también los ecosistemas costeros, ya que la estabilidad de una playa depende de la cantidad de sedimento disponible y de la capacidad de los procesos naturales para mantener un equilibrio dinámico (Pérez-Briceño et al., 2021).

Actualmente sabemos que las soluciones más viables para mitigar la erosión costera son las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), ya que ofrecen ventajas tanto ambientales como económicas frente a la infraestructura tradicional. A largo plazo, la infraestructura verde requiere una menor inversión, ya que tiende a ser autosostenible y sus costos de mantenimiento suelen ser bajos, lo que incrementa su viabilidad económica. Además, al estar diseñadas para respetar y trabajar en armonía con los procesos naturales, estas soluciones permiten mantener la dinámica y conectividad de los ecosistemas costeros, favoreciendo así sistemas más resilientes, adaptativos y sostenibles en el tiempo (Chávez et al., 2021).

1.2.1. Arrecifes artificiales en el Caribe mexicano

El Caribe mexicano alberga una de las regiones biológicas más significativas del planeta al abarcar gran parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM). El SAM es la segunda barrera de arrecifes más grande del mundo, extendiéndose por más de 1,000 km a lo largo de las costas de México, Belice, Guatemala y Honduras (Gallegos Rojano et al., 2021). No obstante, el SAM enfrenta procesos de degradación graves debido al desarrollo costero y al cambio climático, lo que ha mermado su capacidad natural para mitigar la erosión ante eventos hidrometeorológicos extremos (Ardisson et al., 2011). Ante esta pérdida ecosistémica, surge la necesidad de implementar el desarrollo de AA

en la región como estrategia para mitigar la erosión y restaurar las funciones ecológicas del litoral.

Un caso de estudio relevante sobre la implementación de AA se encuentra en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Este proyecto surgió tras el impacto del huracán Dean en agosto de 2007, evento que provocó cambios morfológicos severos en la línea de costa y el depósito inusual de grandes volúmenes de arena transportada por el viento hacia las zonas de jardines e infraestructura terrestre (Silva et al., 2016).

Con el objetivo de gestionar este excedente de sedimentos y proteger la propiedad frente a futuros eventos extremos, en enero de 2008 se inició la construcción de un sistema híbrido que combinó la creación de una duna artificial y la instalación de un arrecife artificial sumergido. La estructura del arrecife fue diseñada con elementos de concreto prefabricado, colocados a una distancia de 120 metros de la costa y a una profundidad de 3.5 metros, cubriendo una longitud total de 130 metros de barrera (Fig. 2).



Fig. 2. Aspecto de las colonias de arrecifes en octubre de 2015. Fuente: Silva et al. (2016)

Después de cinco años, el sistema demostró una alta eficacia tanto en la protección física como en la restauración biológica. La estructura fue capaz de disipar la energía del oleaje, lo que permitió que la playa recuperara su ciclo natural de crecimiento y estabilidad, evitando la erosión severa que afectó a zonas colindantes sin protección ante eventos de tormenta posteriores. Asimismo, el arrecife artificial cumplió una función ecológica fundamental al servir como sustrato para la vida marina; se reportó la colonización espontánea de colonias de coral y un incremento significativo en la diversidad de especies de peces, que utilizaron la estructura como refugio y zona de alimentación (Silva et al., 2016). Este antecedente demuestra que el diseño de ingeniería ecológicamente mejorada es una alternativa viable a la infraestructura gris tradicional, logrando un equilibrio entre la seguridad de los asentamientos humanos y la restauración de los servicios ecosistémicos del arrecife natural (Silva et al., 2016).

Otro caso relevante en el Caribe mexicano es el proyecto de AA implementado en la zona de Playa Villa Blanca, en Cozumel, Quintana Roo, documentado por Santander et al. (2012). Este proyecto surge como respuesta al deterioro de los arrecifes coralinos naturales, asociado al calentamiento global, al aumento de los huracanes intensos y a la alta presión turística, particularmente la del buceo recreativo, que supera la capacidad de carga recomendada internacionalmente.

El proyecto, financiado mediante el Fondo Mixto CONACYT–Gobierno de Quintana Roo, contempló la instalación de 52 estructuras denominadas Arrecifes Fractales Artificiales (AFA) en aguas someras frente a Villa Blanca. Estas estructuras comenzaron a instalarse en junio de 2012, aunque para septiembre del mismo año únicamente se había colocado aproximadamente la mitad debido a limitaciones logísticas de materiales.

Cada módulo fue fabricado con concreto marino de alta resistencia ($f'c \approx 300 \text{ kg/cm}^2$), reforzado con acero, y con una modificación del pH superficial (de 12 a 8) para favorecer la colonización biológica. Los módulos, de aproximadamente 125 kg y de $1.2 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$, se ensamblaron en unidades de cuatro a seis piezas, formando estructuras complejas capaces de imitar la heterogeneidad de los arrecifes naturales.

La instalación se realizó sin maquinaria pesada, lo que redujo el impacto durante su colocación. Las estructuras se anclan al sustrato mediante taquetes en zonas rocosas o anclas de arena, mediante técnicas de barrenado que incluyen la succión de sedimentos para evitar daños a organismos cercanos. Los AA se colocaron en diferentes zonas, cubriendo un área total de instalación de 7776 m^2 , pero las estructuras ocupan solo 138.36 m^2 del fondo marino (Fig. 3).

En términos ambientales, el estudio identificó que los principales impactos negativos se concentraron en la etapa de instalación, en particular por la suspensión de sedimentos durante el anclaje, aunque estos fueron clasificados como bajos, localizados y reversibles gracias a la implementación de técnicas de succión de sedimentos. Por otro lado, se proyectaron impactos positivos asociados a la generación de hábitat, al incremento de la biodiversidad y a la diversificación de la actividad turística.

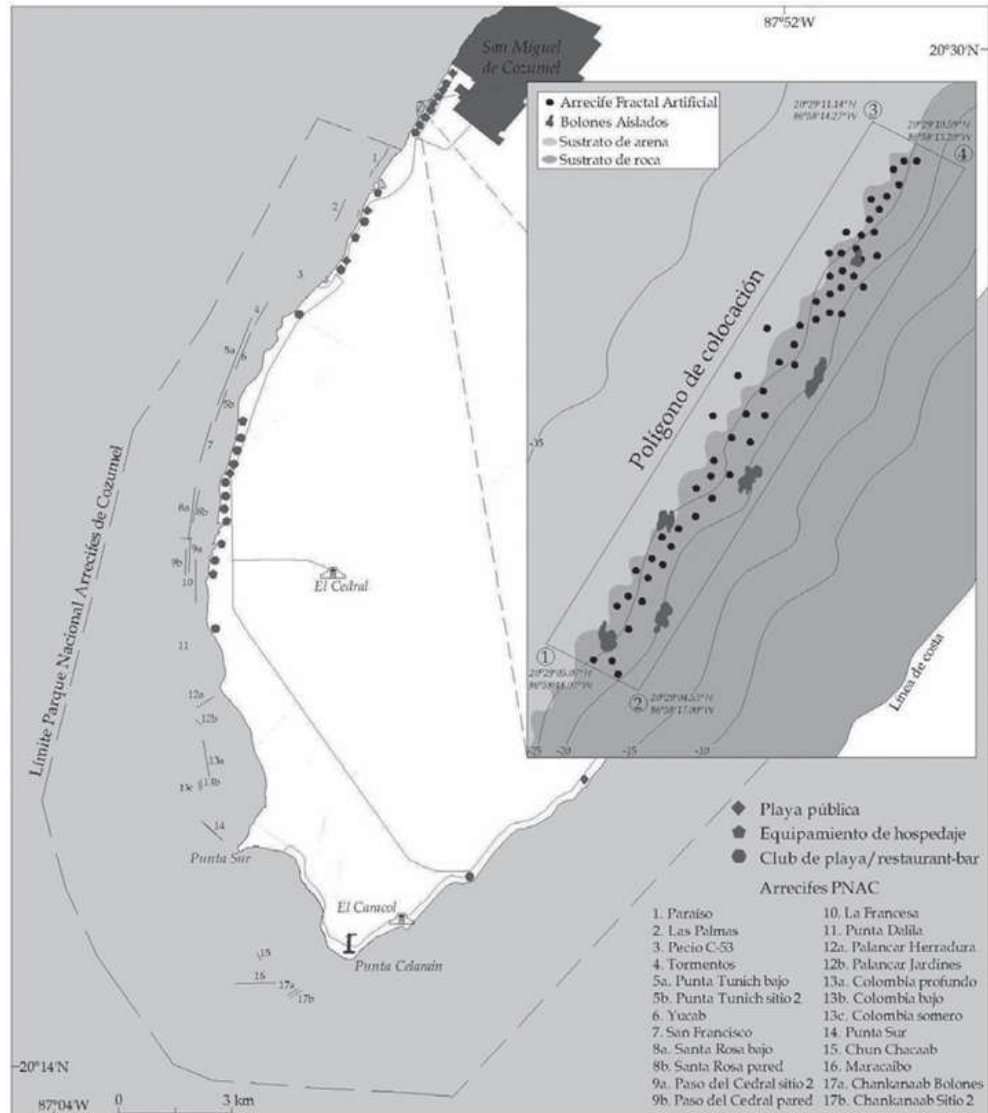


Fig. 3. Localización de arrecifes artificiales, Villa Blanca, Cozumel. Fuente: Santander et al., 2012.

Los monitoreos iniciales (mayo–septiembre de 2012) mostraron recubrimientos por parte de productores primarios en dos semanas y una rápida llegada de peces juveniles de diversas especies, lo que confirma su efectividad para incrementar la diversidad estructural y funcional del ecosistema (Fig. 4).

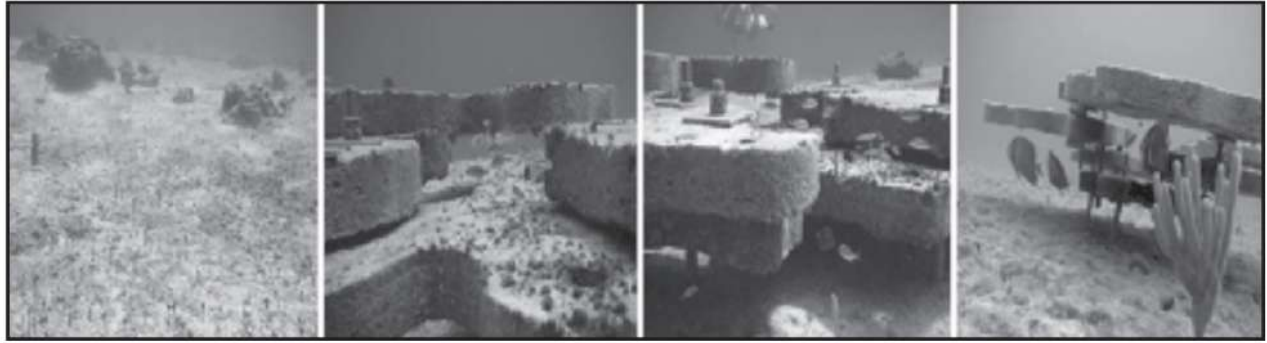


Fig. 4. Secuencia de colonización de arrecifes artificiales en Villa Blanca, Cozumel (mayo-septiembre de 2012). Fuente: Qualti, S.A. de C.V.

La información disponible sobre el proyecto corresponde únicamente a la fase inicial de 2012. El estudio se planteó como una línea de base para investigaciones futuras sobre colonización y uso turístico, pero no arrojó resultados a largo plazo. Asimismo, no se identificaron fuentes posteriores que documenten su evolución, su estado actual o su continuidad operativa. Por lo tanto, este caso reporta únicamente una iniciativa implementada y evaluada en su etapa temprana, lo que permite seguir implementando proyectos bien documentados desde su planeación hasta su funcionamiento operativo.

1.2.2. Arrecifes artificiales en el Golfo de México

El Golfo de México es una región caracterizada por extensos fondos blandos compuestos principalmente por arena y sedimentos finos; estas condiciones limitan la presencia de sustratos sólidos adecuados para el reclutamiento de larvas de coral, lo que restringe la formación de arrecifes naturales, especialmente en la zona norte del Golfo. Dado este contexto, cualquier estructura artificial que permanezca de forma prolongada en el agua tiene el potencial de convertirse en un “punto de anclaje” para comunidades coralinas y otros organismos bentónicos (Sammarco et al., 2014).

En México, arrecifes como los de Isla de Lobos, Veracruz, Tuxpan y Campeche se encuentran relativamente cerca de zonas operativas con plataformas petroleras, lo que abre la posibilidad de conectividad biológica entre arrecifes naturales y estructuras artificiales. Esta continuidad oceanográfica hace relevante extrapolar hallazgos provenientes del norte del Golfo hacia aguas mexicanas, especialmente en estudios sobre colonización coralina y diseño de arrecifes artificiales.

Las plataformas petroleras offshore han funcionado como arrecifes artificiales no intencionados durante décadas. Su estructura está compuesta principalmente por acero estructural, dispuesto en geometrías complejas que confieren un alto grado de tridimensionalidad. Con el paso del tiempo, estas superficies metálicas se cubren de bioincrustación (incluidas algas calcáreas, esponjas y briozoos), lo que aumenta su rugosidad superficial y las hace aptas para la fijación de larvas coralinas (Sammarco et al., 2014).

El programa estadounidense *Rigs-to-Reefs* ha formalizado la conversión de plataformas fuera de servicio en arrecifes artificiales permanentes. Este proceso puede incluir su remoción parcial, el tumbado controlado de la estructura hacia el fondo marino o el traslado de secciones específicas a zonas asignadas como sitios de arrecifes artificiales (Fig. 5). Cada modalidad influye de manera distinta en la comunidad coralina asociada. Por ejemplo, las plataformas mantenidas en posición vertical pueden albergar corales a profundidades de hasta 90 metros, mientras que las plataformas tumbadas quedan limitadas a zonas menos profundas debido a su nueva disposición en el fondo (Sammarco et al., 2014).

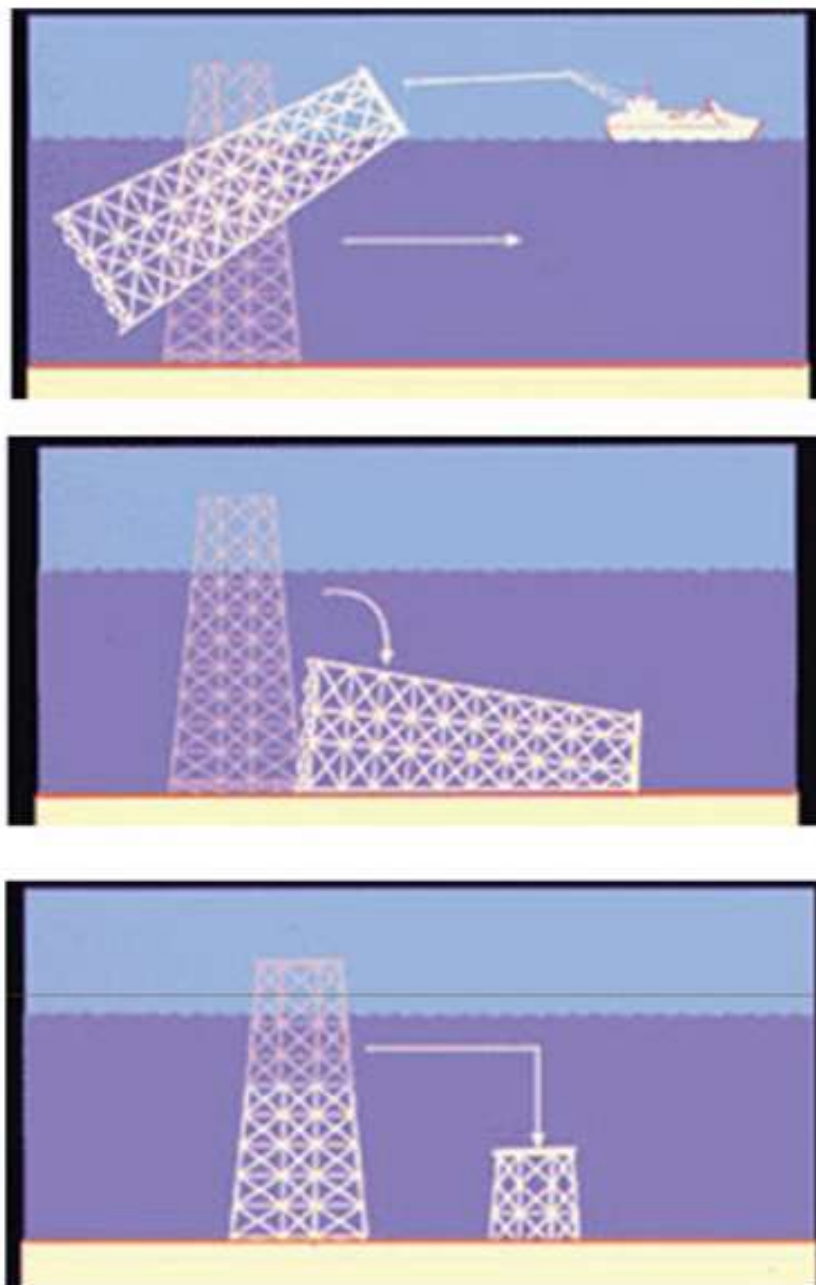


Fig. 5. Opciones para derribar plataformas de petróleo y gas en alta mar durante su desmantelamiento. Fuente: (Sammarco et al., 2014).

El crecimiento coralino en plataformas petroleras depende principalmente de la disponibilidad de luz, del tipo de especie y de la profundidad en la que se encuentra la estructura. En el norte del Golfo de México se han identificado cuatro especies dominantes: *Madracis decactis*, un coral hermatípico dependiente de la luz (Fig. 6);

Tubastraea coccinea, un coral azooxantelado invasor (Fig. 7); *Phyllangia americana* (Fig. 8); y *Oculina diffusa* (Fig. 9). La composición coralina varía según la plataforma permanezca de pie o se tumba. Especies resistentes y de rápido crecimiento, como *T. coccinea*, tienden a incrementar su abundancia cuando la estructura es tumbada, debido a la disponibilidad de superficies nuevas y limpias. Por otro lado, especies sensibles presentes en zonas más profundas, como *P. americana*, disminuyen cuando la estructura pierde su componente vertical (Sammarco et al., 2014).

La colonización en plataformas también depende de la profundidad de la zona iluminada. Los corales hermatípicos, dependientes de la fotosíntesis, se encuentran exclusivamente en las secciones superiores. A mayor profundidad, los corales azooxantelados dominan la comunidad. Estas observaciones resultan altamente útiles para contextualizar el comportamiento de colonización en otros sustratos artificiales como los módulos de concreto con agregados alternativos.

En aguas mexicanas, las plataformas de PEMEX (Petróleos Mexicanos) han permanecido durante décadas en zonas con influencia de arrecifes importantes. Aunque México no cuenta con un programa oficial de conversión de plataformas en arrecifes artificiales, la evidencia científica demuestra que estas estructuras ya cumplen esa función. La dinámica observada en plataformas estadounidenses puede, por tanto, extrapolarse para evaluar la conectividad biológica, el potencial de restauración coralina y los riesgos asociados, como la expansión de especies invasoras del género *Tubastraea*, ya documentadas en costas mexicanas.

Además, la colonización natural de corales sobre acero ofrece un punto de comparación valioso para estudios científicos centrados en la adherencia de corales a materiales alternativos. Investigaciones que utilizan concreto modificado con agregados biogénicos pueden emplear estos resultados para diseñar estructuras con mayor compatibilidad biológica, estabilidad mecánica y potencial restaurador en costas mexicanas afectadas por la erosión.

Las plataformas petroleras se diferencian de otros arrecifes artificiales en su complejidad tridimensional, su durabilidad y su escala estructural. Sin embargo, no fueron diseñadas con fines ecológicos y pueden fomentar la propagación de especies invasoras. En

contraste, los arrecifes de concreto (como los módulos tipo Reef Ball) están diseñados específicamente para promover el asentamiento coralino y presentan superficies de alta rugosidad. Los arrecifes cerámicos poseen una composición química compatible con el carbonato de calcio y son altamente eficientes en el reclutamiento coralino, aunque su costo limita su implementación. Por otro lado, las estructuras hechas con materiales alternativos representan opciones ecológicas y de bajo costo, pero requieren pruebas adicionales de resistencia y desempeño biológico.



Fig. 6. *Madracis decactis* (coral “Ten-Ray Star”). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.



Fig. 7. *Tubastraea coccinea* (coral copa naranja). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.



Fig. 8. *Phyllangia americana* (coral "Hidden Cup"). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.



Fig. 9. *Oculina diffusa* (coral arbusto de marfil). Fuente: Smithsonian National Museum of Natural History (s. f.), Ocean Portal, 2025.

1.3. Planteamiento del problema

El daño causado a los arrecifes naturales ha acelerado la pérdida de estos ecosistemas, lo que pone en riesgo la biodiversidad marina y las comunidades costeras (Fig. 10). A pesar de los esfuerzos de restauración mediante arrecifes artificiales, la efectividad de estos proyectos está fuertemente condicionada por diversos factores ambientales, climáticos y físicos. Entre los principales se encuentra el aumento de la temperatura del agua, que provoca eventos de blanqueamiento y mortalidad masiva de los corales. Asimismo, la acidificación del océano y la contaminación disminuyen la capacidad de calcificación de los organismos arrecifales y favorecen la erosión del sustrato, afectando la estabilidad estructural del arrecife. A esto se suman las características del sustrato, en particular su estabilidad y composición, ya que determinan la capacidad de asentamiento y crecimiento de los organismos. (Ceccarelli et al., 2020; Perry et al., 2025). Aunado a esto, persiste una falta de comprensión sobre los materiales más adecuados, ya que el predominio de estructuras de tipo gravitatorio provoca diversos problemas, como cambios en la calidad del agua y en el ecosistema marino (Kim et al., 2022).



Fig. 10. Arrecife degradado en Quintana Roo, México. Fuente: Quijano (2024).

