

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Evaluación de estructuras geodésicas sostenibles para viviendas de
interés social en Costa Rica**

Proyecto de Graduación

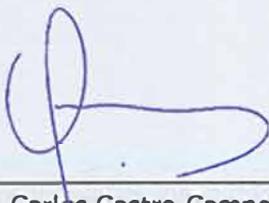
Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

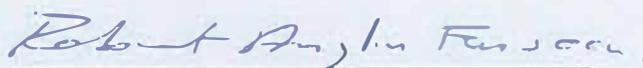
Esteban Cordero Soto

Director de Proyecto de Graduación:

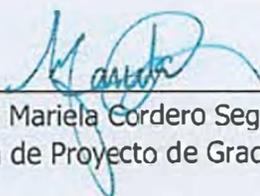
Ing. Carlos Castro Campos



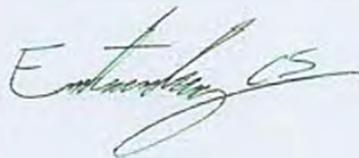
Ing. Carlos Castro Campos
Director de Proyecto de Graduación



Ing. Robert Anglin Fonseca
Asesor Proyecto de Graduación



Ing. Mariela Cordero Segura
Asesora de Proyecto de Graduación



Esteban Cordero Soto
Autor de Proyecto de Graduación

Derechos de autor

Fecha: 2022, Julio, 24

El suscrito, Esteban José Cordero Soto, cédula 1-1671-0292, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con numero de carné **B52181**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Evaluación de estructuras geodésicas sostenibles para viviendas de interés social en Costa Rica**, bajo la Dirección del Ing. Carlos Castro Campos, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos No 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

Dedico este Trabajo Final de Graduación a mis padres

Agradecimientos

A mis padres por haberme dado la oportunidad de realizar estos estudios y apoyarme incondicionalmente en mis proyectos personales.

A mi comité asesor, compuesto por el Ing. Carlos Campos Castro, Ing. Mariela Cordero Segura y el Ing. Robert Anglin Fonseca, por su disponibilidad y participación en este proyecto y sobre todo por el buen trato que siempre recibí.

Al Ing. Juan Tuk Durán por sus consejos y especialmente a Adrián y Álvaro de Domo Bida, por su amabilidad y ayuda brindada. Al Arq. Víctor Montero por su disposición y ayuda brindada.

Quiero agradecer también a Ashley Javogue de Zegreenlab, por su disposición y amabilidad para atenderme y por su labor pionera en la construcción con cáñamo en Costa Rica. A la Ing. Verónica Ortiz de Fundebambú por su interés en el proyecto y voluntad de promover el uso de materiales sostenibles en la construcción.

Agradezco a Don Emmanuel Lafaye y Joshua Lafaye por sus valores e interés en el proyecto y sobretodo su voluntad de redirigir la construcción hacia un modelo más sostenible.

Índice General

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1 El problema específico	1
1.1.2 Importancia	2
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3. Delimitación del problema	5
1.3.1 Alcance	5
1.3.2 Limitaciones.....	5
1.4. Metodología.....	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Hipótesis	8
2.2 Sostenibilidad y construcción sostenible.....	8
2.3 Cambio climático.....	9
2.4 Materiales de bajo impacto	10
2.5 Arquitectura pasiva y bioclimática	10
2.6 Normativa e instituciones competentes.....	11
2.6.2. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.....	11
2.6.3. Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo.....	12
2.6.4. Banco Hipotecario de la Vivienda	12
2.6.5. Reglamento de construcciones y Directriz N° 27	12
2.7 Proyectos de vivienda de interés social en Costa Rica	16