El problema radica en que los materiales empleados en la construcción de estos AA no siempre cumplen con las características necesarias para adaptarse al ambiente marino. A pesar de la prevalencia casi global de los AA desplegados para mejorar el hábitat, sigue siendo objeto de debate si estas estructuras funcionan de manera similar a los arrecifes naturales comparables (Paxton et al., 2020). Por lo anterior, resulta indispensable identificar y evaluar materiales capaces de ofrecer un desempeño mecánico adecuado y de fomentar condiciones propicias para la recuperación coralina, garantizando que los arrecifes artificiales funcionen como verdaderas soluciones de protección costera y de restauración ambiental.

1.4. Justificación

El retroceso progresivo de la línea costera debido a la erosión y pérdida de playas constituye un problema global que amenaza a numerosas comunidades costeras, no solo en México, sino en distintas regiones del mundo, al afectar ecosistemas, infraestructura y actividades económicas que dependen de la estabilidad del litoral (Richiardi., 2024). En el mar Caribe, algunas playas están retrocediendo porque los arrecifes coralinos se están volviendo menos robustos; por lo tanto, la energía del oleaje es mayor en la costa (Odériz et al., 2014).

La erosión costera es un fenómeno complejo y multifactorial asociado a diversos procesos naturales y antrópicos, como la alteración del transporte de sedimentos por actividades humanas, la urbanización costera, el déficit sedimentario, el aumento del nivel del mar y la dinámica morfodinámica propia de cada litoral. Asimismo, procesos como la subsidencia tectónica, la deforestación, los cambios en el uso del suelo y la construcción de infraestructura costera contribuyen de manera significativa a la pérdida de sedimentos y al desequilibrio de los sistemas litorales. En este contexto, la degradación de ecosistemas costeros, como los arrecifes coralinos, representa una de las causas relevantes en regiones tropicales donde estos sistemas actúan como barreras naturales, ya que su deterioro reduce la capacidad de disipar la energía del oleaje, favoreciendo el retroceso de la línea de costa (Silva, et al., 2014).

Si bien el deterioro de los arrecifes coralinos no constituye el origen único del problema, su conservación y restauración son fundamentales en un enfoque integral de manejo costero. En este sentido, el uso de AA contruidos con materiales adecuados podría ser una solución clave, pero para que estos sean realmente efectivos, es necesario investigar y seleccionar los materiales que mejor imiten las propiedades de los arrecifes naturales, incluyendo su capacidad para adherir corales y su resistencia a las condiciones marinas extremas.

Actualmente, existen varios enfoques innovadores que buscan resolver este problema. A nivel mundial, el concreto prefabricado es el material más utilizado para la construcción AA porque se puede moldear y presenta características similares a las de las rocas

(Berman et al., 2023). Sin embargo, muchos de estos proyectos aún no han sido evaluados en su totalidad respecto a su efectividad en la restauración de arrecifes naturales.

Este trabajo es relevante porque aborda una brecha en la investigación existente al centrarse en la identificación y evaluación de los materiales más adecuados para la construcción de AA, basándose en el análisis de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del coral natural. Estudios de difracción de rayos X revelaron la composición química de la piedra coralina, en la que la aragonita, la calcita magna y la calcita eran los componentes principales (Manohar et al., 2020). Por ello, en esta investigación se aborda la posibilidad de utilizar aragonita y otros compuestos, como tezontle y piedra caliza, para crear los AA de la forma más similar posible a los naturales. La creación de AA es el camino hacia soluciones ecológicas a problemas costeros como la erosión y la pérdida de biodiversidad (Mendoza et al., 2019).

1.5. Hipótesis

Se plantea que los materiales seleccionados para la construcción de AA, específicamente aragonita, tezontle y piedra caliza, como agregados de concreto, pueden ofrecer resistencia estructural y favorecer condiciones físico-químicas adecuadas para la colonización del coral natural, en comparación con otros materiales utilizados convencionalmente, lo que permitiría mitigar la erosión costera y fortalecer la recuperación coralina como parte de una solución sostenible para áreas afectadas por la pérdida de arrecifes.

1.6. Objetivo general

Evaluar integralmente la viabilidad técnica del diseño de mezclas de concreto con aragonita, tezontle y piedra caliza, mediante el análisis de sus propiedades mecánicas y de sus condiciones fisicoquímicas, para su aplicación en la construcción de arrecifes artificiales orientados a mitigar la erosión costera en zonas con alto grado de degradación arrecifal.

1.7. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas de los cilindros de concreto elaborados con aragonita, tezontle y piedra caliza, mediante ensayos de resistencia a la compresión conforme a la normativa aplicable.
- Determinar las condiciones fisicoquímicas del material mediante la medición del pH para evaluar su compatibilidad con la fijación del coral natural.
- Analizar la factibilidad técnica de implementar el diseño de mezcla propuesto en un esquema de producción en serie para la fabricación de arrecifes artificiales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Arrecifes naturales

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos formados principalmente por colonias de pequeños organismos llamados corales, que secretan carbonato de calcio (CaCO_3) y construyen estructuras rígidas conocidas como piedras coralinas (Fig. 11). La piedra coralina es una caliza orgánica compuesta por carbonato de calcio en su forma de aragonita y calcita. Su matriz es porosa, con granos de cuarzo rodeados de calcita magnésica, lo que confiere una baja densidad (2.1 g/cm^3) y una alta porosidad (17.5%). Este sistema único de poros en las piedras coralinas es clave para su resistencia a la degradación por sales solubles (Manohar et al., 2020).



Fig. 11. Colonia sana de coral en el Banco de Campeche, México. Fuente: Quijano (2024).

Para reproducir artificialmente este tipo de sistemas, se deben utilizar materiales con una textura porosa y un pH alcalino para favorecer la colonización de los organismos (Boukhelf et al., 2022) y la interacción con el agua marina, facilitando la disponibilidad de calcio para los corales (Muzaki et al., 2019).

2.2. Arrecifes artificiales

Se definen como conjuntos de estructuras fondeadas en el medio marino que introducen diversidad en los ecosistemas y crean áreas de repoblación marina natural. Sus objetivos principales son la reproducción biológica y la protección costera frente a la erosión. Estas estructuras, al introducir un sustrato duro en fondos arenosos, inducen una variación ecológica que favorece la colonización por organismos sésiles, algas y fauna marina, lo que atrae a especies superiores de la cadena trófica y aumenta la productividad biológica y la biodiversidad (Romero, 1998).

Las estructuras de los AA se clasifican en tres tipos: de protección (diseñadas para impedir el arrastre), de reproducción (optimizadas para la colonización biológica) y mixtas. El material predominante es el concreto, por su durabilidad, resistencia al agua de mar y bajo impacto ambiental, además de que se ha comprobado que el coral natural trasplantado a AA hechos de concreto ha logrado permanecer adherido a estos (Irawan et al., 2019). El proceso constructivo implica la fabricación, el transporte y la instalación precisos mediante sistemas de posicionamiento global (GPS) y, en algunos casos, el apoyo de buceadores para garantizar su correcta ubicación (Romero, 1998). Su eficacia ha sido tal que su implementación se ha llevado a cabo en diferentes países alrededor del mundo (ver Fig. 12).



Fig. 12. Países que poseen arrecifes artificiales. Fuente: Céplamar (2015).

2.3. Propiedades mecánicas y químicas relevantes para arrecifes artificiales

El desempeño de los arrecifes artificiales (AA) depende de que los materiales empleados reproduzcan, en la medida de lo posible, las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los arrecifes naturales, especialmente aquellas que influyen en su estabilidad estructural, durabilidad, capacidad de fijación y el crecimiento de organismos coralinos.

2.3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto, evaluada mediante cilindros normalizados, es uno de los parámetros más utilizados y confiables para caracterizar el comportamiento mecánico de este material en ingeniería civil. En el caso de concretos destinados a la construcción de arrecifes artificiales, esta propiedad permite contar con una referencia clara sobre la calidad del material y su capacidad para mantener la estabilidad estructural en las condiciones propias del ambiente marino, donde intervienen factores como el peso propio, la interacción con las corrientes y la acción del oleaje. Aunque el desempeño del concreto en este tipo de aplicaciones puede analizarse a partir de diversas propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión constituye un punto de partida técnico sólido, ya que permite validar el desempeño básico del material y establecer un parámetro de referencia que abre la puerta a evaluaciones complementarias en estudios posteriores, tales como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad o el comportamiento frente a sollicitaciones repetidas propias del entorno costero.

2.3.2. pH del material

El pH del concreto suele ser de 14, lo que puede inhibir temporalmente el asentamiento de las larvas de coral (Kuang et al., 2025). En arrecifes naturales, la superficie coralina presenta un pH de aproximadamente 8.0, lo que favorece la fijación y el crecimiento biológico.

2.3.3. Porosidad

En el desarrollo de concretos destinados a la fabricación de arrecifes artificiales, la porosidad del material es un aspecto que merece especial atención, ya que influye tanto en su comportamiento físico como en su interacción con el entorno marino. Cuando se emplean agregados pétreos naturales con mayor área superficial y una porosidad propia

más elevada, tiende a generarse una matriz de concreto con una distribución de vacíos más marcada, lo que puede modificar la manera en que el material absorbe agua y permite el intercambio de fluidos. Este tipo de características, además de tener implicaciones en el desempeño del concreto, puede resultar favorable para la fijación y el desarrollo de organismos marinos, al ofrecer superficies más irregulares y microespacios donde pueden adherirse con mayor facilidad. Por ello, considerar la porosidad asociada al uso de agregados más porosos no solo aporta información relevante sobre la estructura interna del concreto, sino que también permite comprender mejor cómo este material puede integrarse de manera más natural al ecosistema marino sin comprometer su estabilidad básica.

2.4. Limitaciones de la infraestructura gris en el control de la erosión costera en Latinoamérica

El método más usado para mitigar la erosión costera a lo largo de la historia ha sido la construcción de obras como espolones, espigones o rompeolas (Pimienta, 2023), pero estas estructuras interrumpen el transporte litoral, lo cual genera desequilibrios que ocasionan erosión en zonas adyacentes, por mencionar algunos ejemplos:

Con el fin de resolver la problemática de la erosión costera en la zona de Riohacha- La Guajira, Colombia, el año 2008 se realizó la construcción de ocho espolones en, los cuales tendrían como propósito actuar como barreras que impiden el movimiento natural de la arena, recuperando la perdida de playa y reduciendo la erosión en esa zona, sin embargo, con el pasar de los años esta alternativa no ha sido del todo positiva, ya que, si bien es cierto que la construcción de espolones puede ser una medida de protección costera efectiva, esto sólo aplica en sectores específicos, dado a que pueden tener efectos negativos en otras partes de la costa, como es el caso de Riohacha, dado que los espolones obstaculizan la circulación natural de material sedimentario, propiciando desequilibrios importantes que desencadenan en aumentos en la erosión (Fig. 13), además, alteran los patrones de la corriente lo cual puede tener efectos negativos en la biodiversidad marina y ecosistemas costeros (Pimienta, 2023).



Fig. 13. Mapa de diferencias en la línea costera de Riohacha, Colombia en 2023 y 2003. Fuente: Pimienta (2023).

Por otro lado, en 2005 se inició la construcción de un espigón en Playa Unión, Argentina (Fig. 14), pero dicha construcción generó la acumulación de sedimentos de mayor granulometría en un sector de la playa, trasladando la erosión al norte de la misma (Donini, 2021).



Fig. 14. Espigón y línea costera en Playa Unión, Argentina. Fuente: Donini (2021).

2.5. Soluciones Basadas en la Naturaleza para mitigar la erosión en Latinoamérica

En la zona de Gandoca, Costa Rica, se ha llevado a cabo la siembra de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) en la duna y postduna a lo largo de los sectores en los cuales se ha detectado un daño crítico a la biodiversidad (Fig. 15). Esta acción ha sido realizada por los habitantes de la zona, quienes se han visto afectados por el incremento de la erosión. Se encontró que esta acción puede contribuir en la reducción de la altura del oleaje entre un 13%-100% dependiendo de la extensión de la siembra. También se ha implementado la restauración de la vegetación de marismas en zonas cercanas a las desembocaduras de los ríos y la nutrición verde (praderas de pastos marinos-nutrición de playa) para favorecer la atenuación del oleaje, estas acciones además ayudan con la presencia peces y otras especies marinas (Castillo-Chinchilla et al., 2024).

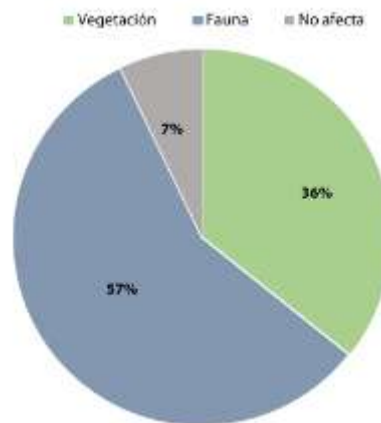


Fig. 15. Biodiversidad afectada por la erosión costera en Gandoca, Costa Rica. Fuente: Castillo-Chinchilla et al. (2019).

2.6. Estudios previos de arrecifes artificiales

Los AA han demostrado su potencial para restaurar ecosistemas y mitigar la erosión costera (Mendoza et al., 2019), pero su efectividad varía según el material empleado. Los AA tradicionales se han fabricado principalmente con concreto prefabricado, un material elegido por su maleabilidad y su similitud con las rocas (Berman et al., 2023). No obstante, estudios recientes destacan sus limitaciones, como la elevada alcalinidad superficial (pH ~12.42), lo que dificulta la colonización por organismos marinos (Zhang et al., 2019). Como alternativa, diversos estudios han propuesto diferentes métodos y materiales para la construcción de AA, pero estos presentan tanto ventajas como limitaciones que dependen de los materiales con los que están hechos. Para representarlo, he dividido estos materiales en cinco grupos:

2.6.1. Arrecifes artificiales de concreto con agregados extraídos del mar

Muchos autores han hecho estudios de AA utilizando concreto con conchas marinas como agregado ya que estas ofrecen adherencia para los corales naturales debido a su composición química similar a la de los corales naturales (Fig. 16). La presencia de conchas llega a duplicar la colonización de larvas en comparación de mezclas sin ellas, incluso se ha llegado a combinar con vidrio marino y piedra caliza (CaCO_3) por sus características físico-químicas que crean un ambiente propicio para la reproducción de los corales (Boukhelf et al., 2022; Muzaki et al., 2019; Rupasinghe et al., 2019). Pero la gran desventaja de utilizar conchas marinas como agregado es que su extracción es insostenible y dañina para los ecosistemas marinos, pues provoca aún más erosión costera.

La propuesta de usar concreto a base de cemento de sulfoaluminato es considerada por su capacidad de reducir el pH superficial (9.88 vs. 12.42 en CPO), lo cual facilita la colonización temprana de microalgas y mejora la durabilidad del concreto en ambientes marinos (resistencia a la compresión 47.4% mayor que el CPO a 28 días), pero además proponen combinarlo con arena marina, que al ser extraída genera más problemas de erosión (Zhang et al., 2019; Xu et al., 2019).

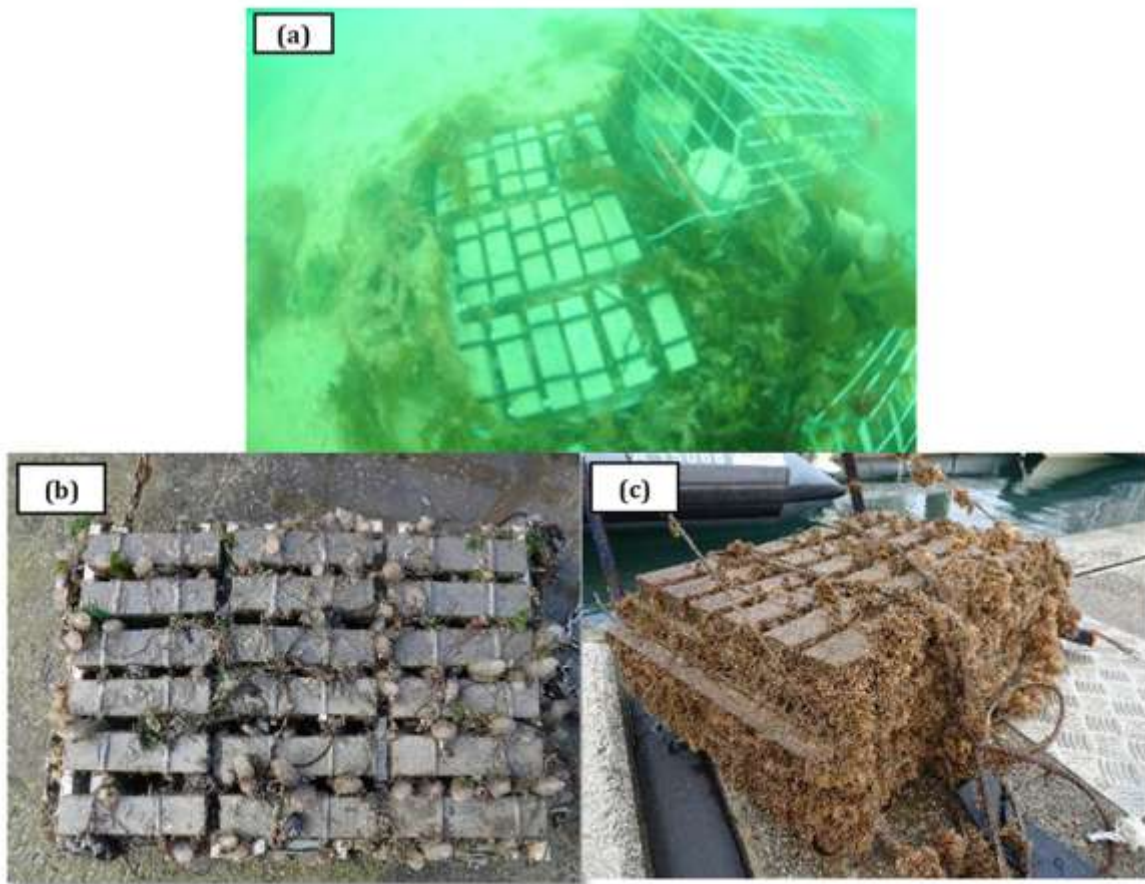


Fig. 16. Arrecifes artificiales hechos con concreto y conchas marinas. - (a) Muestras sumergidas en la zona del Reino Unido. (b,c) Biomasa colonizada después de un mes y tres meses de inmersión, respectivamente. Fuente: Boukhelf et al. (2022).

2.6.2. Arrecifes artificiales de material cerámico

La construcción de AA hechos con material cerámico compuesto principalmente de aluminio y sílice es una alternativa económica y respetuosa con el medio ambiente por su pH neutro y propiedades no tóxicas (Fig. 17), pero su aplicación en AA resulta en erosión en este material, lo que sugiere la necesidad de materiales más duros (Kalam et al., 2018; Matus et al., 2024)



Fig. 17. Arrecife cerámico. Fuente: Kalam et al. (2018).

2.6.3. Arrecifes artificiales hechos con bioplásticos

En Bali, Indonesia, se han utilizado impresoras 3D que permiten elaborar diseños complejos de corales artificiales a base de bioplásticos (Fig. 18); estos diseños favorecen la atracción de colonias de peces para que habiten en ellos (Tarazi et al., 2019). Pero en México no contamos con la infraestructura adecuada para reproducir estos corales; además, no son del tamaño adecuado para actuar como barrera frente al oleaje y mitigar la erosión costera.



Fig. 18. La instalación de coral impreso en 3D. Fuente: Tarazi et al. (2019).

2.6.4. Arrecifes artificiales de concreto a base de escorias granuladas de altos hornos

En China se ha implementado el uso AA de concreto a base de la reutilización de escorias granuladas de altos hornos y escorias siderúrgicas de fabricantes de acero cerca de costas, mostrando un crecimiento de algas en un lapso de ocho meses (Fig. 19). Esta mezcla brinda una densidad de concreto 2765.4 kg/m^3 superior al concreto normal con una densidad típica de 2400 kg/m^3 , lo cual es favorable para resistir a las corrientes marinas y tormentas, pero la seguridad ambiental de este material aún está en duda, pues se requiere de investigaciones adicionales para descartar cualquier efecto negativo sobre el ambiente marino (Huang et al., 2016).



Fig. 19. Crecimiento de las algas fijadas en los especímenes después de ocho meses.
Fuente: Huang et al. (2016).

2.6.5. AA hechos con sustratos de mortero de cal

También se ha propuesto el uso de un mortero de cal (CaCO_3) modificado con arenas, vidrios y minerales alcalinotérreos para evaluar la preferencia de asentamiento de las larvas de coral. Si bien es cierto que las larvas prefieren sustratos ricos en CaCO_3 , estas evitan sustratos con altas concentraciones de fibra de vidrio (Levenstein et al., 2022). A pesar de estas investigaciones, se observa una tendencia en el desarrollo de nuevos materiales y mezclas que, a bajo impacto ambiental, combinen propiedades fisicoquímicas similares a las de los corales naturales, como la aragonita y la calcita (Manohar et al., 2020), debido a su potencial de producción en serie. Los AA no son soluciones universales, pero su optimización puede convertirlos en herramientas clave para la restauración ecológica y la protección costera (Paxton et al. 2020).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de agregados

En la selección de los agregados se consideró el uso de aragonita (o aragonito), tezontle y piedra caliza, materiales que aportan características favorables al desempeño del concreto en aplicaciones como los arrecifes artificiales. Por una parte, estos minerales aportan un alto contenido de calcio, un elemento que puede favorecer la interacción del material con el ambiente marino. Asimismo, tanto el tezontle como ciertas formaciones de caliza presentan texturas naturalmente porosas y superficies irregulares, lo que permite generar una matriz de concreto de mayor complejidad superficial. Desde el punto de vista de la ingeniería de materiales, estos agregados también ofrecen propiedades mecánicas adecuadas para mantener la estabilidad del concreto, al tiempo que representan una alternativa de bajo impacto ambiental, con disponibilidad local y costo accesible, aspectos relevantes cuando se busca desarrollar soluciones viables y sostenibles para aplicaciones en infraestructura costera.

3.1.1. Aragonita y calcita (piedra caliza)

La aragonita está compuesta por carbonato de calcio (CaCO_3) al igual que la calcita, pero cuenta con estructuras atómicas distintas (Fig. 20), lo que hace que la aragonita sea más densa y dura que la calcita (Subramani et al., 2019). Los esqueletos de coral están formados casi exclusivamente por CaCO_3 en su forma de aragonita. Además, la composición isotópica y química de la aragonita regula condiciones como la temperatura y el pH del agua de mar (Allemand et al., 2011). Lo que creará condiciones propicias para el crecimiento de los corales naturales. Además, el uso de calcita como agregado en mezclas de concreto tiene un potencial significativo para reducir la huella de carbono de la industria del cemento, al tiempo que proporciona una alternativa económicamente viable y sostenible a los materiales de cemento tradicionales (Barbhuiya et al., 2023).

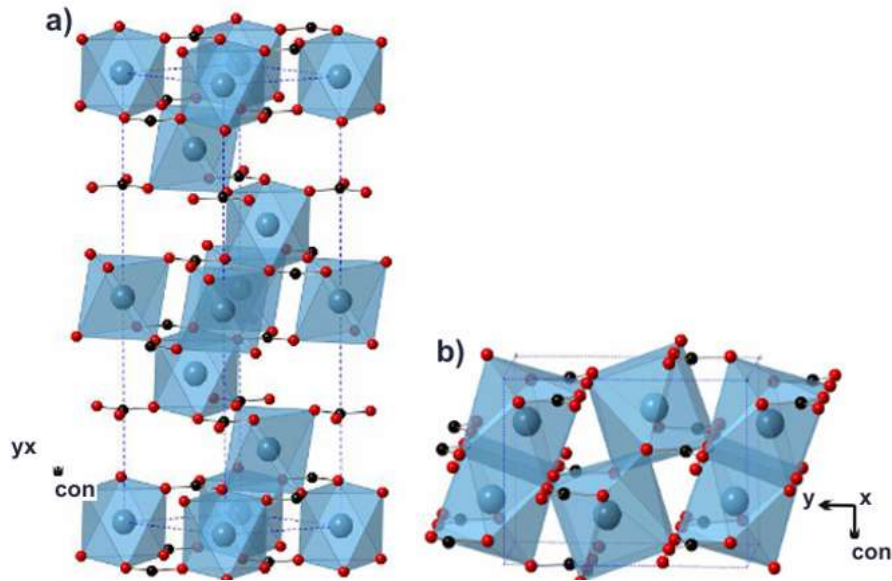


Fig. 20. Proyecciones de: a) estructuras de calcita; b) aragonita. Fuente: Subramani et al. (2019).

3.1.2. Tezontle

Entre los agregados evaluados, el tezontle destaca por varias propiedades que pueden resultar favorables para concretos destinados a arrecifes artificiales. Este material, de origen volcánico, se caracteriza por su estructura altamente porosa, baja densidad y textura naturalmente rugosa, lo que da lugar a una superficie con múltiples cavidades y microespacios. Al incorporarse a la mezcla de concreto, estas características pueden contribuir a formar una matriz con mayor irregularidad superficial, lo que facilita la interacción del material con el agua de mar y puede ofrecer puntos de anclaje para organismos marinos. Además, el uso de tezontle puede considerarse compatible con el entorno costero, ya que su naturaleza mineral es similar a la de muchas rocas volcánicas que, de manera natural, llegan a interactuar con el mar, como ocurre en regiones con actividad volcánica o en zonas donde los materiales basálticos forman parte del paisaje litoral. En estos ambientes, este tipo de rocas suele convertirse con el tiempo en sustrato para diversas comunidades biológicas, por lo que emplear un material con características geológicas semejantes permite aproximarse a condiciones más naturales, reduciendo la posibilidad de provocar alteraciones significativas en el ecosistema y favoreciendo su integración gradual con el medio marino.

3.1.3. Agregado fino y grueso comercial

Para el agregado fino se utilizó arena comercial, solicitada a un banco de materiales ubicado en Mineral de la Reforma, Hidalgo. La arena se utilizó de forma granular, siguiendo los parámetros de la norma ASTM C 136-06, que indica que este material debe clasificarse con el tamiz de 3/8". El agregado grueso (grava triturada) se obtuvo del mismo banco de materiales del que se extrajo la arena.

3.2. Instrumentación

En esta sección se describen los equipos y las herramientas utilizados para la caracterización de los agregados, la elaboración de las mezclas de concreto y la evaluación de sus propiedades mecánicas. El uso de instrumentación calibrada y normalizada garantizó la precisión y repetibilidad de los ensayos realizados. Para la elaboración del diseño de la mezcla de este proyecto, se empleó el material que se enlista en la Tabla 1:

Tabla 1. Lista de materiales utilizados	
Lista de materiales	
2 palas cuadradas	
2 cucharones de fondo plano	
Tamiz de 1 1/2"	
Tamiz de 1"	
Tamiz de 3/4"	
Tamiz de 1/2"	
Tamiz de 3/8"	
Tamiz de #4	
Tamiz de #8	
Tamiz de #16	
Tamiz de #30	
Tamiz de #50	
Tamiz de #100	
Fondo y tapa de tamiz	
Cuchara de albañil	
Báscula digital con capacidad de 40 kg	
3 moldes de cilindro para concreto de 10 cm de $\varnothing$ x 20 cm de largo	
Cono de Abrams de 20 cm de $\varnothing$ x 10 cm de $\varnothing$ x 30 cm de largo	
Varilla de punta de bala	
Fléxómetro de 8m	
3 botes de 19 L	
Prensa mecánica para compresión de cilindros (Marca CONTROLS, modelo 50-C43C04)	
Placas de neopreno	

3.2.1. Prensa mecánica para compresión de cilindros

La prensa que se ocupó en este estudio para realizar los ensayos de los cilindros de concreto es de la marca CONTROLS, modelo 50-C43C04 (Fig. 21). Esta consiste en un marco de acero soldado rígido donde el asiento esférico permite la alineación libre inicial con el concreto con el espécimen. Esta prensa está equipada con platos de 216 mm de diámetro hechos para cilindros de 100 mm x 200 mm y cubos de hasta 150 mm.

Los ensayos se realizaron conforme a lo establecido en la norma ASTM C39/C39M y su equivalente nacional NMX-C-083-ONNCCE, que establecen el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.



Fig. 21. Prensa hidráulica de la marca CONTROLS, modelo 50-C43C04. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se presenta la ficha técnica de la prensa hidráulica, en la que se detallan sus especificaciones.

Tabla 2. Ficha técnica de prensa hidráulica (Prensa de Compresión PILOT C-34C02-Serviam, 2023)

Ficha técnica	
Modelo	50-50-C43C04
Capacidad (KN)	2000
Dimensiones platos (mm)	216 (diámetro)
Recorrido pistón (mm)	50
Luz vertical máx. (mm)	375
Luz horizontal (mm)	350
Cubos (cm)	10.15
Cilindros (cm)	15x30, 16x32 y 10x20
Dimensiones totales (lxdxh) mm	875x440x1030

3.3. Pruebas granulométricas

El análisis granulométrico es el procedimiento mediante el cual se determina la distribución de tamaños de partículas de los agregados finos y gruesos mediante el método de tamizado. Este ensayo permite determinar la gradación del material, un parámetro fundamental en el diseño de mezclas de concreto, ya que influye directamente en la trabajabilidad, la compactación, el contenido de vacíos y la resistencia mecánica del material endurecido. El procedimiento se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM C136/C136M, aplicable a agregados de peso normal.

El método se desarrolló de manera secuencial, comenzando por la obtención de una muestra representativa del agregado, la cual se redujo mediante el método de cuarteo hasta alcanzar la masa mínima requerida en función del tamaño nominal máximo del material. Posteriormente, la muestra fue secada en horno a 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante, con el propósito de eliminar la humedad superficial que pudiera alterar los resultados del ensayo.

Una vez seca, se determinó la masa inicial total de la muestra utilizando una balanza calibrada con una precisión de aproximadamente 0,1 g. Posteriormente, se procedió al armado de la columna de tamices, colocándolos en orden decreciente de abertura, situando el de mayor tamaño en la parte superior y la charola recolectora en la inferior. Para el agregado grueso se emplearon tamices de 2", 1½", 1", ¾", ½", 3/8" y N° 4, mientras que para el agregado fino se utilizaron los tamices N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50 y N° 100.

La muestra fue colocada en el tamiz superior y sometida a agitación mecánica durante el tiempo necesario para lograr una separación adecuada de las partículas, asegurando que no quedara material retenido por la obstrucción de las mallas (Fig. 22). Concluido el proceso de tamizado, se determinó la masa del material retenido en cada tamiz y se registraron los valores individuales para su posterior análisis.



Fig. 22. Pruebas granulométricas de tezontle, aragonita y caliza. Fuente: Elaboración propia.

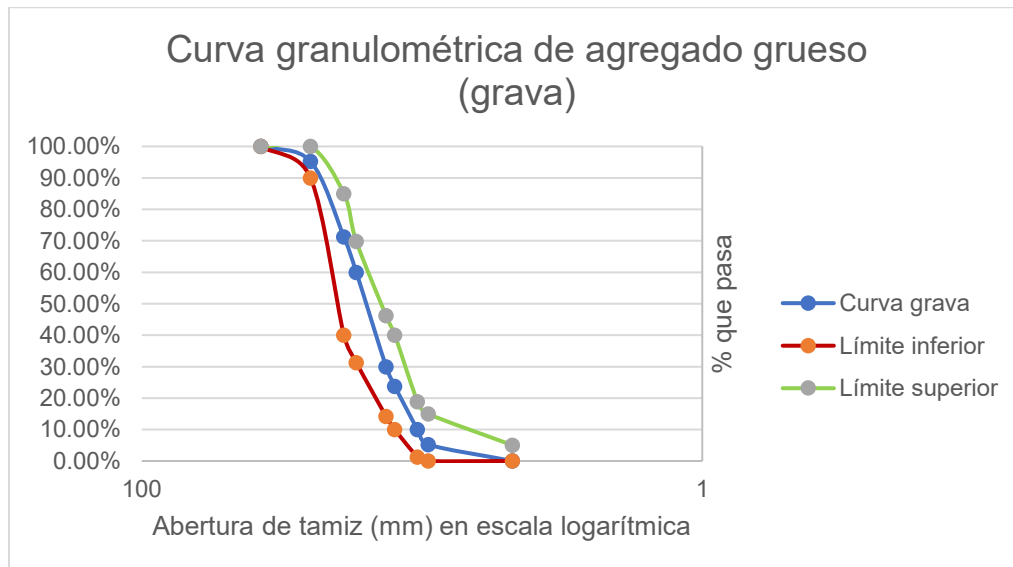
Con los datos obtenidos se calcularon el porcentaje retenido parcial, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje que pasa en cada tamiz, esto para cada uno de los agregados (de la Tabla 3 a la Tabla 7), lo que permitió trazar la curva granulométrica correspondiente (de la Gráfica 1 a la Gráfica 5). Esta curva permitió evaluar la gradación del agregado y verificar su adecuación para la elaboración de concreto normal. Además, se completó el análisis granulométrico agregando los valores de D10, D30 y D60 mediante interpolación logarítmica, ya que dichos valores críticos no coinciden directamente con las aberturas de los tamices utilizados en la prueba de laboratorio. Dado que la curva granulométrica se construye en escala logarítmica para representar adecuadamente la distribución de partículas, la interpolación resulta indispensable para estimar matemáticamente el tamaño de la abertura teórica a través de la cual pasarían el 10%, el 30% y el 60% del material.

Por último, se obtuvo el tamaño máximo nominal del agregado, este valor representa un parámetro determinante en la dosificación del concreto, ya que influye en la demanda de agua, la trabajabilidad, la adherencia entre la pasta y el agregado, así como en la resistencia mecánica final del material. Una gradación adecuada favorece una mejor distribución de partículas, reduce el contenido de vacíos y contribuye a obtener un concreto más denso y estructuralmente eficiente.

3.3.1. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso comercial (grava)

Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado grueso (Grava)

Tamíz	Abertura (mm)	Pesos retenidos (kg)	% Pesos retenidos	% Retenidos acumulados	% Que pasa	Límite inferior	Límite superior
1 1/2"	37.5	0	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1"	25	0.19	4.75%	4.75%	95.25%	90.00%	100.00%
3/4"	19	0.96	24.00%	28.75%	71.25%	40.00%	85.00%
D60	17.15	-	-	-	60.00%	31.30%	69.80%
D30	13.43	-	-	-	30.00%	14.20%	46.20%
1/2"	12.5	1.9	47.50%	76.25%	23.75%	10.00%	40.00%
D10	10.37	-	-	-	10.00%	1.30%	18.90%
3/8"	9.5	0.74	18.50%	94.75%	5.25%	0.00%	15.00%
#4	4.75	0.21	5.25%	100.00%	0.00%	0.00%	5.00%
Fondo	0.00	0.00	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Suma		4.00	100.00%				
MF=	3.045						
TM=	1 1/2"						
TMN=	1"						

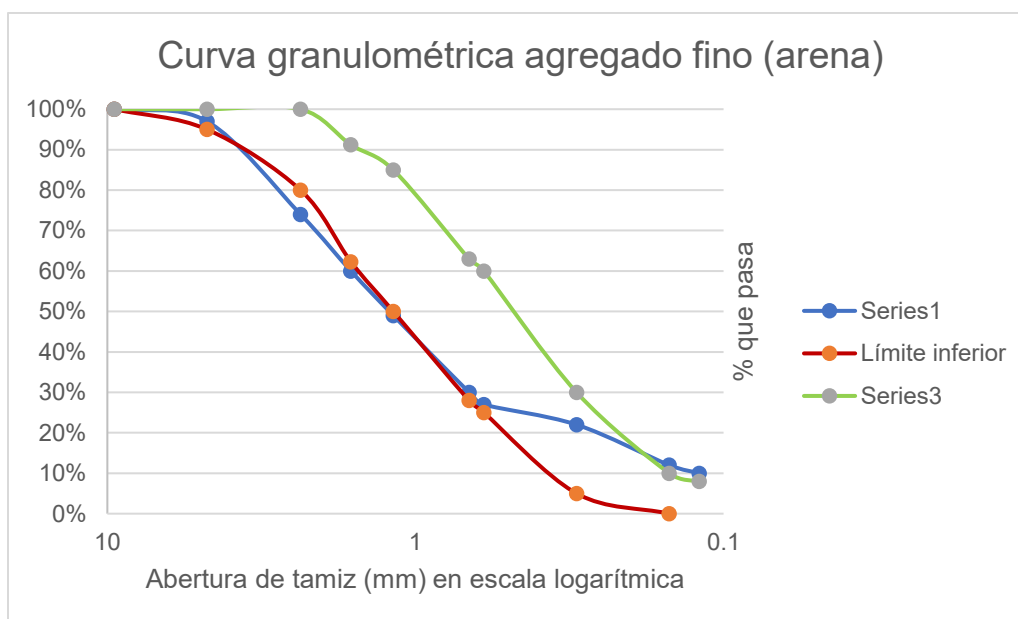


Gráfica 1. Curva granulométrica de agregado grueso (grava)

3.3.2. Resultados de prueba granulométrica de agregado fino comercial (arena)

Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado fino (Arena)

Tamíz	Abertura (mm)	Pesos retenidos (kg)	% Pesos retenidos	% Retenidos acumulados	% Que pasa	Límite inferior	Límite superior
3/8"	9.5	0	0%	0%	100%	100%	100%
#4	4.75	0.03	3.00%	3.00%	97.00%	95%	100%
#8	2.36	0.23	23.00%	26.00%	74.00%	80%	100%
D60	1.62	-	-	-	60.00%	62%	91%
#16	1.18	0.25	25.00%	51.00%	49.00%	50%	85%
D30	0.67	-	-	-	30.00%	28%	63%
#30	0.6	0.22	22.00%	73.00%	27.00%	25%	60%
#50	0.3	0.05	5.00%	78.00%	22.00%	5%	30%
#100	0.15	0.1	10.00%	88.00%	12.00%	0%	10%
D10	0.12	-	-	-	10.00%	0%	8%
Fondo	0.00	0.12	12.00%	100.00%	0.00%	0%	0%
Suma		1.00	100.00%				
MF=	3.190						
TM=	3/8"						
TMN=	#8						

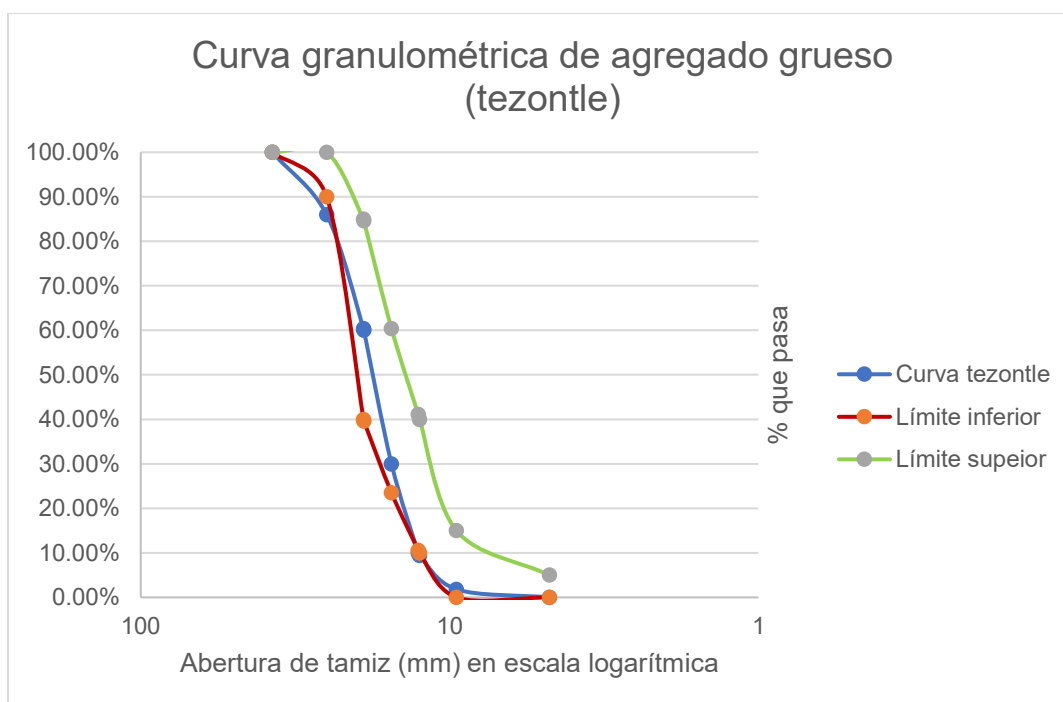


Gráfica 2. Curva granulométrica agregado fino (arena)

3.3.3. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso (tezontle)

Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado grueso (Tezontle)

Tamíz	Abertura (mm)	Pesos retenidos (kg)	% Pesos retenidos	% Retenidos acumulados	% Que pasa	Límite inferior	Límite superior
1 1/2"	37.5	0	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1"	25	0.7	14.00%	14.00%	86.00%	90.00%	100.00%
3/4"	19	1.28	25.60%	39.60%	60.40%	40.00%	85.00%
D60	18.94	-	-	-	60.00%	39.60%	84.60%
D30	15.42	-	-	-	30.00%	23.50%	60.40%
D10	12.63	-	-	-	10.00%	10.60%	41.10%
1/2"	12.5	2.55	51.00%	90.60%	9.40%	10.00%	40.00%
3/8"	9.5	0.38	7.60%	98.20%	1.80%	0.00%	15.00%
#4	4.75	0.09	1.80%	100.00%	0.00%	0.00%	5.00%
Fondo	0.00	0.00	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Suma		5.00	100.00%				
MF=	3.424						
TM=	1 1/2"						
TMN=	1"						

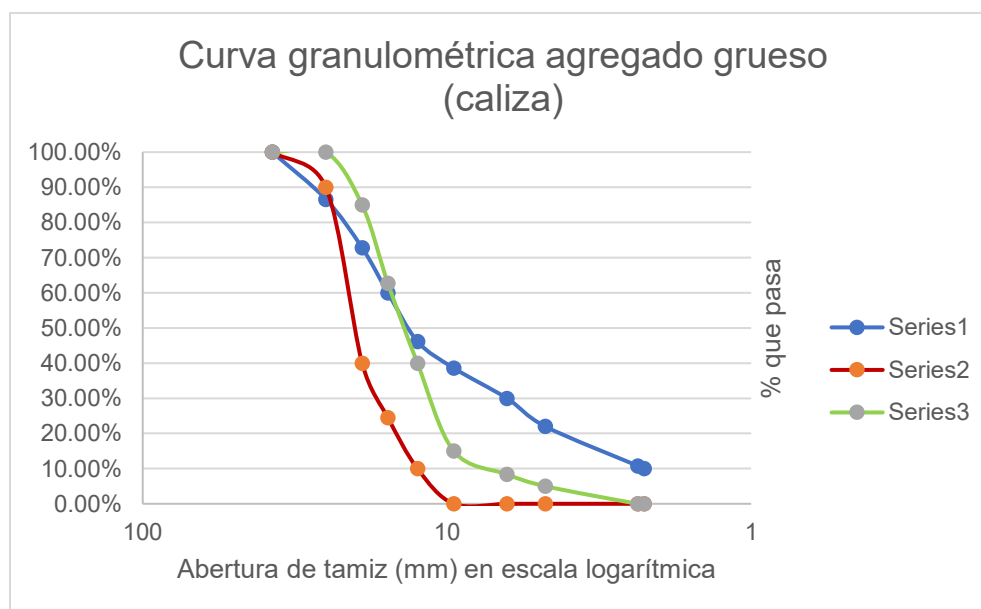


Gráfica 3. Curva granulométrica de agregado grueso (tezontle)

3.3.4. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso (caliza)

Tabla 6. Análisis granulométrico del agregado grueso (Caliza)

Tamíz	Abertura (mm)	Pesos retenidos (kg)	% Pesos retenidos	% Retenidos acumulados	% Que pasa	Límite inferior	Límite superior
1 1/2"	37.5	0	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
1"	25	0.67	13.40%	13.40%	86.60%	90%	100%
3/4"	19	0.69	13.80%	27.20%	72.80%	40%	85%
D60	15.63	-	-	-	60.00%	25%	63%
1/2"	12.5	1.33	26.60%	53.80%	46.20%	10%	40%
3/8"	9.5	0.38	7.60%	61.40%	38.60%	0%	15%
D30	6.35	-	-	-	30.00%	0%	8%
#4	4.75	0.83	16.60%	78.00%	22.00%	0%	5%
#8	2.36	0.56	11.20%	89.20%	10.80%	0%	0%
D10	2.25	-	-	-	10.00%	0%	0%
Fondo	0.00	0.54	10.80%	100.00%	0.00%	0%	0%
Suma		5.00	100.00%				
MF=	3.230						
TM=	1 1/2"						
TMN=	1"						