2.8	Sistemas de concreto prefabricado.....	17
2.9	Estructuras geodésicas.....	18
CAPÍTULO 3. MATERIALES DE USO POTENCIAL.....		29
3.1	Materiales utilizados a nivel internacional.....	29
3.1.1	Huella ambiental	33
3.1.2	Ventajas y desventajas	35
3.2	Materiales de uso potencial a nivel nacional	39
3.2.1	Costo	42
3.3	Selección de materiales	44
CAPÍTULO 4. MODELO DESARROLLADO		48
4.1	Diseño arquitectónico.....	48
4.2	Análisis estructural preliminar	60
4.3	Diseño bioclimático	70
4.3.1	Cámara de aire	70
4.3.2	Dispositivos de sombramiento fijos	71
4.3.3	Disipación por abertura.....	72
4.3.4	Ventilación natural.....	73
4.3.5	Aislamiento térmico con materiales resistivos	73
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD ECONÓMICA.....		75
5.1	Selección de método de evaluación de sostenibilidad.....	75
5.2	Análisis de sostenibilidad	76
5.3	Análisis económico	78
5.4	Comparación de resultados.....	79
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		81
6.1	Conclusiones	81

6.2	Recomendaciones	82
	Referencias bibliográficas	84
	Anexo 1: Esquema de piezas del domo.....	- 1 -

Índice de Figuras

Figura 1. Metodología propuesta	7
Figura 2. Pilares de la sostenibilidad	8
Figura 3. Vivienda de interés social en proyecto El Porvenir en Batán, Limón.....	17
Figura 4. Construcción de domo geodésico en Jena, Alemania.....	18
Figura 5. Casa domo de R. B. Fuller en Carbondale, Illinois, EUA	19
Figura 6. Análisis geométrico de red truncable con frecuencia 3 (cotas en metros).....	20
Figura 7. Detalle de recubrimiento y cimentación.....	21
Figura 8. Vivienda unifamiliar geodésica autosuficiente en Yecla, Murcia, España.....	22
Figura 9. Distribución espacial de vivienda geodésica en Yecla	22
Figura 10. Sección transversal y longitudinal de vivienda geodésica en Yecla	23
Figura 11. Unión entre triángulos por simple contacto (Tipo GoodKarma).....	23
Figura 12. Detalle de primer anillo de la cúpula	24
Figura 13. Anclaje típico de la estructura geodésica con el tambor de concreto.....	24
Figura 14. Renderización de domo geodésico en biocerámica de Geoship.....	26
Figura 15. Vista en planta y lateral de domo de biocerámica de Geoship	26
Figura 16. Domo geodésico de bambú en Gujarat, India	28
Figura 17. Bloque de cáñamo CANNABRIC	30
Figura 18. Filtro de cáñamo en rollo CANNABRIC	31
Figura 19. Morteros de cal Ibercal y Morcem.....	32
Figura 20. Etiquetado ambiental de producto Morcem Cal Base	34
Figura 21. Vista interior de vivienda construida con cáñamo en Costa Rica	40
Figura 22. Precios de referencia promedio para madera en pie, en troza y aserrada.....	42
Figura 23. Diagrama de revestimiento de la vivienda geodésica.....	46

Figura 24. Colocación de primera capa de corcho proyectado en domo geodésico ubicado en Santa Ana, Costa Rica	46
Figura 25. Ejemplo de aleros de bambú en construcción	47
Figura 26. Distribución arquitectónica del primer nivel (cotas en metros).....	48
Figura 27. Parámetros de diseño utilizados en el programa Acidome.....	49
Figura 28. Resultados obtenidos del programa Acidome.....	50
Figura 29. Esquema de triangulo 1 (cotas en milímetros)	51
Figura 30. Esquema de triangulo 2 (cotas en milímetros)	51
Figura 31. Esquema de triangulo 3 (cotas en milímetros)	52
Figura 32. Esquema de triangulo 4 (cotas en milímetros)	52
Figura 33. Esquema de triangulo 5 (cotas en milímetros)	53
Figura 34. Esquema de triangulo 6 (cotas en milímetros)	53
Figura 35. Modelo generado en el programa Acidome.....	54
Figura 36. Vista en planta del mezanine (sin escala)	54
Figura 37. Vista Frontal del modelo	57
Figura 38. Vista trasera del modelo	57
Figura 39. Vista superior del modelo.....	58
Figura 40. Vista lateral derecha del modelo.....	58
Figura 41. Vista lateral izquierda del modelo	59
Figura 42. Vista en corte del mezanine	59
Figura 43. Vista en corte de las paredes internas del modelo.....	60
Figura 44. Coeficientes de presión externa para techos en forma de domo.....	61
Figura 45. Ductilidades globales asignadas para estructuras tipo otros	65
Figura 46. Aceleración pico efectiva de diseño.....	66
Figura 47. Factor espectral dinámico para sitios con cimentación tipo S_3 en zona sísmica III	67