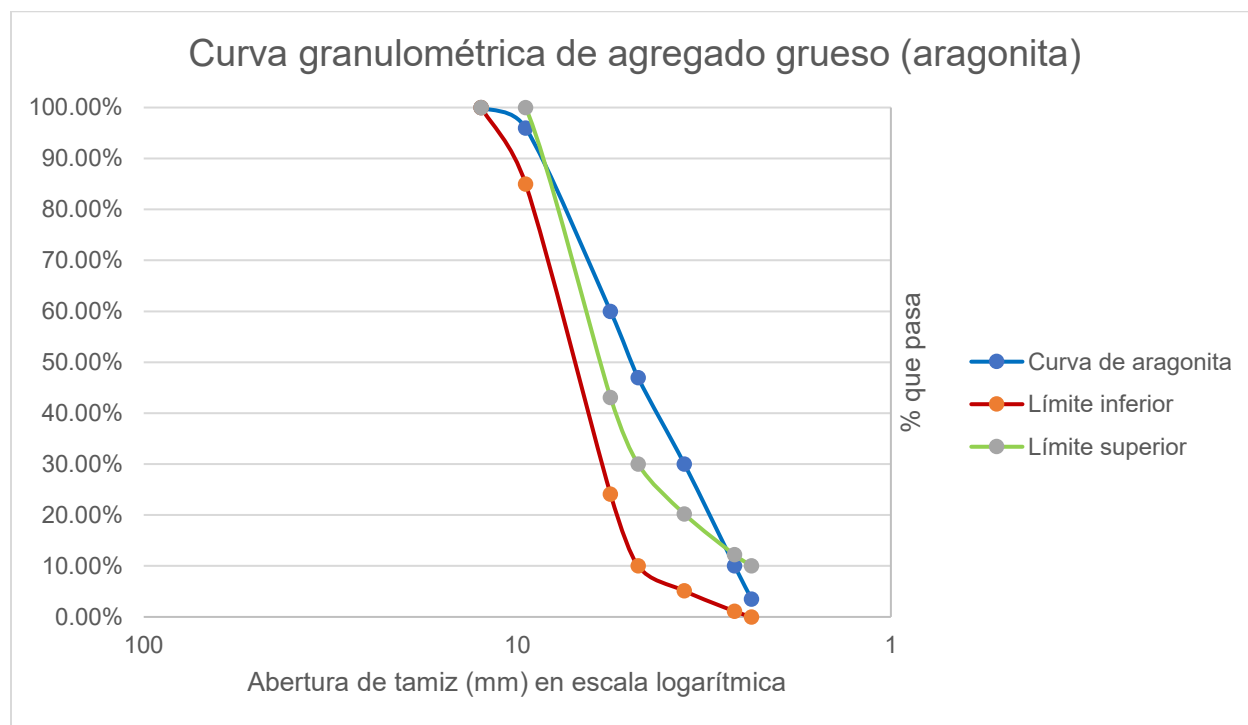


Gráfica 4. Curva granulométrica agregado grueso (caliza)

3.3.5. Resultados de prueba granulométrica de agregado grueso (aragonita)

Tabla 7. Análisis granulométrico del agregado grueso (Aragonita)

Tamíz	Abertura (mm)	Peso retenido (kg)	% Pesos retenidos	% Retenidos acumulados	% Que pasa	Límite inferior	Límite superior
1/2"	12.5	0	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
3/8"	9.5	0.08	4.00%	4.00%	96.00%	85%	100%
D60	5.63	-	-	-	60.00%	24%	43%
#4	4.75	0.98	49.00%	53.00%	47.00%	10%	30%
D30	3.57	-	-	-	30.00%	5%	20%
D10	2.62	-	-	-	10.00%	1%	12%
#8	2.36	0.87	43.50%	96.50%	3.50%	0%	10%
Fondo	0.00	0.07	3.50%	100.00%	0.00%	0%	0%
Suma		2.00	100.00%				
MF=	1.535						
TM=	1/2"						
TMN=	#4						



Gráfica 5. Curva granulométrica de agregado grueso (aragonita)

3.4. Diseño de concreto por el método del ACI (ACI PRC-211.5-14,2023)

El diseño de mezclas de concreto constituye una etapa fundamental en la producción de concretos con propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas para su aplicación estructural. En este proyecto se utilizó el propuesto por el American Concrete Institute (ACI), que establece un procedimiento sistemático para determinar las proporciones adecuadas de los materiales que conforman la mezcla de concreto.

Este método se basa en la relación entre las propiedades requeridas del concreto fresco y endurecido, tales como la resistencia, la trabajabilidad y la durabilidad, y las características de los materiales constituyentes: cemento, agregados, agua y aire incorporado. Para llevar a cabo el diseño de la mezcla, es indispensable contar previamente con los datos del proyecto, ya que estos parámetros permiten establecer los criterios de desempeño que debe cumplir el concreto. Estos datos se enlistan en la Tabla 8.

Asimismo, resulta fundamental conocer las propiedades físicas y granulométricas de los agregados, tales como el tamaño máximo nominal, el peso específico, la absorción y el contenido de humedad. La correcta determinación de estos parámetros permite optimizar la dosificación, garantizando un concreto con resistencia adecuada, buena trabajabilidad y un uso eficiente de los materiales (American Concrete Institute, 2023). A partir de estos datos iniciales (los cuales se enlistan en la Tabla 9), el método del ACI establece una secuencia de cálculos que permiten determinar las proporciones finales de cada componente de la mezcla, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 8. Datos del proyecto

Datos del proyecto:	
Sol/Tipo	1
f'_c	250 (kg/cm ²)
Pe (Peso específico del cemento)	3150
Slump (Revenimiento requerido)	4"
Pe Agua (peso específico del agua)	1000 kg

Tabla 9. Especificaciones de los agregados

Datos	Arena	Grava	Tezontle	Caliza	Aragonita
Perfil		Angular	Angular	Angular	Angular
Peso unitario suelto (kg/ m ³)	1,660	1577	1200	1600	1400
Peso unitario compactado (kg/ m ³)	1,770	1677	1500	1900	1800
Peso específico (kg/ m ³)	2750	2610	1200	2400	2900
Módulo de fineza	3.19	3.045	3.424	3.23	1.535
TMN (tamaño máximo nominal)	#8	1"	1"	1"	#4
% Absorción	5.70%	2.80%	5.00%	0.25%	2.25%
%w (Agua contenida)	2.50%	1.70%	1.70%	1.10%	1.80%

1- Cálculo de resistencia promedio requerida.

En este paso se determina la resistencia promedio que debe alcanzar el concreto para asegurar que, considerando la variabilidad del proceso constructivo y de los materiales, se cumpla la resistencia especificada en el diseño. Se obtiene incrementando la resistencia especificada mediante factores estadísticos basados en la desviación estándar del control de calidad cuando no existen registros de ensayos de cilindros de mismo diseño de mezcla anteriores al actual, para esto se usan los datos de la Tabla 10:

Tabla 10. Resistencia promedio requerida

f'c	f'cr
<210	f'c+70
210-350	f'c+84
>350	f'c+98

- f'c= Resistencia a la compresión (kg/c m²)
- f'cr=Resistencia a la compresión promedio requerida (kg/c m²)

Para este estudio la f'cr necesaria es f'cr=334.

2- Contenido de aire.

Este parámetro depende principalmente del tamaño máximo del agregado y de las condiciones de exposición del concreto (Tabla 11). El aire incorporado puede mejorar la durabilidad y también influir en la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 11. Contenido de aire dependiendo del TMN del AG

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Aire aspirado
3/8"	3.00%
1/2"	2.50%
3/4"	2.00%
1"	1.50%
1 1/2"	1.00%
2"	0.50%
3"	0.30%
4"	0.20%

En este estudio el valor requerido de aire aspirado es de 1.50%:

3- Contenido de agua.

Consiste en determinar la cantidad de agua necesaria para alcanzar la trabajabilidad requerida del concreto, generalmente medida mediante el asentamiento. Este valor depende del tamaño máximo del agregado, de la forma de las partículas y del nivel de trabajabilidad deseado (Tabla 12).

Tabla 12. Contenido de agua para los TMN

Volumen unitario de agua								
Agua L/ m ³ , para los tamaños máximos nominales de agregado grueso y consistencia indicados								
Concreto sin aire incorporado								
Revenimiento	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	-
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	-

En este estudio el valor requerido es de 193 L/ m³.

4- Relación agua-cemento.

La relación agua-cemento es uno de los parámetros más importantes en el diseño de concreto, ya que determina principalmente la resistencia y la durabilidad. El método del ACI establece valores recomendados de esta relación en función de la resistencia requerida y de las condiciones de exposición del concreto (Tabla 13).

Tabla 13. Relación agua/cemento por resistencia

Relación agua/cemento por resistencia		
f'cr (kg/c m ²)	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	
450	0.38	

Para obtener el valor requerido se hace una interpolación, ya que el f'cr requerido no aparece en la tabla, en este caso se utiliza el valor obtenido en la Tabla 14:

Tabla 14. Interpolación para obtener la relación agua/cemento

f'cr (kg/c m²)	Relación agua cemento
300	0.55
334	0.502
350	0.48

5- Contenido de cemento.

Una vez definida la relación agua-cemento y el contenido de agua, se calcula la cantidad de cemento necesaria para la mezcla. Este valor se obtiene mediante la Ecuación 1, el resultado está expresado en la Tabla 15:

Ec. 1. Contenido de cemento

$$\frac{\text{Contenido de agua}}{\text{Cemento}} = \text{Relación agua} - \text{cemento}$$

Tabla 15. Contenido de cemento

Contenido de cemento		
Cemento	384.46	kg
Cemento	7.69	Bultos

6- Peso del agregado grueso

Este cálculo se basa en el tamaño nominal máximo del agregado y en el módulo de finura del agregado fino, utilizando las tablas del método ACI (Tabla 16).

Tabla 16. Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto
Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto

Volumen del agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de fineza (b/Bo)				
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

El peso del agregado grueso se obtiene por medio de la Ecuación 2:

Ec. 2. Peso del agregado grueso

$$\text{Peso A.G.} = \frac{b}{Bo} * \text{Peso U.S.C.}$$

- Peso A.G.= Peso del agregado grueso (kg)
- b/Bo= Relación del tamaño máx. nominal del agregado y el módulo de fines del agregado fino
- Peso U.S.C.= Peso seco compactado (kg/ m³)

El peso del agregado grueso es de 1842.66 kg.

7- Volumen absoluto.

El método del volumen absoluto permite verificar que la suma de los volúmenes de todos los componentes de la mezcla sea igual al volumen total del concreto. Este procedimiento asegura que las proporciones de los materiales sean consistentes con el diseño (Tabla 17).

Tabla 17. Volumen absoluto de la mezcla por m ³		
Volumen absoluto		
Cemento	0.124	m ³
Agua	0.193	m ³
Aire	0.015	m ³
Volumen agregado grueso	0.706	m ³
Volumen agregado fino	0.22	m ³
Sumatoria	1.258	m ³

8- Peso del agregado fino.

El peso del agregado fino se utiliza para determinar la cantidad de arena necesaria para completar la mezcla. Este peso se obtiene a partir de la Ecuación 3:

Ec. 3. Peso del agregado fino

$$\text{Peso del A. F.} = (\text{Vol. A. F.}) * (\text{Peso Específico A. F.})$$

- Vol.A.F.= Volumen del agregado fino (m³)
- Peso Específico A.F.= Peso específico del agregado fino (kg/ cm²)

El peso del agregado fino es de 605 por kg/cm²

9- Presentación del diseño en estado seco.

En esta etapa se presentan las proporciones de la mezcla considerando los agregados en condición seca (Tabla 18), lo que permite establecer una referencia inicial para la dosificación teórica del concreto.

Tabla 18. Material requerido sin considerar su porcentaje de humedad

Material requerido		
Cemento	384.46	kg
Agua	193	L
Aire	1.50%	%
Agregado grueso	1842.66	kg
Agregado fino	605	kg

10-Corrección por la humedad de los agregados.

Dado que los agregados de la obra generalmente contienen cierta cantidad de humedad, es necesario realizar correcciones en los pesos calculados. Estas correcciones aseguran que las cantidades reales de materiales agregados a la mezcla se ajusten a las proporciones diseñadas. Esta corrección se realiza de acuerdo con la Ecuación 4 y el resultado está expresado en la Tabla 19:

Ec. 4. Corrección por humedad

$$\text{Corrección} = \text{Agregado} * (\%W + 1)$$

- Agregado= Valor en kg del
- agregado fino o grueso
- %W= Porcentaje de agua contenida en el agregado

Tabla 19. Valores corregidos de los agregados

Valores corregidos	
Agregado fino corregido	620.125
Agregado grueso corregido	1873.985

11-Aporte de agua a la mezcla.

Se debe calcular la cantidad de agua que los agregados aportan o absorben en función de su contenido de humedad y de su capacidad de absorción. Este aporte modifica la cantidad de agua que debe añadirse directamente durante el mezclado; se obtiene a partir de la Ecuación 5 y su resultado se ve expresado en la Tabla 20.

Ec. 5. Aporte de agua

$$Aporte = (\%W - \%Absorción) * P.A.$$

- %W= Porcentaje de agua dentro del agregado
- % Absorción= Porcentaje de absorción de agua del agregado
- P.A.= Peso en kilogramos del agregado

Tabla 20. Aporte de agua que contienen los agregados

Aportes	
A.f. Agua	-19.844
A.g. Agua	-20.61383742
Suma	-40.45783742

12-Agua efectiva.

El agua efectiva corresponde a la cantidad real de agua disponible en la mezcla para la hidratación del cemento y la trabajabilidad del concreto, una vez consideradas las correcciones por humedad de los agregados. Este parámetro se calcula por medio de la Ecuación 6:

Ec. 6. Agua efectiva

$$Agua Efectiva = a - Aporte de gua$$

- a= agua necesaria para el proyecto (L)
- Aporte de agua= aporte de agua que dan los agregados a la mezcla

El valor del agua efectiva es de 233.46 L.

13-Proporcionamiento de diseño.

Finalmente, se presentan las proporciones definitivas de la mezcla de concreto (Tabla 21), expresadas en peso de los materiales (cemento, arena, grava y agua). Este proporcionamiento constituye la dosificación final que se utilizará para la elaboración del concreto. En la primera fila se muestran las cantidades necesarias para 1 m³ de concreto, y en la segunda para un cilindro de 10x20 cm, es decir: 0.00157 m³.

Tabla 21. Proporcionamiento de diseño

	Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
	384.46	605	1842.66	233.46
Diseño	0.60	0.95	2.89	0.37

Todas las tablas e información incluidas en este apartado fueron extraídas de la norma de diseño de concreto ACI (ACI PRC-211.5-14,2023).

3.5. Elaboración de la mezcla

Se realizó el diseño de la mezcla de concreto siguiendo lo establecido por la normativa del ACI (American Concrete Institute), tomando como base la mezcla original y otras tres mezclas modificadas, sustituyendo el agregado grueso por aragonita, piedra caliza y tezontle en diferentes proporciones, a las cuales se les asignaron los nombres: combinación 1, combinación 2 y combinación 3. Para esto, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Selección de revenimiento
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado
- Cantidad de agua de mezclado y contenido de aire
- Selección de la relación agua/cemento
- Contenido de cemento
- Estimación del contenido de agregado grueso
- Estimación del contenido de agregado fino

3.5.1 Preparación de agregados gruesos

El primer paso en el diseño de mezcla fue lavar todos los agregados para eliminar impurezas, tener un mejor control de la relación agua/cemento y mejorar la trabajabilidad, conforme a la NMX-C-111 (Fig. 23).



Fig. 23. Lavado de agregados. Fuente: Elaboración propia.

Se secó todo el material en un horno de secado a 100 °C para obtener el peso seco real y evitar errores en la medición de la resistencia del concreto (Fig. 24).



Fig. 24. Secado de agregado en horno de secado. Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Cálculo de pesos y volúmenes de agregados gruesos

Una vez teniendo todos los agregados secos, se realizó el cálculo de volúmenes y pesos de los agregados alternativos para sustituir al agregado grueso comercial según las cantidades que se calcularon previamente para la dosificación del concreto. En total se diseñaron cuatro mezclas, una para cilindros blancos y tres para cilindros con diferentes proporciones de los agregados gruesos, estas proporciones se muestran a partir de la Tabla 22 hasta la Tabla 25. Se tomó en cuenta el volumen de cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto y se consideró un factor de desperdicio del 10%, según lo indica la norma A.C.I. 211.1 (American Concrete Institute, 2019), dando como resultado los siguientes pesos y volúmenes:

Relación agua/cemento= 0.502

Cilindros 10 cm x 20 cm= 0.00157 m³

Blanco. - Cantidad necesaria de agregados para un cilindro de 10 x 20 cm.

Tabla 22. Proporcionamiento para cilindros blancos de 10x20 cm

Para	Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1 m ³	384.46	605	1842.66	233.46	kg
0.00157 m ³	0.60	0.95	2.89	0.37	kg
0.00157 m ³	0.000191	0.000346	0.00111	0.37	m ³

Combinación 1.- Cantidad necesaria de agregados para un cilindro de 10 x 20 cm.

Tabla 23. Proporcionamiento para combinación 1

	Grava	Aragonita	Tezontle	Caliza
Agregado grueso (%)	10%	10%	30%	50%
Volumen (m ³)	0.00011	0.00011	0.00033	0.00055
Peso (kg)	0.29	0.32	0.40	1.33
Agregado fino	comercial (100%)			

Combinación 2.- Cantidad necesaria de agregados para un cilindro de 10 x 20 cm.

Tabla 24. Proporcionamiento para combinación 2

	Grava	Aragonita	Tezontle	Caliza
Agregado grueso (%)	10%	10%	50%	30%
Volumen (m ³)	0.00011	0.00011	0.00055	0.00033
Peso (kg)	0.29	0.32	1.45	0.87
Agregado fino	comercial (100%)			

Combinación 3.- Cantidad necesaria de agregados para un cilindro de 10 x 20 cm.

Tabla 25. Proporcionamiento para combinación 3

	Grava	Aragonita	Tezontle	Caliza
Agregado grueso (%)	25%	25%	25%	25%
Volumen (m ³)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Peso (kg)	0.72	0.80	0.33	0.66
Agregado fino	comercial (100%)			

3.5.3. Elaboración de mezcla de concreto blanco

Para la elaboración de concreto regular (con 0% de sustituto de agregado grueso), se emplearon las cantidades indicadas en la Tabla 28. Cada uno de los materiales se pesó con una báscula digital. Posteriormente, se vertieron en la superficie húmeda la grava, la arena y el cemento, donde, antes de mezclar el agua con los demás agregados, se revolvieron con la ayuda de una cuchara de albañilería para lograr la homogeneización de los materiales al mezclarse con el agua.

3.5.4. Elaboración de mezcla de las tres combinaciones de concreto

Al igual que el concreto regular, se inició pesando todos los materiales, cambiando el porcentaje de la proporción de agregado grueso según su combinación, siendo estas:

- Combinación 1: 10% de agregado grueso convencional, 10% de agaronita, 30% de tezontle y 50% de calcaliza.
- Combinación 2: 10% de agregado grueso convencional, 10% de agaronita, 50% de tezontle y 30% de calcaliza.
- Combinación 3: 25% de agregado grueso convencional, 25% de agaronita, 25% de tezontle y 25% de calcaliza.

Se vertieron los agregados y el cemento, y se revolvieron con la ayuda de una cuchara de albañilería para lograr la homogeneización de los materiales al mezclarse con el agua (Fig. 25).



Fig. 25. Elaboración de concreto modificado. Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. Revenimiento

Antes de verter las mezclas de concreto en los moldes de los cilindros, se realizó la prueba de revenimiento, según lo establecido en la NMX-C-156-ONNCCE-2010 (Secretaría de Economía, 2010). Para cada mezcla, se introdujo en el cono de Abrams hasta $\frac{1}{3}$ de su capacidad y después se dieron 25 golpes con la varilla de punta de bala. Este proceso se repitió otras dos veces, llenando el cono de Abrams a la mitad y a su máxima capacidad. Una vez finalizado este proceso, se desmontó el cono y se colocó paralelo a la mezcla, midiendo el centro de la mezcla como referencia a la mitad de la varilla, obteniendo un revenimiento de 8 cm para la mezcla blanca (Fig. 26), 9 cm para la combinación 1 (Fig. 27), 9.5 cm para la combinación 2 (Fig. 28) y 7.5 cm para la combinación 3 (Fig. 29).



Fig. 26. Revenimiento de la mezcla en blanco. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 27. Revenimiento de la combinación 1. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 28. Revenimiento de la combinación 2. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 29. Revenimiento de la combinación 3. Fuente: Elaboración propia.

3.5.6. Elaboración de cilindros de concreto

Una vez teniendo el diseño y revenimiento de cada mezcla, se inició la elaboración de los cilindros de concreto, teniendo como primer paso el aseguramiento de los moldes apretando los tornillos con ayuda de unas pinzas, esto con la finalidad de evitar fugas al momento de colar la mezcla; posteriormente se cubrió la superficie interna de los moldes con aceite requemado para fungir como desmoldante; una vez teniendo listos los moldes, se comenzó a vaciar la mezcla en ellos con ayuda de una cuchara de albañilería, en paralelo a ello, se golpeó la mezcla 25 veces con la varilla para evitar burbujas de aire, realizando este procedimiento tres veces a 1/3, 1/2 y al 100% de la capacidad de los moldes, como lo indica la NMX-C-163-ONNCCE-2019 (Secretaría de Economía, 2019). Por último, se etiquetaron los especímenes.

3.5.7. Desmontaje y curado de cilindros

El desmontaje de los cilindros se llevó a cabo tres días después del diseño de mezcla. Como primer paso, se desatornillaron los moldes de cilindros con ayuda de pinzas de compresión. Posteriormente, se introdujeron en una tina de curado y se llenó con agua hasta cubrir por completo los especímenes, como lo indica la NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Secretaría de Economía, 2017). Se dejaron 28 días en la tina para que alcanzaran su máxima resistencia a la compresión (Secretaría de Economía, 2017).

3.6. Descripción de la prueba de resistencia a la compresión

3.6.1. Método estándar para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C 39/C 39M – 05)

El objetivo principal de este método es determinar la resistencia a la compresión del concreto, un parámetro crítico para evaluar su calidad y cumplimiento de especificaciones en proyectos de construcción. La resistencia se calcula dividiendo la carga máxima aplicada entre el área transversal del espécimen. También se utiliza para el control de calidad en el mezclado, la colocación y el curado, así como para la evaluación de aditivos.

Para poder llevar a cabo esta prueba, se necesita concreto con un peso unitario superior a 50 lb/ft³ (800 kg/m³). Las unidades permitidas por este método son del sistema inglés (lb, pulgadas) o del sistema internacional (MPa, mm), pero no deben combinarse. Además, se requiere de diferentes equipos, los cuales son: Máquina de ensayo, que debe tener capacidad suficiente y cumplir con precisión (error $\leq \pm 1\%$ del valor de carga indicado) y verificación (calibración anual o después de reparaciones, siguiendo las normas ASTM E 4); Bloques de apoyo: Inferior sólido, con superficie endurecida y paralela y superior de asiento esférico, para garantizar alineación y distribución uniforme de la carga; por últimos, se requiere de dispositivos de medición para medir la masa del espécimen.

Para preparar las muestras, los cilindros deben moldearse según las normas ASTM C 31/C 31M (campo) o C 192/C 192M (laboratorio). Los núcleos perforados deben extraerse con broca diamantada, siguiendo las normas ASTM C 42/C 42M. El diámetro no debe variar más del 2% en un mismo cilindro, y los extremos deben ser planos (tolerancia ≤ 0.002 pulgadas) y perpendiculares al eje (tolerancia $\pm 0.5^\circ$). Pueden rectificarse o sellarse con material de capa (ASTM C 617 o C 1231/C 1231M).

Para llevar a cabo el procedimiento de esta prueba se deben cumplir condiciones ambientales específicas: los especímenes deben mantenerse húmedos hasta el momento de la prueba y la temperatura y humedad deben ser estables durante el ensayo.

La colocación del espécimen debe centrarse entre los bloques de apoyo y se debe asegurar un contacto uniforme, girando ligeramente el bloque esférico superior.

Al aplicar la carga, la velocidad debe ser de 35 ± 7 psi/s (0.25 ± 0.05 MPa/s) hasta la falla y para el registro se debe considerar una carga máxima y tipo de falla (según patrones en la Fig. 30).

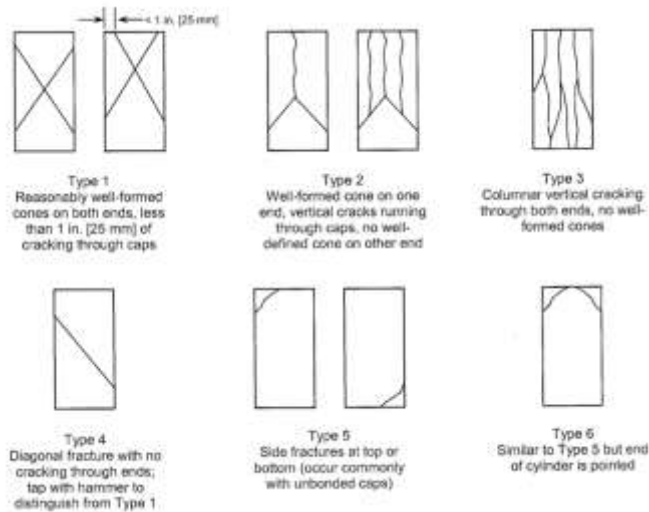


Fig. 30. Esquema de los patrones típicos de falla. Fuente: ASTM.

Se debe detener la prueba cuando la carga disminuya y el espécimen muestre un patrón de fractura definido.

Para calcular la resistencia a la compresión se utiliza la fórmula:

Ec. 7. Resistencia a la compresión

$$Resistencia = \frac{Carga\ máxima}{Área\ transversal}$$

- Se debe expresar el resultado en psi (libras por pulgada cuadrada) o en MPa (megapascuales), redondeado a 10 psi o 0.1 MPa.
- Si $L/D < 1.75$, aplicar factores de corrección (por ejemplo, 0.98 para $L/D = 1.75$).

El coeficiente de variación en cuanto a seguridad será de: 2.4% (laboratorio) a 2.9% (campo) para cilindros de 6x12 pulgadas y la variación aceptable entre cilindros compañeros será de $\leq 8\%$ (dos cilindros) o $\leq 9.5\%$ (tres cilindros).

3.6.2. Ensayo de cilindros

Después de 28 días de curado, se extrajeron los cilindros y se dejaron escurrir para eliminar el exceso de humedad. Posteriormente se registraron sus pesos y con la prensa mecánica se tronaron para obtener su resistencia a la compresión, este proceso se realizó siguiendo la norma ASTM C39 (American Society for Testing and Materials, ASTM C127-07 2017).

Se colocaron placas de neopreno en las parte superior e inferior de los cilindros para introducirlos a la prensa hidráulica. Se colocaron en el centro de la base para asegurar que la fuerza aplicada al elemento sea lo más perpendicular posible al área del cilindro, siguiendo la NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Secretaría de Economía, 2017).

Por último, introdujo uno por uno cada cilindro en la prensa, a la par, se anotaron las medidas y peso de cada cilindro en la prensa para obtener sus respectivas resistencias a la compresión

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

4.1. Peso y densidad

Es importante conocer el peso y la densidad de las estructuras que conforman los arrecifes artificiales, ya que constituyen aspectos fundamentales para garantizar su estabilidad, funcionalidad y durabilidad en el ambiente marino. Un módulo con peso suficiente evita que las corrientes, el oleaje o fenómenos meteorológicos como tormentas y huracanes desplacen la estructura, asegurando que permanezca fija en su posición original. Esto es especialmente relevante en zonas vulnerables como el Caribe mexicano, donde la dinámica oceánica es intensa.

Por otro lado, la densidad del material determina la capacidad del AA para soportar cargas, resistir la corrosión y mantener su integridad física a largo plazo. Una densidad adecuada también permite que el sustrato proporcione una superficie apropiada para la colonización de algas, invertebrados y corales, lo que facilita el proceso de sucesión ecológica.

En este estudio, la combinación con mayor densidad fue la combinación 3 (25% grava, 25% aragonita, 25% calcita y 25% tezontle), teniendo una densidad promedio de 2027.6 kg/m³, lo que la convierte en la mezcla más viable para adaptarse a las condiciones del ambiente marino. Las fracturas de los especímenes correspondientes a la mezcla en blanco, combinación 1, combinación 2 y combinación 3 se aprecian de la Fig. 31 a la Fig. 34 respectivamente. De igual manera, los pesos, volúmenes y densidades de cada espécimen correspondiente a cada mezcla se registran de la Tabla 26 a la Tabla 29.

4.1.1. Blancos



Fig. 31. Especímenes blancos, 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. Densidades de los especímenes blancos

Especímen	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
1	3.33	0.00157	2121.02
2	3.45	0.00157	2197.45
3	3.32	0.00157	2114.65

4.1.2. Combinación 1



Fig. 32. Especímenes de la combinación 1. 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.

Tabla 27. Densidades de los especímenes de la combinación 1

Especímen	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
1	3.21	0.00157	2044.59
2	3.34	0.00157	2127.39
3	3.14	0.00157	2000.00

4.1.3. Combinación 2



Fig. 33. Especímenes de la combinación 2. 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Densidades de los especímenes de la combinación 2

Especímen	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
1	3.1	0.00157	1974.52
2	2.88	0.00157	1834.39
3	2.87	0.00157	1828.03

4.1.4. Combinación 3



Fig. 34. Especímenes de la combinación 3. 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. Densidades de los especímenes de la combinación 3

Especímen	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
1	3.02	0.00157	1923.57
2	3.28	0.00157	2089.17
3	3.25	0.00157	2070.06

4.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de la mezcla utilizada para fabricar los AA es un factor crítico para garantizar su desempeño estructural en el ambiente marino. Estas estructuras permanecen expuestas a presiones, impactos y esfuerzos constantes generados por el oleaje, las corrientes marinas, el arrastre de sedimentos y, especialmente, por fenómenos meteorológicos intensos como tormentas y huracanes. Una mezcla de alta resistencia evita fracturas, desprendimientos o colapsos que podrían comprometer la estabilidad del arrecife artificial y poner en riesgo al ecosistema circundante.

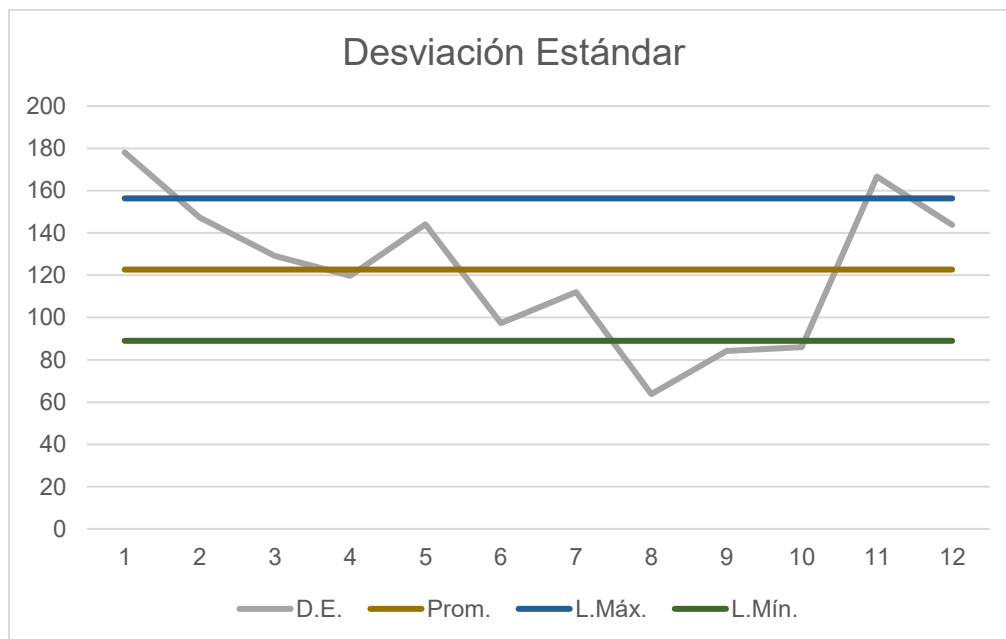
Además, una alta resistencia a la compresión prolonga la vida útil del concreto, permitiendo que la estructura resista la corrosión, la abrasión y el desgaste mecánico sin deteriorarse prematuramente. Esto es fundamental para asegurar que los AA funcionen como un sustrato estable a largo plazo, capaz de sostener el crecimiento de organismos marinos como algas, esponjas y corales. La integridad estructural también es clave para que la colonización biológica se mantenga de manera continua, favoreciendo la rehabilitación ecológica del área.

De acuerdo con los resultados de la prueba de resistencia a la compresión, la mezcla con mayor resistencia fue la de la combinación 3 (25% grava, 25% aragonita, 25% calcita y 25% tezontle), lo que la convierte en la combinación más competente. Los resultados de cada combinación se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados del ensaye de cilindros a 28 días de curado. Fuente: elaboración propia.

Tipo de cilindro	No. De cilindro	Datos generales de los cilindros				Datos promedio de los cilindros			
		Peso (kg)	Resistencia		% de resistencia	Peso promedio (kg)	Resistencia media		% de resistencia
			En kg/cm ²	En T			en kg/cm ²	En T	
Blanco	1	3.33	178.11	13.989	71%	3.37	151.51	11.9	61%
	2	3.45	147.22	11.562	59%				
	3	3.32	129.19	10.146	52%				
Combinación 1	1	3.21	119.68	9.399	48%	3.23	120.35	9.45	48%
	2	3.34	144.07	11.316	58%				
	3	3.14	97.3	7.642	39%				
Combinación 2	1	3.1	111.98	8.795	45%	2.95	86.66	6.81	35%
	2	2.88	63.77	5.008	26%				
	3	2.87	84.24	6.616	34%				
Combinación 3	1	3.02	86.01	6.756	34%	3.18	132.16	10.38	53%
	2	3.28	166.61	13.086	67%				
	3	3.25	143.87	11.299	58%				

A partir de estos datos, se calculó la desviación estándar con el propósito de evaluar la confiabilidad y la precisión de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, obteniéndose un promedio total de 122.67 y una desviación estándar de 33.68. Al trabajar con agregados no convencionales de origen orgánico y volcánico, como la aragonita y el tezontle, la variabilidad estadística se convierte en un indicador de la homogeneidad de la mezcla y de la eficacia del proceso de dosificación conforme a la normativa ACI. Esta métrica es indispensable porque permite determinar si el promedio de resistencia reportado es un valor representativo del comportamiento real del material. El análisis de la desviación estándar posiciona a la combinación 3 como la opción más robusta y confiable para la fabricación de arrecifes artificiales, ya que no solo ofrece la mayor capacidad de carga, sino que también garantiza que las propiedades mecánicas se mantendrán constantes y uniformes en la producción de los módulos a escala real, como se aprecia en la Gráfica 6.



Gráfica 6. Desviación estándar de la resistencia (kg/cm²)

4.3. Medición de pH

El pH de la mezcla utilizada para fabricar arrecifes artificiales es un factor determinante para el éxito ecológico de estas estructuras. El concreto Portland convencional presenta un pH altamente alcalino, generalmente entre 12 y 13, debido a la presencia de hidróxido de calcio y otros compuestos alcalinos producto de la hidratación del cemento (Neville, 2011). Esta alcalinidad puede generar condiciones adversas para la fijación de larvas coralinas y otros organismos calcificadores, que requieren valores de pH cercanos a los del agua de mar, entre 8.0 y 8.3 (Allemand et al., 2011).

Diversos estudios han demostrado que superficies con pH elevado pueden retrasar o inhibir el asentamiento biológico, lo que afecta el éxito ecológico de los arrecifes artificiales (Perkol-Finkel et al., 2006). Por esta razón, proyectos como los desarrollados en Cozumel modifican el pH superficial del concreto para reducirlo a valores más compatibles con el entorno marino, cercanos a pH 8, lo que favorece una colonización más rápida y natural. Un pH adecuado favorece que los organismos pioneros se adhieran de inmediato, lo que acelera la sucesión ecológica y la formación de comunidades más complejas a mediano plazo (Kuang et al., 2025).

Para medir el pH del ambiente que genera nuestra mezcla se realizó una solución de agua salada con cloruro de sodio al 3.5% para imitar la salinidad del mar (Fig. 35) y se sumergió en ella el espécimen de mayor resistencia, se midió el pH primeramente con bandas indicadoras de pH (Fig. 36) y posteriormente con un pH-metro para obtener resultados más precisos, dando como resultado un pH DE 8.82 (Fig. 37).



Fig. 35. Solución de agua salada al 3.5 %. Fuente: elaboración propia.



Fig. 36. Resultados de la medición de pH con bandas indicadoras de pH. Fuente: elaboración propia.



Fig. 37. Resultados de la medición de pH con pHmetro. Fuente: elaboración propia.

4.4. Porosidad

La porosidad de los materiales empleados en la fabricación de arrecifes artificiales es un factor determinante para fomentar la colonización biológica y el establecimiento de comunidades marinas. Diversos estudios han demostrado que una mayor porosidad incrementa la bioreceptividad del sustrato, favoreciendo la fijación inicial de microorganismos, larvas de coral, algas coralinas y esponjas al proporcionar microhábitats protegidos y una mayor área disponible para la fijación (Campos, 2019; Nguyen et al., 2025). Esta característica imita las condiciones de los arrecifes naturales, donde las superficies rugosas y porosas desempeñan un papel fundamental en la sucesión ecológica temprana.

Asimismo, la presencia de poros y cavidades interconectadas mejora la integración del arrecife artificial con el ecosistema marino circundante. La complejidad estructural que aporta la porosidad favorece la formación de biopelículas y la creación de nichos ecológicos diversos, lo que incrementa la biodiversidad y acelera el proceso de colonización por peces e invertebrados (Lee et al., 2025). Estos elementos permiten que la estructura artificial se asemeje funcionalmente a un arrecife natural, lo que promueve una mayor estabilidad ecológica a largo plazo.

La porosidad también influye en el comportamiento químico superficial del concreto en ambientes marinos. Debido al pH elevado del concreto recién fabricado, es necesario que disminuya antes de permitir la colonización coralina. La presencia de poros facilita el intercambio de agua marina, acelerando la lixiviación de hidróxidos y contribuyendo al descenso del pH superficial hasta valores compatibles con el crecimiento de los corales (Moreno, 2006; Nguyen et al., 2025). Este proceso es fundamental para garantizar que el sustrato sea adecuado para organismos clasificadores sensibles.

Es importante precisar que, para efectos de la presente investigación, la porosidad no fue objeto de ensayos cuantitativos para su medición. Por lo tanto, este parámetro se discute principalmente de manera conceptual con base en la literatura existente; no obstante, dicha característica puede apreciarse cualitativamente a través del registro fotográfico obtenido con un sistema de microscopía con láser KEYENCE EA-300 VHX Series, el cual se presenta en la Fig. 38 a la Fig. 47.

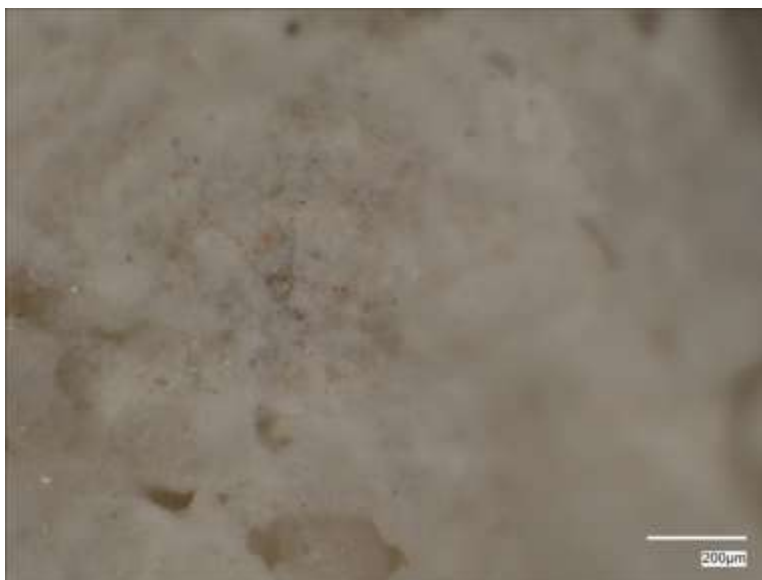


Fig. 38. Imagen microscópica de la superficie de la zona 1 de la combinación 1, analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.

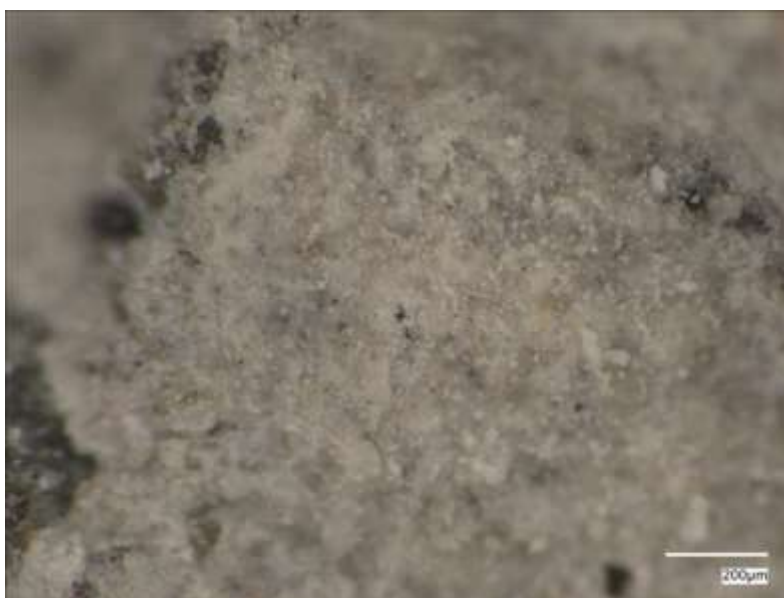


Fig. 39. Imagen microscópica de la superficie de la zona 2 de la combinación 1 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.



Fig. 40. Imagen microscópica de la superficie de la zona 3 de la combinación 1 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.

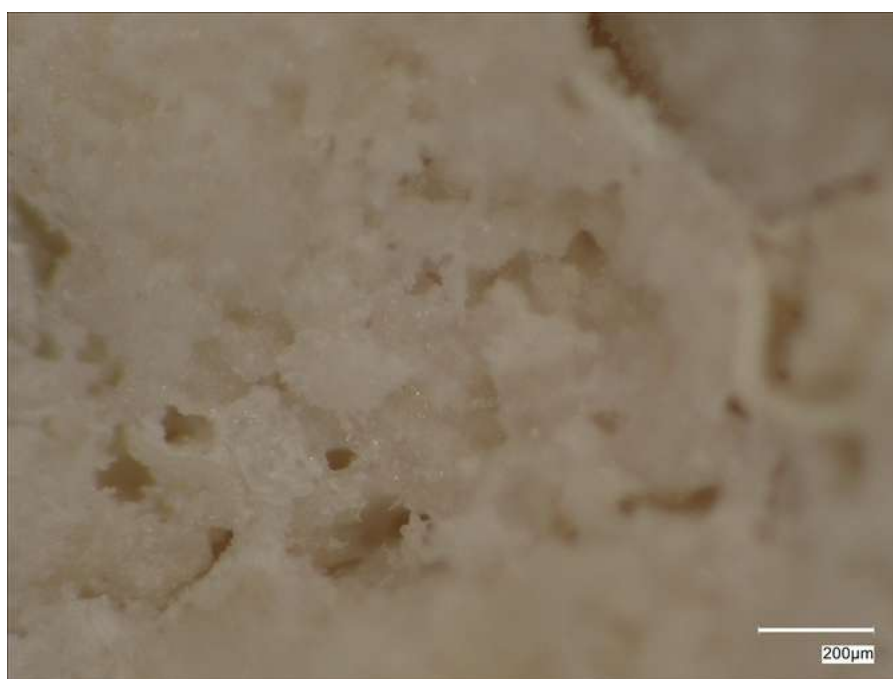


Fig. 41. Imagen microscópica de la superficie de la zona 1 de la combinación 2 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.

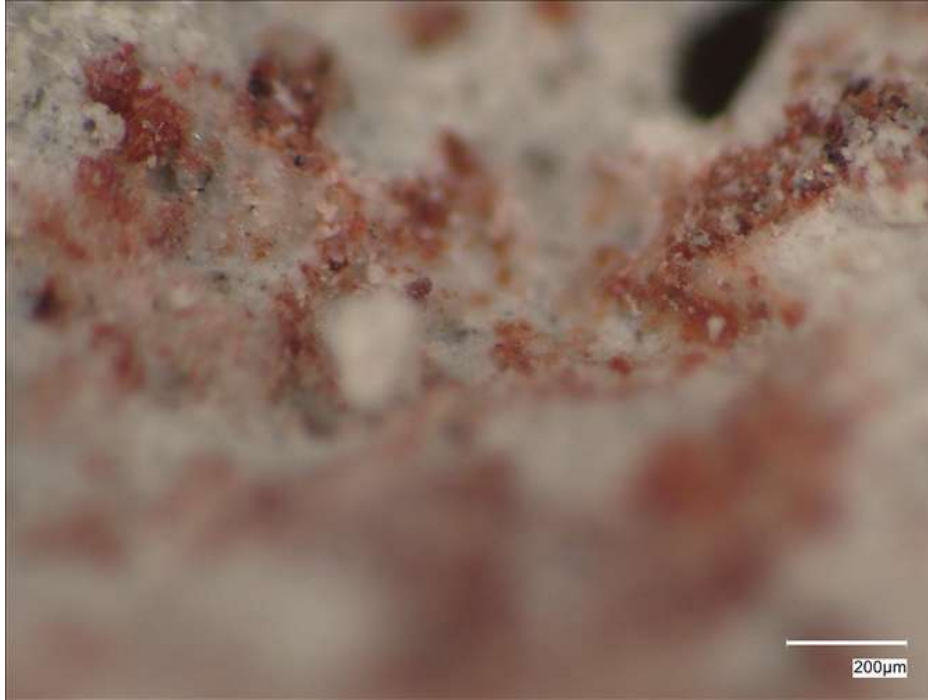


Fig. 42. Imagen microscópica de la superficie de la zona 2 de la combinación 2 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.

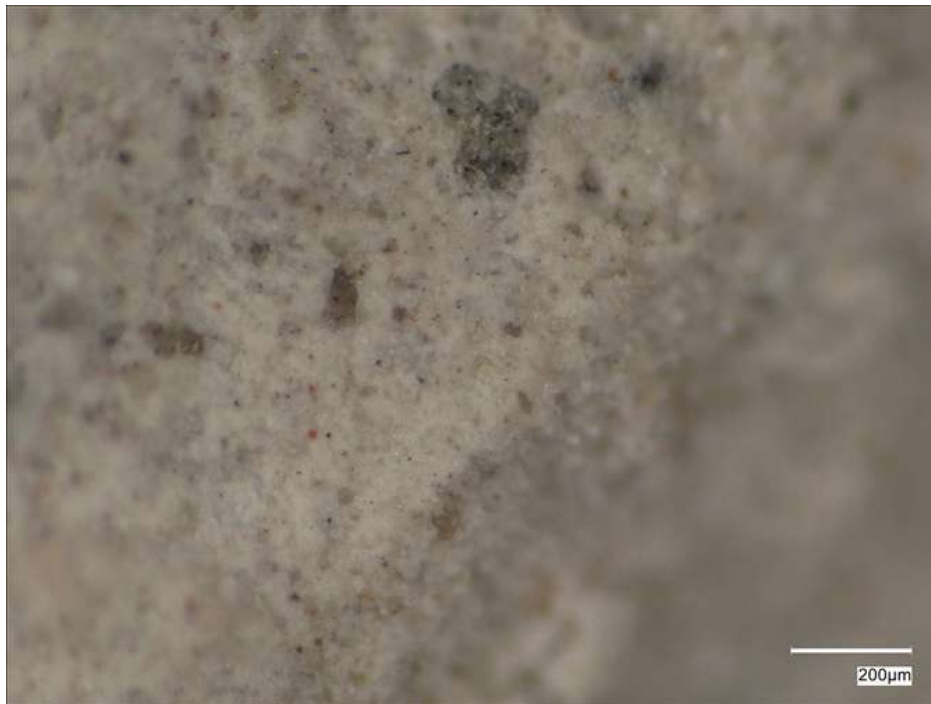


Fig. 43. Imagen microscópica de la superficie de la zona 3 de la combinación 2 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.



Fig. 44. Imagen microscópica de la superficie de la zona 1 de la combinación 3 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.

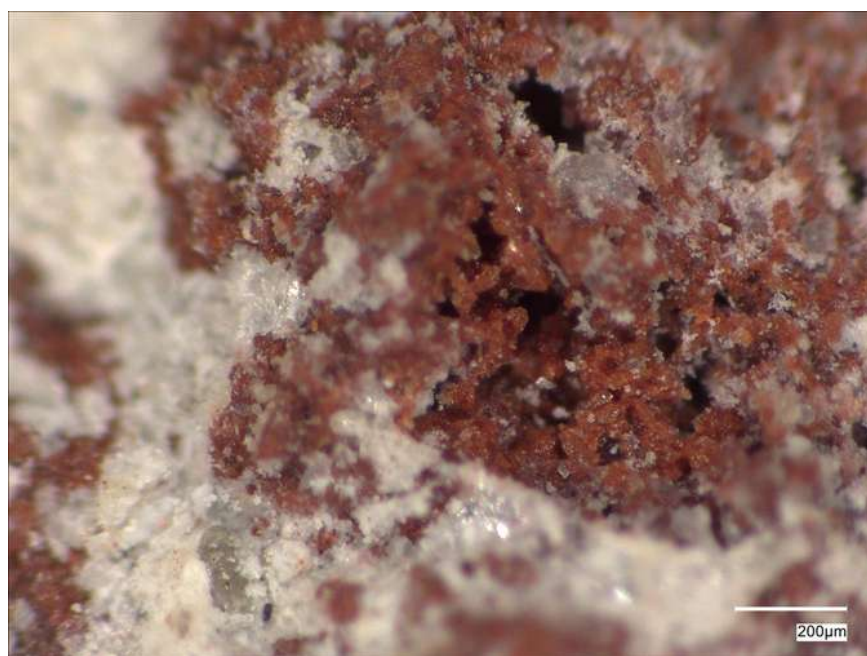


Fig. 45. Imagen microscópica de la superficie de la zona 2 de la combinación 3 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.



Fig. 46. Imagen microscópica de la superficie de la zona 3 de la combinación 3 analizada con el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series. Fuente: elaboración propia.

4.5. Composición química

La composición química de los arrecifes artificiales constituye un factor fundamental en su desempeño ecológico, ya que determina la interacción entre el sustrato artificial y los organismos marinos que lo colonizan. A diferencia de las estructuras marinas convencionales, los AA deben favorecer procesos de asentamiento biológico, calcificación y sucesión ecológica, por lo que su diseño químico debe ser compatible con las condiciones naturales del ambiente marino (Baine, 2001; Perkol-Finkel & Sella, 2014).

La composición química está estrechamente relacionada con la durabilidad y la resistencia del arrecife artificial frente a condiciones ambientales agresivas, como la salinidad, el oleaje y los ciclos de humectación y secado. Un diseño químico adecuado permite mantener la integridad estructural del material a largo plazo sin comprometer su función ecológica, lo cual resulta esencial para que los arrecifes artificiales cumplan su papel en la mitigación de la erosión costera y la restauración de ecosistemas marinos (Burt et al., 2009).

Con el objetivo de mejorar la compatibilidad química, se incorporaron materiales ricos en carbonato de calcio a las mezclas de concreto para AA (aragonita y piedra caliza). Estos materiales presentan una composición mineral similar a la de los arrecifes naturales, dominada por carbonato de calcio en forma de aragonita, lo que favorece la aceptación del sustrato por parte de los organismos marinos (Moberg & Folke, 1999). Además, la disponibilidad local de calcio es un factor clave tanto para los procesos de calcificación coralina como para el desarrollo de algas coralinas incrustantes (Allemand et al., 2011).

El análisis de la composición química de las muestras de concreto se realizó mediante un sistema de análisis elemental basado en microscopía con láser, utilizando un equipo KEYENCE EA-300 VHX Series, cuyo principio de detección se basa en la espectroscopía de plasma inducido por láser (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS). Esta técnica permite identificar, de manera cualitativa y semicuantitativa, los elementos químicos presentes en la superficie del material mediante la interacción de pulsos láser de alta energía con la muestra.

Previo al análisis, las muestras de concreto fueron acondicionadas mediante limpieza superficial para eliminar partículas sueltas, polvo y otros contaminantes que pudieran interferir con la lectura elemental. Posteriormente, las muestras se colocaron en la platina del microscopio, asegurando una fijación y una alineación correctas para garantizar la reproducibilidad de las mediciones. Además, una de las muestras de la combinación 3 fue sumergida en agua salada durante un mes.

Durante el análisis, el sistema LIBS emite pulsos láser que inciden sobre la superficie del concreto, lo que genera un microplasma mediante ablación localizada del material. La radiación emitida por este plasma es recolectada y analizada por el espectrómetro del equipo, lo que permite identificar los elementos químicos presentes a partir de sus líneas espectrales características. El análisis se realizó en tres distintas zonas de cada muestra, analizando veinticinco puntos en cada zona, esto con el fin de evaluar la homogeneidad de la composición química y reducir el efecto de variaciones locales propias del material, siendo los resultados los siguientes:

4.5.1. Resultados de la composición química de la combinación 1

- Zona 1

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 1 de la combinación 1 se expresan en la Tabla 31, así mismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 47:

Tabla 31. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 1 de la combinación 1.

	Si	C	O	Mg	Al	Ca	Fe
μ	5.0%	4.0%	40.6%	0.0%	0.0%	34.4%	0.0%
σ	19.8%	5.6%	25.0%	0.0%	0.0%	23.5%	0.0%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (40.6% en promedio) y calcio (34.4% en promedio).

En el apéndice 1 se complementa el porcentaje de composición química de cada punto analizado. Se muestran tres tablas por cada combinación, correspondientes a tres zonas de cada espécimen, para un total de 10 tablas, considerando un último espécimen sumergido en agua salada con el objetivo de observar su composición tras una hidratación posterior a la prueba de compresión, esto comprende de la Tabla 41 a la Tabla 50.

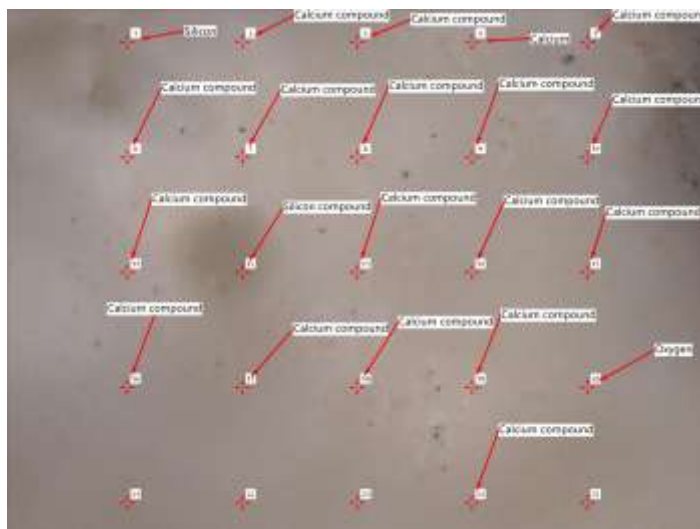


Fig. 47. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 1, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

- Zona 2

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 2 de la combinación se expresan en la Tabla 32; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 48:

Tabla 32. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 2 de la combinación 1.

	O	Ca	Si	C	Mg	Al	Fe
μ	66.8%	16.3%	9.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
σ	21.7%	12.9%	6.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (66.8% en promedio) y calcio (16.3% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

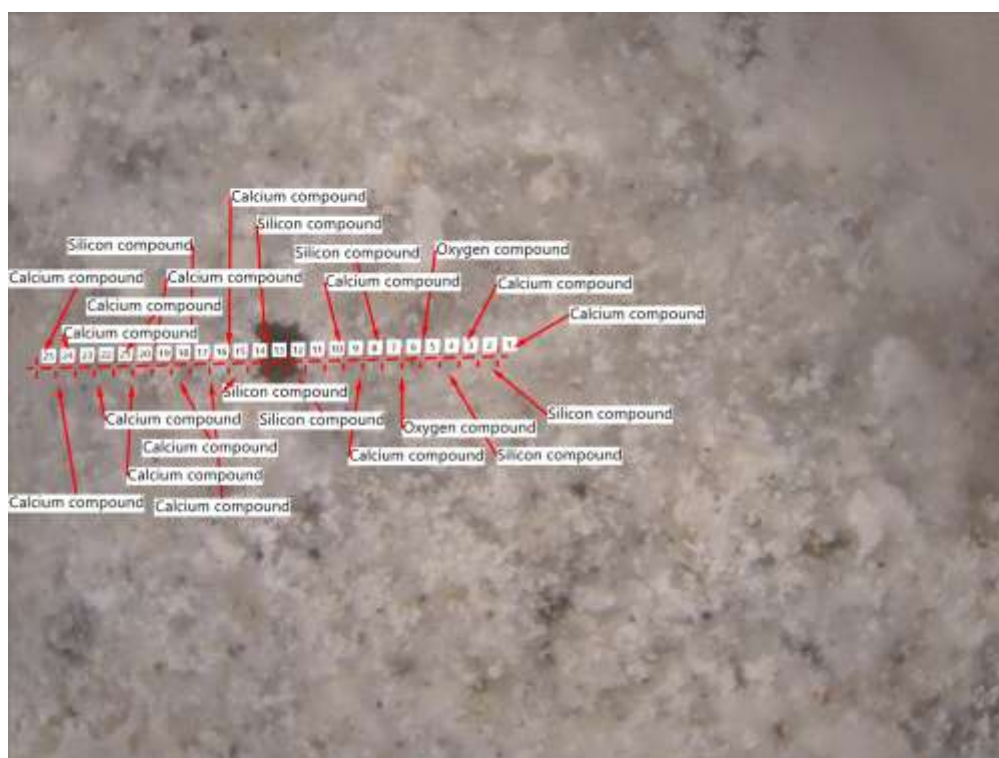


Fig. 48. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 2 de la combinación 1, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

- Zona 3

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 3 de la combinación 1 se expresan en la Tabla 33; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 49:

Tabla 33. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 3 de la combinación 1.

	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe	Na
μ	66.0%	18.5%	0.0%	0.0%	1.5%	10.8%	2.8%	0.4%
σ	12.9%	9.9%	0.0%	0.0%	4.2%	12.4%	5.2%	0.9%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (66.0% en promedio) y sílice (18.5% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.



Fig. 49. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 3 de la combinación 1, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Resultados de la composición química de la combinación 2

- Zona 1

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 1 de la combinación 2 se expresan en la Tabla 34; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 50:

Tabla 34. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 1 de la combinación 2.

	O	Ca	C	Mg	Al	Si	Fe
μ	50.1%	39.4%	9.7%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%
σ	9.9%	9.3%	7.7%	0.0%	0.0%	3.9%	0.0%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (50.1% en promedio) y calcio (39.4% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

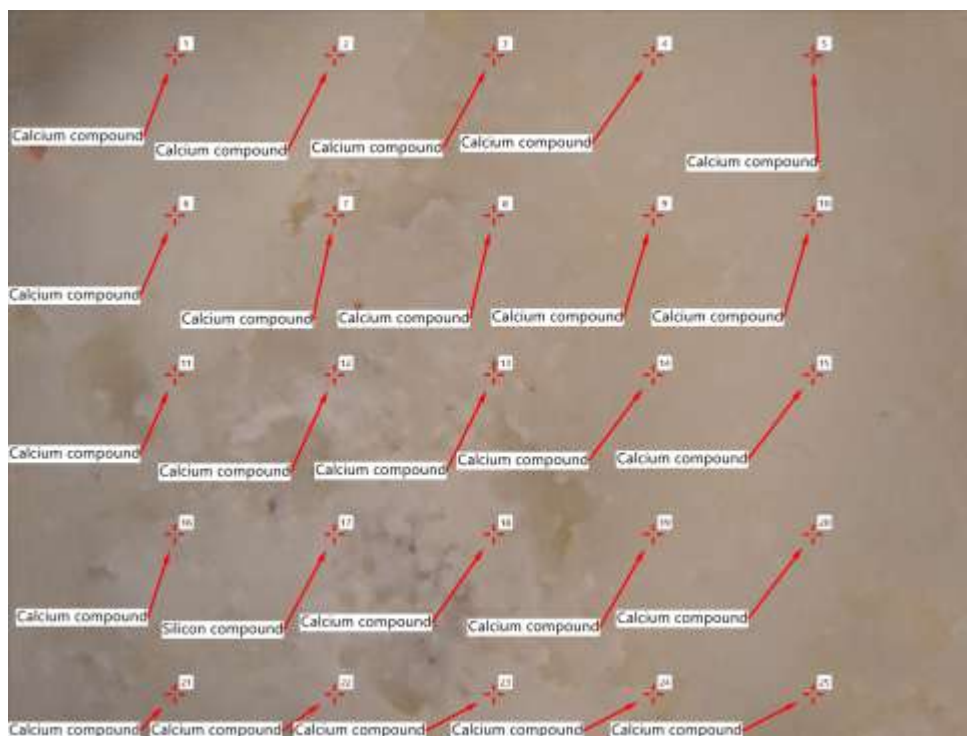


Fig. 50. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 2, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

- Zona 2

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 2 de la combinación 2 se expresan en la Tabla 35; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 51:

Tabla 35. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 2 de la combinación 2.

	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe
μ	65.5%	29.7%	0.0%	0.3%	0.0%	3.6%	0.8%
σ	23.5%	24.9%	0.0%	1.6%	0.0%	9.8%	2.9%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (65.5% en promedio) y sílice (29.7% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

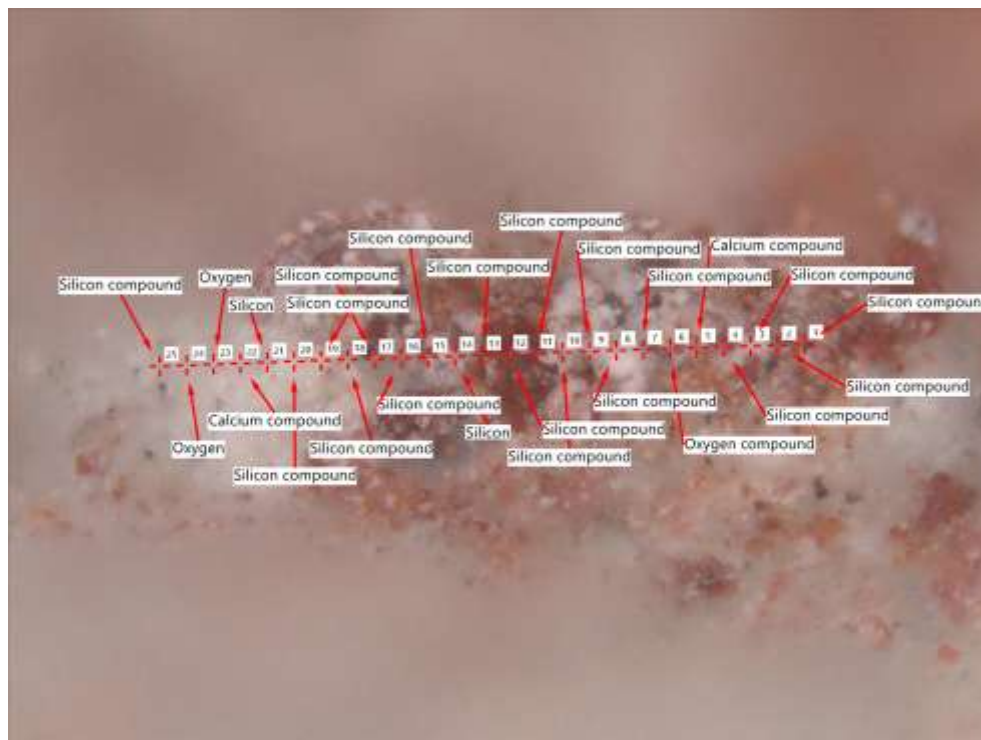


Fig. 51. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 2 de la combinación 2, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

- Zona 3

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 3 de la combinación 2 se expresan en la Tabla 36; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 52:

Tabla 36. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 3 de la combinación 2.

	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe
μ	61.5%	8.6%	1.8%	0.0%	0.0%	16.0%	0.0%
σ	26.8%	8.0%	3.8%	0.0%	0.0%	13.9%	0.0%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (61.5% en promedio) y calcio (16.0% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

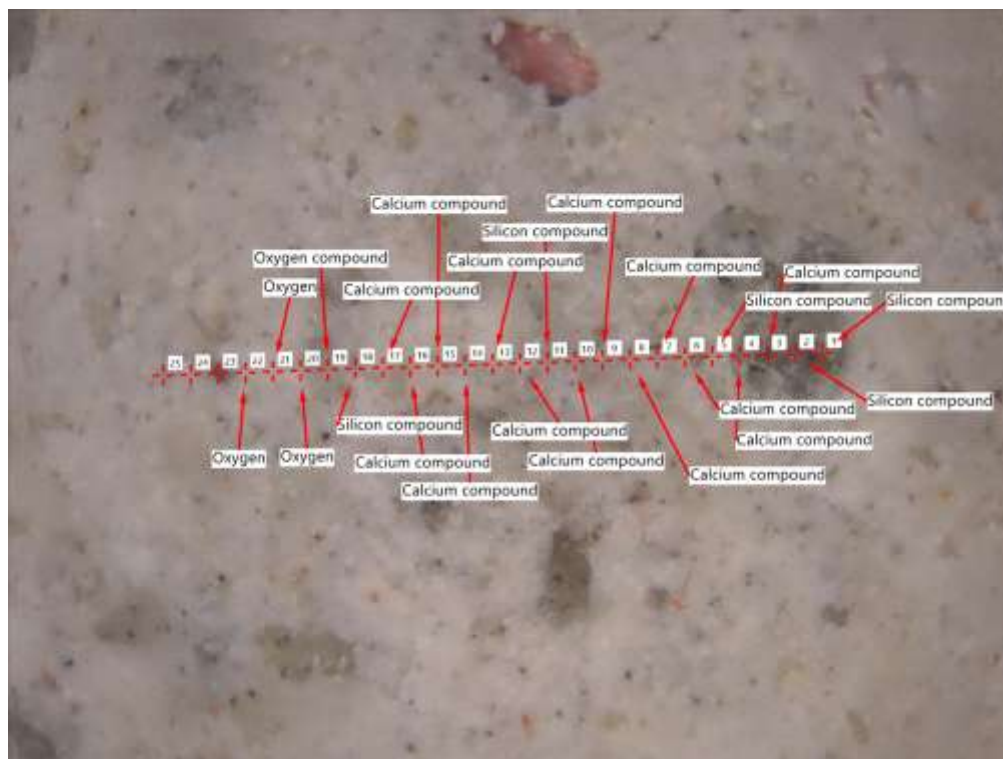


Fig. 52. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 3 de la combinación 2, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Composición química de combinación 3

- Zona 1

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 1 de la combinación 3 se expresan en la Tabla 37; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 53:

Tabla 37. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 1 de la combinación 3.

	O	C	Si	Mg	Al	Ca	Fe
μ	66.5%	1.8%	11.3%	0.0%	0.0%	20.5%	0.0%
σ	11.9%	4.4%	7.1%	0.0%	0.0%	13.6%	0.0%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (66.5% en promedio) y calcio (20.5% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

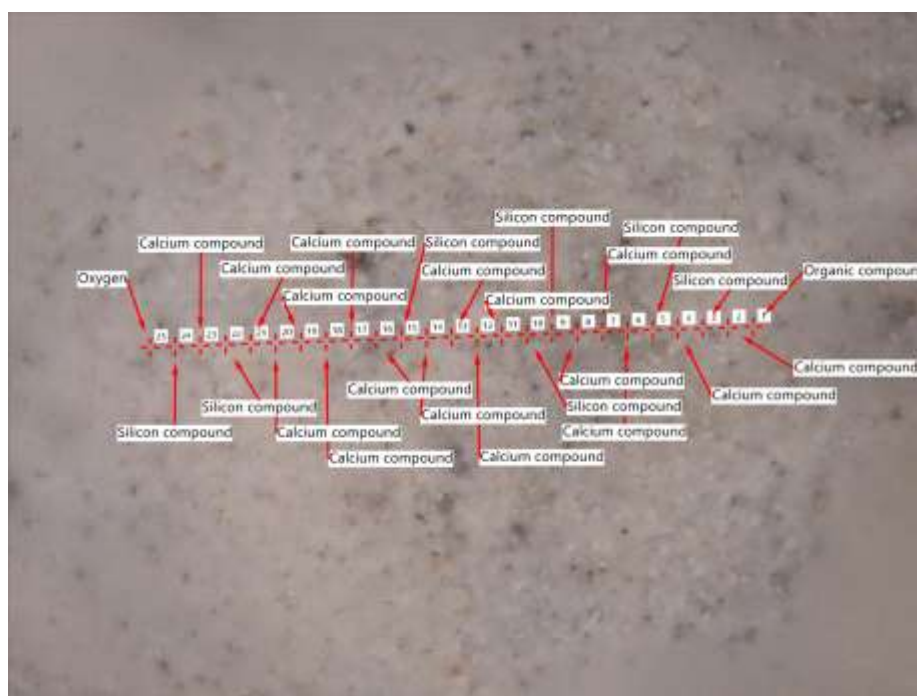


Fig. 53. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 3, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

- Zona 2

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 2 de la combinación 3 se expresan en la Tabla 38; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 54:

Tabla 38. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 2 de la combinación 3.

	Si	C	O	Mg	Al	Ca	Fe
μ	41.0%	1.4%	49.0%	0.3%	0.0%	4.8%	3.7%
σ	30.0%	4.6%	28.2%	1.3%	0.0%	9.7%	8.9%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (49.0% en promedio) y sílice (41.0% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

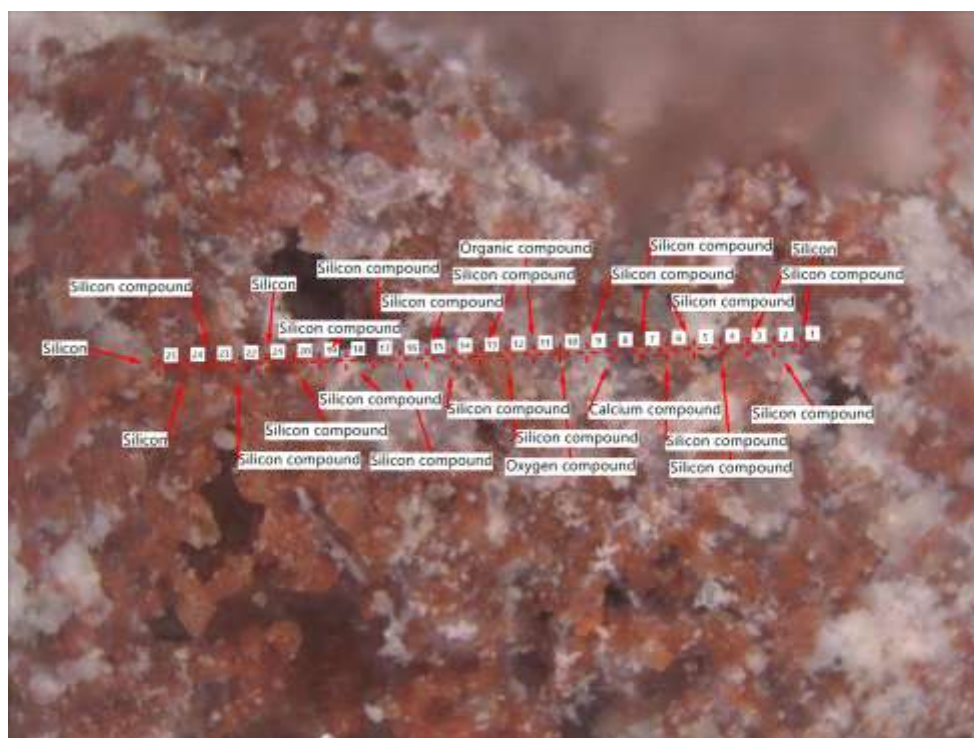


Fig. 54. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 2 de la combinación 3, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

- Zona 3

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la zona 3 de la combinación 3 se expresan en la Tabla 39; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 55:

Tabla 39. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química de los 25 puntos analizados en la zona 3 de la combinación 3.

	O	Ca	Si	C	Mg	Al	Fe
μ	42.1%	33.5%	0.8%	3.7%	0.0%	0.0%	0.0%
σ	26.9%	22.5%	3.8%	6.6%	0.0%	0.0%	0.0%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (42.1% en promedio) y calcio (33.5% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

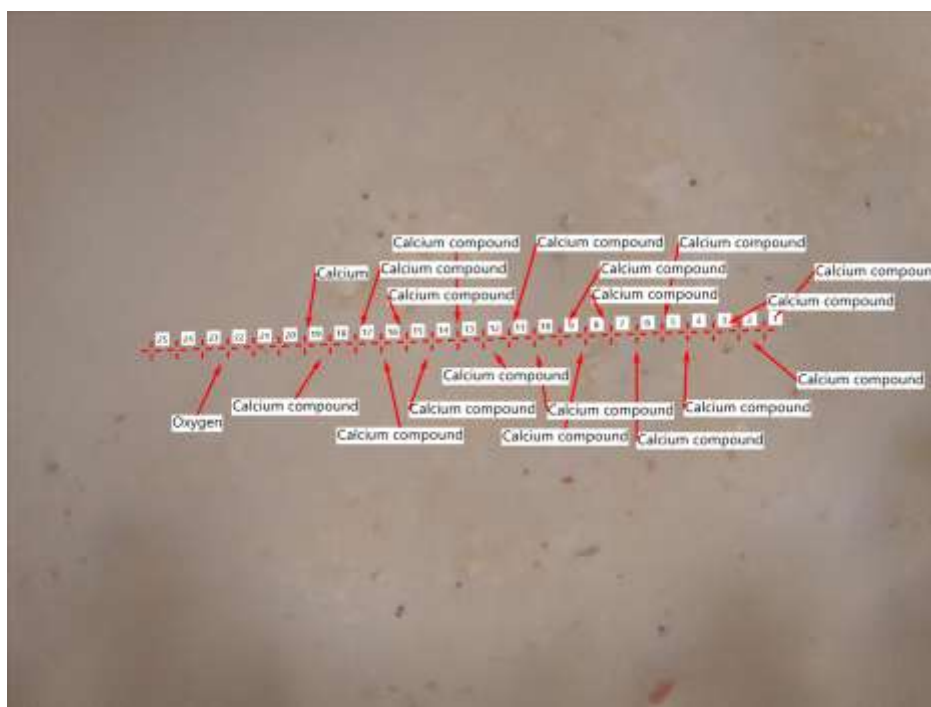


Fig. 55. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 3 de la combinación 3, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

4.5.4. Resultados de la composición química de la combinación 3 sumergida en agua salada

El promedio y desviación estándar de la composición química de los veinticinco puntos analizados en la combinación 3 sumergida en agua salada se expresan en la Tabla 40; asimismo, la distribución de los puntos analizados se aprecia en la Fig. 56:

Tabla 40. Promedio y desviación estándar de los porcentajes de la composición química en los puntos analizados de la combinación 3 sumergida en agua salada.

	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	H
μ	1.2%	23.7%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	0.0%	23.9%
σ	4.0%	37.6%	0.0%	0.0%	0.0%	5.5%	0.0%	39.5%

Siendo conformado en su mayor parte por oxígeno (23.7% en promedio) e hidrógeno (23.9% en promedio).

Revisar el apéndice 1 para ver el porcentaje de composición en cada punto.

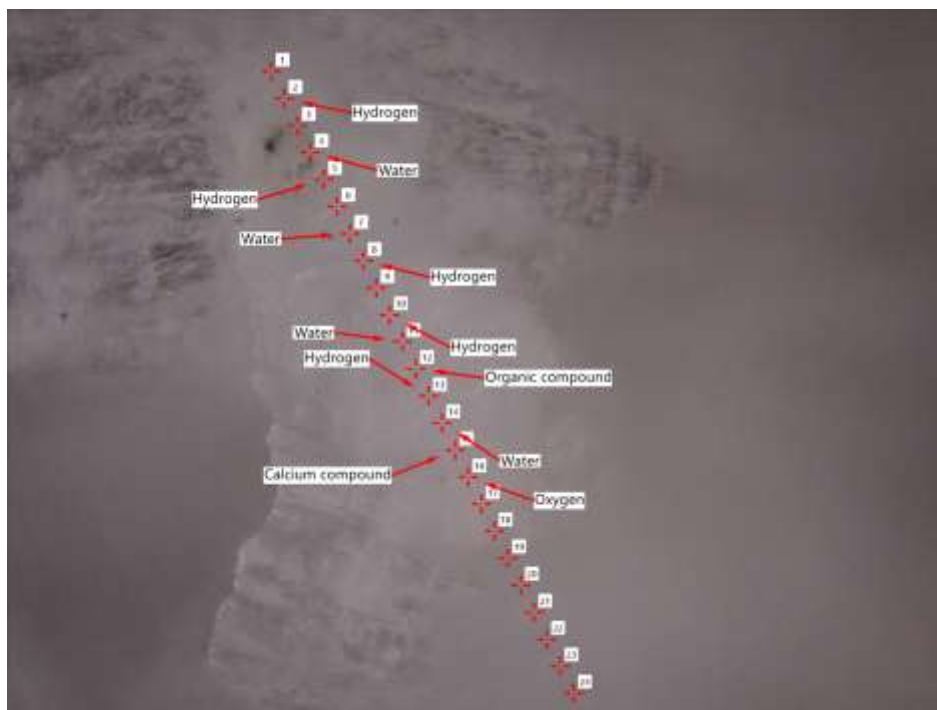


Fig. 56. Distribución de los puntos de análisis de la composición química en la zona 1 de la combinación 3 sumergida en agua salada, obtenida mediante microscopía con láser (LIBS), en la que se identifican los compuestos predominantes. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Este estudio permitió validar la viabilidad técnica del uso de agregados no convencionales (aragonita, tezontle y caliza) en el diseño de mezclas de concreto para la construcción de arrecifes artificiales. Tras el análisis integral de las propiedades mecánicas y químicas de las tres dosificaciones evaluadas, se concluye que es posible desarrollar un material que armonice las exigencias de resistencia estructural con las condiciones de bioreceptividad necesarias para el entorno marino.

En términos de desempeño mecánico, se determinó que la proporción de los agregados es el factor determinante de la estabilidad del concreto. La combinación 3, integrada por un 25% de cada material, alcanzó la mayor resistencia promedio a la compresión con 132.16 kg/cm². Este valor no solo supera a las combinaciones con la mayor concentración de un solo agregado, sino que también demuestra que la sinergia entre la porosidad del tezontle, la densidad de la caliza y la composición química de la aragonita favorece la formación de una matriz cementante robusta, capaz de soportar las cargas hidrodinámicas y el impacto del oleaje en zonas costeras vulnerables.

La fiabilidad de estos resultados se ve respaldada por el análisis estadístico, en el que se concluye que la homogeneidad de la mezcla es tan crítica como su resistencia. La baja desviación estándar confirma que el diseño propuesto garantiza la repetibilidad y uniformidad de las propiedades físicas en una producción a escala, reduciendo el riesgo de fallas estructurales aleatorias en los módulos arrecifales.

Desde una perspectiva química y ecológica, el estudio concluye que los materiales seleccionados ofrecen una ventaja competitiva frente al concreto convencional. El pH obtenido de 8.82, sumado al alto contenido de carbonato de calcio aportado por la aragonita y la caliza, proporciona un sustrato químicamente afín al de los arrecifes naturales. Esta compatibilidad es esencial para incentivar la fijación de larvas de coral y el crecimiento de organismos calcificadores, transformando la infraestructura de una simple barrera física contra la erosión en un ecosistema funcional y resiliente.

Finalmente, esta investigación establece un precedente en la ingeniería de materiales aplicada a la restauración costera. Se ha demostrado que el uso de materiales

alternativos no solo es una respuesta técnica eficiente ante la degradación de los litorales, sino también una solución sostenible que aprovecha recursos locales para mitigar los efectos del cambio climático y proteger tanto la biodiversidad marina como la integridad socioeconómica de las comunidades costeras.

Apéndice 1

Tabla 41. Resultados de la composición química de la combinación 1, zona 1. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	Si	C	O	Mg	Al	Ca	Fe
1	Silicon	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Calcium compound	4.7%	11.5%	42.9%	0.0%	0.0%	40.9%	0.0%
3	Calcium compound	0.0%	11.1%	51.1%	0.0%	0.0%	37.8%	0.0%
4	Calcium	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%
5	Calcium compound	0.0%	15.1%	47.0%	0.0%	0.0%	37.9%	0.0%
6	Calcium compound	0.0%	10.0%	51.5%	0.0%	0.0%	38.5%	0.0%
7	Calcium compound	0.0%	13.1%	45.6%	0.0%	0.0%	41.3%	0.0%
8	Calcium compound	0.0%	8.7%	48.6%	0.0%	0.0%	42.7%	0.0%
9	Calcium compound	0.0%	0.0%	50.6%	0.0%	0.0%	49.4%	0.0%
10	Calcium compound	0.0%	0.0%	52.3%	0.0%	0.0%	47.7%	0.0%
11	Calcium compound	0.0%	8.6%	55.4%	0.0%	0.0%	36.0%	0.0%
12	Silicon compound	19.6%	15.0%	50.2%	0.0%	0.0%	15.2%	0.0%
13	Calcium compound	0.0%	7.6%	55.5%	0.0%	0.0%	36.9%	0.0%
14	Calcium compound	0.0%	0.0%	55.4%	0.0%	0.0%	44.6%	0.0%
15	Calcium compound	0.0%	0.0%	56.1%	0.0%	0.0%	43.9%	0.0%
16	Calcium compound	0.0%	0.0%	54.2%	0.0%	0.0%	45.8%	0.0%
17	Calcium compound	0.0%	0.0%	50.7%	0.0%	0.0%	<u>49.3%</u>	0.0%
18	Calcium compound	0.0%	0.0%	53.9%	0.0%	0.0%	46.1%	0.0%
19	Calcium compound	0.0%	0.0%	44.7%	0.0%	0.0%	55.3%	0.0%
20	Oxygen	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	Calcium compound	0.0%	0.0%	49.9%	0.0%	0.0%	50.1%	0.0%
25		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 42. Resultados de la composición química de la combinación 1, zona 2. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe
1	Silicon compound	50.9%	49.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Silicon compound	51.0%	49.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	Silicon compound	48.4%	51.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Silicon compound	75.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	Calcium compound	69.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	31.0%	0.0%
6	Oxygen compound	88.7%	11.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
7	Silicon compound	73.3%	26.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	Silicon compound	61.1%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	26.4%	0.0%
9	Silicon compound	49.8%	29.3%	0.0%	8.2%	0.0%	0.0%	12.7%
10	Silicon compound	67.4%	24.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%
11	Silicon compound	63.6%	36.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	Silicon compound	68.8%	31.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
13	Silicon compound	74.1%	25.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	Silicon	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
15	Silicon compound	68.2%	31.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
16	Silicon compound	85.6%	14.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
17	Silicon compound	80.5%	19.5%	0.0%	0.0%	0.0%	<u>0.0%</u>	0.0%
18	Silicon compound	72.6%	27.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19	Silicon compound	73.7%	26.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	Silicon compound	75.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	Silicon	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Calcium compound	61.2%	6.3%	0.0%	0.0%	0.0%	32.5%	0.0%
23	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25	Silicon compound	79.3%	20.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 43. Resultados de la composición química de la combinación 1, zona 3. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe
1	Silicon compound	78.7%	21.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Silicon compound	69.9%	30.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	Calcium compound	46.0%	10.7%	0.0%	0.0%	0.0%	43.3%	0.0%
4	Calcium compound	55.1%	7.4%	8.7%	0.0%	0.0%	28.8%	0.0%
5	Silicon compound	51.6%	24.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24.4%	0.0%
6	Calcium compound	65.3%	7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	27.4%	0.0%
7	Calcium compound	61.6%	7.1%	11.8%	0.0%	0.0%	19.5%	0.0%
8	Calcium compound	71.9%	7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	20.8%	0.0%
9	Calcium compound	57.3%	7.0%	9.5%	0.0%	0.0%	26.2%	0.0%
10	Calcium compound	65.0%	5.2%	7.1%	0.0%	0.0%	22.7%	0.0%
11	Silicon compound	68.3%	11.7%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	0.0%
12	Calcium compound	62.9%	4.2%	9.1%	0.0%	0.0%	23.8%	0.0%
13	Calcium compound	66.1%	9.3%	0.0%	0.0%	0.0%	24.6%	0.0%
14	Calcium compound	60.0%	10.4%	0.0%	0.0%	0.0%	29.6%	0.0%
15	Calcium compound	70.2%	3.9%	0.0%	0.0%	0.0%	25.9%	0.0%
16	Calcium compound	63.0%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	27.0%	0.0%
17	Calcium compound	57.0%	6.4%	0.0%	0.0%	0.0%	<u>36.6%</u>	0.0%
18	Silicon compound	77.0%	23.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19	Oxygen compound	90.7%	9.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 44. Resultados de la composición química de la combinación 2, zona 1. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	Ca	C	Mg	Al	Si	Fe
1	Calcium compound	55.0%	45.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Calcium compound	58.9%	41.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	Calcium compound	41.7%	45.3%	13.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Calcium compound	50.6%	32.1%	17.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	Calcium compound	39.5%	46.7%	13.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	Calcium compound	57.0%	43.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
7	Calcium compound	60.1%	39.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	Calcium compound	52.2%	35.5%	12.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
9	Calcium compound	44.5%	40.5%	15.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	Calcium compound	46.5%	40.0%	13.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	Calcium compound	64.9%	35.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	Calcium compound	60.8%	39.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
13	Calcium compound	54.3%	30.1%	15.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	Calcium compound	38.7%	41.5%	19.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
15	Calcium compound	37.1%	46.0%	16.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
16	Calcium compound	52.4%	47.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
17	Silicon compound	80.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	<u>19.7%</u>	0.0%
18	Calcium compound	46.9%	41.0%	12.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19	Calcium compound	38.2%	41.7%	20.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	Calcium compound	44.3%	39.8%	15.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	Calcium compound	51.1%	48.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Calcium compound	49.0%	43.3%	7.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23	Calcium compound	46.8%	38.8%	14.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	Calcium compound	45.6%	34.9%	19.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25	Calcium compound	36.5%	47.1%	16.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 45. Resultados de la composición química de la combinación 2, zona 2. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe
1	Silicon compound	50.9%	49.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Silicon compound	51.0%	49.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	Silicon compound	48.4%	51.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Silicon compound	75.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	Calcium compound	69.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	31.0%	0.0%
6	Oxygen compound	88.7%	11.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
7	Silicon compound	73.3%	26.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	Silicon compound	61.1%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	26.4%	0.0%
9	Silicon compound	49.8%	29.3%	0.0%	8.2%	0.0%	0.0%	12.7%
10	Silicon compound	67.4%	24.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%
11	Silicon compound	63.6%	36.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	Silicon compound	68.8%	31.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
13	Silicon compound	74.1%	25.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	Silicon	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
15	Silicon compound	68.2%	31.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
16	Silicon compound	85.6%	14.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
17	Silicon compound	80.5%	19.5%	0.0%	0.0%	0.0%	<u>0.0%</u>	0.0%
18	Silicon compound	72.6%	27.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19	Silicon compound	73.7%	26.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	Silicon compound	75.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	Silicon	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Calcium compound	61.2%	6.3%	0.0%	0.0%	0.0%	32.5%	0.0%
23	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25	Silicon compound	79.3%	20.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 46. Resultados de composición química de la combinación 2, zona 3. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	Si	C	Mg	Al	Ca	Fe
1	Silicon compound	78.7%	21.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Silicon compound	69.9%	30.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	Calcium compound	46.0%	10.7%	0.0%	0.0%	0.0%	43.3%	0.0%
4	Calcium compound	55.1%	7.4%	8.7%	0.0%	0.0%	28.8%	0.0%
5	Silicon compound	51.6%	24.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24.4%	0.0%
6	Calcium compound	65.3%	7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	27.4%	0.0%
7	Calcium compound	61.6%	7.1%	11.8%	0.0%	0.0%	19.5%	0.0%
8	Calcium compound	71.9%	7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	20.8%	0.0%
9	Calcium compound	57.3%	7.0%	9.5%	0.0%	0.0%	26.2%	0.0%
10	Calcium compound	65.0%	5.2%	7.1%	0.0%	0.0%	22.7%	0.0%
11	Silicon compound	68.3%	11.7%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	0.0%
12	Calcium compound	62.9%	4.2%	9.1%	0.0%	0.0%	23.8%	0.0%
13	Calcium compound	66.1%	9.3%	0.0%	0.0%	0.0%	24.6%	0.0%
14	Calcium compound	60.0%	10.4%	0.0%	0.0%	0.0%	29.6%	0.0%
15	Calcium compound	70.2%	3.9%	0.0%	0.0%	0.0%	25.9%	0.0%
16	Calcium compound	63.0%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	27.0%	0.0%
17	Calcium compound	57.0%	6.4%	0.0%	0.0%	0.0%	<u>36.6%</u>	0.0%
18	Silicon compound	77.0%	23.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19	Oxygen compound	90.7%	9.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 47. Resultados de la composición química de la combinación 3, zona 1. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	C	Si	Mg	Al	Ca	Fe
1	Organic compound	77.0%	16.1%	6.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Calcium compound	43.2%	8.8%	7.2%	0.0%	0.0%	40.8%	0.0%
3	Silicon compound	61.1%	0.0%	38.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Calcium compound	48.9%	0.0%	8.9%	0.0%	0.0%	42.2%	0.0%
5	Silicon compound	54.7%	0.0%	15.9%	0.0%	0.0%	29.4%	0.0%
6	Calcium compound	57.8%	13.4%	10.2%	0.0%	0.0%	18.6%	0.0%
7	Calcium compound	68.5%	0.0%	7.2%	0.0%	0.0%	24.3%	0.0%
8	Calcium compound	62.3%	0.0%	8.9%	0.0%	0.0%	28.8%	0.0%
9	Silicon compound	79.6%	0.0%	20.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	Silicon compound	82.6%	0.0%	17.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	Calcium compound	62.5%	0.0%	7.6%	0.0%	0.0%	29.9%	0.0%
12	Calcium compound	61.7%	6.3%	6.6%	0.0%	0.0%	25.4%	0.0%
13	Calcium compound	59.9%	0.0%	12.2%	0.0%	0.0%	27.9%	0.0%
14	Calcium compound	66.3%	0.0%	10.0%	0.0%	0.0%	23.7%	0.0%
15	Silicon compound	66.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	20.7%	0.0%
16	Calcium compound	64.1%	0.0%	8.2%	0.0%	0.0%	27.7%	0.0%
17	Calcium compound	60.5%	0.0%	8.5%	0.0%	0.0%	<u>31.0%</u>	0.0%
18	Calcium compound	64.8%	0.0%	7.3%	0.0%	0.0%	27.9%	0.0%
19	Calcium compound	64.1%	0.0%	7.8%	0.0%	0.0%	28.1%	0.0%
20	Calcium compound	62.7%	0.0%	9.5%	0.0%	0.0%	27.8%	0.0%
21	Calcium compound	65.6%	0.0%	6.2%	0.0%	0.0%	28.2%	0.0%
22	Silicon compound	83.4%	0.0%	16.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23	Calcium compound	59.6%	0.0%	10.9%	0.0%	0.0%	29.5%	0.0%
24	Silicon compound	84.0%	0.0%	16.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 48. Resultados de la composición química de la combinación 3, zona 2. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	Si	C	O	Mg	Al	Ca	Fe
1	Silicon	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Silicon compound	65.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	34.9%
3	Silicon compound	51.1%	0.0%	48.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Silicon compound	44.1%	0.0%	55.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	Silicon compound	47.5%	0.0%	33.8%	0.0%	0.0%	0.0%	18.7%
6	Silicon compound	41.6%	0.0%	37.1%	0.0%	0.0%	0.0%	21.3%
7	Silicon compound	51.5%	0.0%	48.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	Calcium compound	7.5%	15.4%	46.3%	0.0%	0.0%	30.8%	0.0%
9	Silicon compound	14.9%	0.0%	67.5%	0.0%	0.0%	17.6%	0.0%
10	Oxygen compound	10.1%	0.0%	89.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	Organic compound	4.8%	18.5%	76.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	Silicon compound	37.2%	0.0%	39.5%	6.7%	0.0%	0.0%	16.6%
13	Silicon compound	43.0%	0.0%	57.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	Silicon compound	15.0%	0.0%	85.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
15	Silicon compound	30.2%	0.0%	69.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
16	Silicon compound	16.4%	0.0%	60.0%	0.0%	0.0%	23.6%	0.0%
17	Silicon compound	13.2%	0.0%	63.0%	0.0%	0.0%	<u>23.8%</u>	0.0%
18	Silicon compound	15.4%	0.0%	61.2%	0.0%	0.0%	23.4%	0.0%
19	Silicon compound	16.8%	0.0%	83.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	Silicon compound	25.0%	0.0%	75.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	Silicon	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Silicon compound	38.3%	0.0%	61.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23	Silicon compound	35.5%	0.0%	64.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	Silicon	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25	Silicon	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 49. Resultados de la composición química de la combinación 3, zona 3. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]						
No.	Presumed material	O	Ca	Si	C	Mg	Al	Fe
1	Calcium compound	42.2%	38.4%	19.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Calcium compound	37.5%	51.5%	0.0%	11.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	Calcium compound	39.7%	46.2%	0.0%	14.1%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Calcium compound	44.7%	40.2%	0.0%	15.1%	0.0%	0.0%	0.0%
5	Calcium compound	34.3%	48.1%	0.0%	17.6%	0.0%	0.0%	0.0%
6	Calcium compound	42.7%	39.0%	0.0%	18.3%	0.0%	0.0%	0.0%
7	Calcium compound	45.3%	39.5%	0.0%	15.2%	0.0%	0.0%	0.0%
8	Calcium compound	63.0%	37.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
9	Calcium compound	64.0%	36.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	Calcium compound	67.3%	32.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	Calcium compound	56.9%	43.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	Calcium compound	69.1%	30.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
13	Calcium compound	62.3%	37.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	Calcium compound	56.8%	43.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
15	Calcium compound	57.6%	42.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
16	Calcium compound	53.3%	46.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
17	Calcium compound	59.0%	41.0%	0.0%	0.0%	0.0%	<u>0.0%</u>	0.0%
18	Calcium compound	56.0%	44.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19	Calcium	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	Oxygen	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 50. Resultados de la composición química de la combinación 3 sumergida en agua salada. Fuente: elaboración propia.

Multi-point analysis		[wt%]							
No.	Presumed material	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	H
1		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	Hydrogen	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
3		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	Water	0.0%	83.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	16.4%
5	Hydrogen	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
6		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
7	Water	0.0%	79.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.2%
8	Hydrogen	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
9		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	Hydrogen	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
11	Water	0.0%	88.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	11.1%
12	Organic compound	11.7%	79.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.5%
13	Hydrogen	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
14	Water	0.0%	81.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	18.3%
15	Calcium compound	16.6%	56.1%	0.0%	0.0%	0.0%	27.3%	0.0%	0.0%
16	Oxygen	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
17		0.0%	0.0%	0.0%	<u>0.0%</u>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
18		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
19		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Referencias

Albalawi, H. I., Khan, Z. N., Valle-Pérez, A. U., Kahin, K. M., Hountondji, M., Alwazani, H., ... & Hauser, C. A. (2021). Sustainable and eco-friendly coral restoration through 3D printing and fabrication. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(37), 12634-12645.

Allemand, D., Tambutté, É., Zoccola, D., & Tambutté, S. (2011a). Coral calcification, cells to reefs. En *Coral reefs: an ecosystem in transition* (pp. 119-150). Springer.

Allemand, D., Tambutté, É., Zoccola, D., & Tambutté, S. (2011b). Coral calcification, cells to reefs. *Coral Reefs*, 30(4), 883–895. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0797-0>

Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: Region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1669), 3019–3025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0339>

American Concrete Institute. (2019). *ACI manual of concrete practice*. American Concrete Institute.

American Concrete Institute. (2023a). *ACI PRC-211.5-14: Guide for Submittal of Concrete Proportions*. American Concrete Institute.

American Concrete Institute. (2023b). *ACI PRC-211.5-14: Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials* (Reapproved 2023). American Concrete Institute.

Ardisson, P. L., May-Kú, M. A., Herrera-Dorantes, M. T., & Arellano-Guillermo, A. (2011). El sistema arrecifal mesoamericano-méxico: Consideraciones para su designación como zona marítima especialmente sensible. *Hidrobiológica*, 21(3), 261-280.

ASTM International. (2005). *ASTM C39/C39M-05: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.

ASTM International. (2006). *ASTM C136-06: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International.

ASTM International. (2011). *ASTM C617: Standard practice for capping cylindrical concrete specimens*. ASTM International.

ASTM International. (2013). *ASTM C42/C42M: Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete*. ASTM International.

ASTM International. (2014). *ASTM E4: Practices for force verification of testing machines*. ASTM International.

ASTM International. (2015). *ASTM C1231/C1231M: Standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders*. ASTM International.

ASTM International. (2017). *ASTM C127-07: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. ASTM International.

Baine, M. (2001). Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Management*, 44(3–4), 241–259. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00048-5)

Barbhuiya, S., Nepal, J., & Das, B. B. (2023). Properties, compatibility, environmental benefits and future directions of limestone calcined clay cement (LC3) concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 79, 107794.

Berman, O., Weizman, M., Oren, A., Neri, R., Parnas, H., Shashar, N., & Tarazi, E. (2023). Design and application of a novel 3D printing method for bio-inspired artificial reefs. *Ecological Engineering*, 188, 106892.

Boukhelf, F., Sebaibi, N., Boutouil, M., Yoris-Nobile, A. I., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D., Real-Gutierrez, C., Herbert, R. J. H., Greenhill, S., Reis, B., Franco, J. N., Borges, M. T., Sousa-Pinto, I., Van Der Linden, P., Gómez, O. B., Meyer, H. S., Almada, E., Stafford, R., Danet, V., . . . Hall, A. E. (2022). On the Properties Evolution of Eco-Material Dedicated to Manufacturing Artificial Reef via 3D Printing: Long-Term Interactions of Cementitious Materials in the Marine Environment. *Sustainability*, 14(15), 9353. <https://doi.org/10.3390/su14159353>

- Burt, J., Bartholomew, A., Bauman, A., Saif, A., & Sale, P. F. (2009). Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 373(1), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2009.03.009>
- Campos, J. A. (2019). Arrecifes artificiales. *Tecnología en Marcha*, 7(1), 25–28.
- Castillo-Chinchilla, M., Piedra-Castro, L., Pereira Chaves, J. M., & Sierra Sierra, L. (2024). Acciones de mitigación y adaptación ante la erosión costera de playas arenosas del Caribe Sur, Costa Rica. *Investigaciones geográficas*, (115).
- Ceccarelli, D. M., McLeod, I. M., Boström-Einarsson, L., Bryan, S. E., Chartrand, K. M., Emslie, M. J., Bay, L. K. (2020). Substrate stabilisation and small structures in coral restoration: State of knowledge, and considerations for management and implementation. *PloS one*, 15(10), e0240846.
- Céplamar. (2015). *Countries possessing artificial reefs* [Mapa]. Centre Européen des Produits de la Mer.
- Chávez, V., Lithgow, D., Losada, M., & Silva-Casarin, R. (2021). Coastal green infrastructure to mitigate coastal squeeze. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(1), 7.
- Córdova, M. H., & Falcón, M. R. (2020). Erosión costera: Factor de riesgo para la comunidad pesquera de la barra de tupilco. *Emerging Trends in Education*, 8(24), 4.
- Donini, H. (2021). Los procesos de erosión costera en playa Unión. *Párrafos Geográficos*, 20(2), 20-50.
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoidi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5, 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Filip. (2018). *Arrecife degradado en Quintana Roo, México* [Fotografía].

Gallegos-Rojano, I. Z., Salazar, A., & Martínez-Rodríguez, M. C. (2022). Sistema arrecifal mesoamericano: daños por cambio climático y encallamientos. *Revista Tecnología en Marcha*, 35(1), 140-150.

Higgins, E., Metaxas, A., & Scheibling, R. E. (2022). A systematic review of artificial reefs as platforms for coral reef research and conservation. *PLoS One*, 17(1), e0261964.

Huang, X., Wang, Z., Liu, Y., Hu, W., & Ni, W. (2016). On the use of blast furnace slag and steel slag in the preparation of green artificial reef concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.088>

Irawan, H., Yude, R., Suhana, M. P., Suryanti, A., Kurniawan, D., Zahra, A., ... & Syakti, A. D. (2019, noviembre). Assembled concrete reefs as a stand for coral transplantation on the seabed. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 348, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.

Kalam, M. A., Mieno, T., & Casareto, B. E. (2018). Development of Artificial Reefs Using Environmentally Safe Ceramic Material. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 08(01). <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000253>

Kim, T., Kwon, Y., Lee, J., Lee, E., & Kwon, S. (2022). Wave attenuation prediction of artificial coral reef using machine-learning integrated with hydraulic experiment. *Ocean Engineering*, 248, 110324.

Kuang, W., Pavlenko, P., Guo, H., Tian, K., Liu, H., Zhou, Z., Duan, Y., & Shi, X. (2025). Utilization of Machine-Made Sand Waste in 3D-Printed Ecological Concrete for Artificial Reefs. *Case Studies in Construction Materials*, e04494. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04494>

Lee, S., Park, J., & Chen, Y. (2025). Artificial reef substrate complexity and its ecological implications for habitat restoration. *Ecological Engineering*, 192, 106982.

Levenstein, M. A., Marhaver, K. L., Quinlan, Z. A., Tholen, H. M., Tichy, L., Yus, J., ... & Wagoner Johnson, A. J. (2022). Composite substrates reveal inorganic material cues for coral larval settlement. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(12), 3960-3971.

- Manohar, S., Bala, K., Santhanam, M., & Menon, A. (2020). Characteristics and deterioration mechanisms in coral stones used in a historical monument in a saline environment. *Construction and Building Materials*, 241, 118102.
- Matus, I. V., Alves, J. L., Góis, J., Vaz-Pires, P., & da Rocha, A. B. (2024). Artificial reefs through additive manufacturing: a review of their design, purposes and fabrication process for marine restoration and management. *Rapid Prototyping Journal*, 30(11), 87-122.
- Mendoza, E., Ríos, A., Mariño-Tapia, I., & Silva, R. (2019). Modular coral shaped artificial reefs acting as beach protection barriers. En *Coastal Structures* (pp. 989-997). Bundesanstalt für Wasserbau.
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), 215–233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Moreno, E. I. (2006). Determinación del pH de la solución de poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Revista de Ingeniería*, 10(3), 5–12.
- Muzaki, F. K., Hanifa, R., Akhwady, R., Saptarini, D., & Buharianto, B. (2019). Growth rate of *Acropora muricata* coral fragments transplanted on dome-shaped concrete artificial reef with different composition. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(6).
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5.^a ed.). Pearson Education.
- Nguyen, T., Alvarez, J., & Brooks, M. (2025). Evaluation of low-carbon cementitious composites in marine environments for artificial reef applications. *npj Materials Degradation*, 9(1), 1–14.
- Odériz, I., Mendoza, E., Leo, C., Santoyo, G., Silva, R., Martínez, R., Grey E. & López, R. (2014). An Alternative Solution to Erosion Problems at Punta Bete-Punta Maroma, Quintana Roo, Mexico: Conciliating Tourism and Nature. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 71*, 75–85.
- Paxton, A. B., Shertzer, K. W., Bacheler, N. M., Kellison, G. T., Riley, K. L., & Taylor, J. C. (2020). Meta-analysis reveals artificial reefs can be effective tools for fish community enhancement but are not one-size-fits-all. *Frontiers in Marine Science*, 7, 282.

Pérez-Briceño, P. M., & Rodríguez, O. G. L. (2021). Erosión costera y estabilidad de playas en Limón, Mar Caribe, Costa Rica. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, (1), 96-110.

Perkol-Finkel, S., & Sella, I. (2014). Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: Innovative matrices and designs. *From Sea to Shore—Meeting the Challenges of the Sea*, 113–123.

Perkol-Finkel, S., Shashar, N., & Benayahu, Y. (2006). Can artificial reefs mimic natural reef communities? The roles of structural features and age. *Marine Environmental Research*, 61(2), 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2005.08.001>

Perry, C. T., de Bakker, D. M., Webb, A. E. et al. (2025). Reduced Atlantic reef growth past 2 °C warming amplifies sea-level impacts. *Nature*, 646, 619–626. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09439-4>

Pimienta Martínez, S. H. (2023). *Erosión costera en las playas de Riohacha-La Guajira y su relación con la construcción de espolones*. [Tesis/Documento].

Quijano, A. (2024). *Colonia sana de coral en el Banco de Campeche, México* [Fotografía].

Restrepo, J. C., Otero, L., Henao, A., Herrera, E., & Osorio, A. (2012). Erosión Costera en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. *Entorno Ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo* (pp. 95-107). Unidad de Parques Nacionales Naturales.

Ricaurte-Villota, C., Santamaría-del-Ángel, E., Coca-Domínguez, O., Giraldo, D. M., & González-Arteaga, M. (2021). Factores determinantes de la amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, (1), 129-139.

Richiardi, M. (2024). Coastal Processes and Erosion: Protecting Shoreline Ecosystems. *Journal of Earth Science & Climatic Change*.

Rodríguez, E. (2025, 11 de diciembre). Playas del Caribe Mexicano en riesgo: Reportan pérdidas de arena por alta erosión costera. *PorEsto!* <https://www.poresto.net/quintana>

[roo/2024/1/15/playas-del-caribe-mexicano-en-riesgo-reportan-perdidas-de-arena-por-alta-erosion-costera-417852.html](https://www.gob.mx/roo/2024/1/15/playas-del-caribe-mexicano-en-riesgo-reportan-perdidas-de-arena-por-alta-erosion-costera-417852.html)

Rodríguez-Martínez, R. E., Ruíz-Rentería, F., van Tussenbroek, B., Barba-Santos, G., Escalante-Mancera, E., Carreón-Palau, L., & Jordán-Dahlgren, E. (2010). Environmental state of coastal lagoons and beaches in the Mexican Caribbean under the influence of rapid coastal development. *Scientific Reports*, 1(1), 1-14.

Romero, J. G. (1998). Arrecifes artificiales: Estructuras llenas de vida. *Informes de la Construcción*, 50(458), 5-16.

Rupasinghe, M., Nicolas, R. S., Lanham, B. S., & Morris, R. L. (2023). Sustainable oyster shell incorporated artificial reef concrete for living shorelines. *Construction and Building Materials*, 410, 134217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134217>

Sammarco, P. W., Lirette, A., Tung, Y. F., Boland, G. S., Genazzio, M., & Sinclair, J. (2014). Coral communities on artificial reefs in the Gulf of Mexico: standing vs. toppled oil platforms. *ICES Journal of Marine Science*, 71(2), 417-426.

Santander, L. C., Mejía, M. L., Ortiz, L. M. M., & Jiménez, O. G. (2012). Evaluación del impacto ambiental de arrecifes artificiales para uso turístico en Cozumel, México. *Investigación y Ciencia*, 20(56), 18-26.

Secretaría de Economía. (2010). *NMX-C-156-ONNCCE-2010: Industria de la construcción — Determinación del revenimiento en concretos hidráulicos — Método de ensayo*. ONNCCE.

Secretaría de Economía. (2017). *NMX-C-414-ONNCCE-2017: Industria de la construcción — Cementos hidráulicos — Especificaciones y métodos de prueba*. ONNCCE.

Secretaría de Economía. (2019). *NMX-C-163-ONNCCE-2019: Industria de la construcción — Determinación de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico*. ONNCCE.

- Sheppard, C., Dixon, D., Gourlay, M., Sheppard, A., & Payet, R. (2005). Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2–3), 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.02.016>
- Silva, R., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., ... & Govaere, G. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 71*, 1-16.
- Silva, R., Mendoza, E., Mariño-Tapia, I., Martínez, M. L., & Escalante, E. (2016). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 75*, 467-471. <https://doi.org/10.2112/SI75-094.1>
- Smithsonian National Museum of Natural History. (s. f.). *Ocean Portal*. Smithsonian Institution. <https://ocean.si.edu/>
- Subramani, S., Fernández, F., Dos Santos, A. J., del Rio, M., & López, O. (2019). Efectos de la humedad en la calcita natural, aragonita y portlandita de las piedras de cal de construcción. *Anales de Edificación*, 5(1), 66-71.
- Tarazi, E., Parnas, H., Lotan, O., Zoabi, M., Oren, A., Josef, N., & Shashar, N. (2019). Nature-centered design: how design can support science to explore ways to restore coral reefs. *The Design Journal*, 22(sup1), 1619-1628.
- Valle, A. I. A., Zapata, C. A. M., Noboa, J. P. B., & Robalino, D. H. H. (2024). Estudio exploratorio de piedra pómez como agregado en la producción de concretos ligeros. *Polo del Conocimiento*, 9(1), 860-871.
- Xu, Q., Ji, T., Yang, Z., & Ye, Y. (2019). Steel rebar corrosion in artificial reef concrete with sulphoaluminate cement, sea water and marine sand. *Construction and Building Materials*, 227, 116685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116685>
- Zhang, W., Lee, M. W., & An, S. (2019). Sustainable construction and demolition waste management in Shanghai: A comparative analysis. *Construction and Building Materials*, 221, 320–330.