Figura 48. Cargas temporales unitarias mínimas	69
Figura 49. Diagrama de cámara de aire en ventanería	71
Figura 50. Ejemplo de elemento de sombramiento fijo	71
Figura 51. Ejemplo de flujo de aire por abertura.....	72
Figura 52. Detalle de tragaluz en la cúpula del domo	72
Figura 53. Índice de efectividad de ventilación para distintos modelos de ventana	73
Figura 54. Capacidad de atenuación del ciclo de temperatura exterior de diversos materiales	74

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de materiales investigados	35
Cuadro 2. Especies de madera certificadas disponibles en Costa Rica.....	39
Cuadro 3. Especies de bambú disponibles en Costa Rica	40
Cuadro 4. Precio de impermeabilizantes acrílicos de Promatico	43
Cuadro 5. Áreas de la distribución arquitectónica del modelo.....	55
Cuadro 6. Verificación de relación de área de ventanería del modelo.....	56
Cuadro 7. Parámetros geométricos del modelo para el análisis de viento.....	61
Cuadro 8. Resumen de cargas permanentes.....	68
Cuadro 9. Resumen de cargas gravitacionales	69
Cuadro 10. Huella de carbono de vivienda geodésica	76
Cuadro 11. Emisiones de CO ₂ producidas por el transporte de la madera de pino certificada	77
Cuadro 12. Presupuesto de materiales de construcción de la vivienda geodésica.....	78
Cuadro 13. Porcentaje de participación de cada material sobre el valor total	79
Cuadro 14. Comparación de huellas de carbono de VIS geodésica con VIS prefabricada.....	79
Cuadro 15. Comparación de costo de VIS geodésica con VIS prefabricada.....	80

Cordero Soto, Esteban

Evaluación de estructura geodésicas sostenibles para viviendas de interés social en Costa Rica
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R:

E. Cordero S., 2022

vii, 88, [4]h; ils. col. – 46 refs.

RESUMEN

El cambio climático puede ser considerado como el mayor desafío de la humanidad en el Siglo XXI, y la industria de la construcción tiene gran parte de la responsabilidad al generar más de un tercio de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. La urgencia de dirigir la industria hacia un enfoque de sostenibilidad ambiental es cada vez mayor y de ahí radica la importancia de construir modelos de infraestructura que verdaderamente prioricen la disminución del impacto ambiental sobre el beneficio económico, con el único objetivo de asegurar el bienestar social y natural a largo plazo.

En la presente investigación se indagó sobre distintos materiales de construcción de bajo impacto que se utilizan a nivel internacional para la construcción de estructuras geodésicas, con el fin de encontrar alternativas locales que pudieran incluirse en el diseño de proyectos de vivienda de interés social y que sean económicamente viables. Se reveló que a pesar de que Costa Rica cuenta con la disponibilidad de materiales naturales como la madera y el bambú, la realidad es que la oferta de materiales de bajo impacto es escasa y la mayoría de los mismos no cuentan con certificación energética o declaración de huella de carbono.

Posteriormente se generó un modelo sostenible de vivienda de interés social utilizando estructuras geodésica y materiales de bajo impacto, en su mayoría locales. Se evaluó el impacto ambiental del modelo mediante un análisis de huella de carbono de materiales, comparándolo con un modelo convencional de concreto prefabricado de dimensiones similares. Finalmente se realizó un cálculo aproximado del costo del nuevo modelo y se comparó con el tope máximo del Bono Familiar de Vivienda ordinario, concluyendo en que este lo sobrepasa.

EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS GEODESICAS SOSTENIBLES PARA VIVIENDAS DE INETERES SOCIAL EN COSTA RICA

Ing. Carlos Castro Campos

Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

1.1.1 El problema específico

Si bien es cierto que Costa Rica presenta el menor déficit habitacional de América Latina y el Caribe, según un estudio publicado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el 2012, la realidad es que en la actualidad la demanda de vivienda en el país sigue insatisfecha. En el 2011, se reportó un déficit habitacional del 13,8% representando un total de 170 116 familias que no cuentan con un techo bajo el cual habitar, viven en un espacio en mal estado o sufren de hacinamiento (Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, 2011).

Datos más recientes muestran que este porcentaje disminuyó a 11,5% en los siguientes siete años, gracias a políticas de asistencia social como el Bono Familiar de Vivienda (BFV) y el crédito del Sistema Financiero Nacional para la Vivienda (SFNV), que han permitido a familias de escasos recursos económicos, tener acceso a una vivienda digna (MIVAH, 2018).

Además de lo anterior, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2020), el porcentaje de la población en pobreza extrema aumentó en 1,8 puntos porcentuales respecto al 2019, reflejando el impacto de la crisis sanitaria ocasionada por la pandemia de Covid-19 en los ingresos per cápita de los hogares. Esto aumenta la dificultad que enfrentan familias de escasos recursos económicos al momento de solicitar créditos de vivienda y se traduce en un aumento en la demanda de subsidios como el BFV.

Las viviendas de interés social (VIS), debido a su naturaleza de bajo costo, se han construido históricamente en el país utilizando materiales convencionales como acero y concreto. Factores como la sostenibilidad y la inclusión de las familias en el proceso constructivo de la vivienda, pocas veces son tomados en cuenta. El cemento es el elemento principal en la constitución del concreto, y su impacto ambiental es evidente. Alrededor del 5% de las emisiones globales antropogénicas de CO₂, son producto de la industria cementera (Battelle Memorial Institute, 2002). Además, si se suma a esto la importante cantidad de agua utilizada para su fabricación, control de las emisiones de polvo al aire, el enfriamiento de los gases procedentes de los hornos, y las actividades mineras para la obtención de materias primas como piedra caliza, arcilla y otros agregados, es indudable que no es un material sostenible.

Los proyectos de bienestar social en el país se construyen, en la mayoría de los casos, con elementos prefabricados de concreto, y se conceptualizaron bajo modelos estandarizados que no consideran la totalidad de las particularidades climáticas y sociales de su ubicación.

1.1.2 Importancia

La industria de la construcción es responsable del 38% de las emisiones globales de CO₂, lo que contribuye significativamente a la inminente amenaza del cambio climático. De aquí radica la necesidad de conceptualizar modelos constructivos sostenibles que verdaderamente incorporen materiales de bajo impacto y demuestren su viabilidad social y económica (United Nations Environment Programme, 2020).

Los domos geodésicos en madera u otros materiales como el bambú, podrían representar una solución alternativa al problema social de vivienda, sin dejar de lado los factores de confort, sostenibilidad, seguridad y economía. Lo anterior gracias a algunas de sus ventajas como: disminución de los tiempos de instalación en comparación con sistemas constructivos tradicionales de construcción, reducción de costos en materiales debido al bajo peso de sus elementos, geometría aerodinámica con alta resistencia sísmica y optimización del uso de energía (Zhivotov & Pastukh, 2020).

Este nuevo concepto de vivienda de interés social permitiría, gracias a que se puede prescindir de mano de obra especializada, incluir a las familias en el proceso constructivo, considerando a la persona como verdadero usuario y gestor de su espacio vital y no solo como consumidor final.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

Las primeras políticas de vivienda en Costa Rica tienen origen en los años cuarenta, previo a la creación del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) en 1954, esta última nace como institución autónoma encargada de velar por la participación del estado en la solución del problema de vivienda que afecta a familias de escasos recursos. La cobertura de esta problemática se amplía con la creación del SFNV y del Banco Hipotecario de la Vivienda (BANHVI) en 1986, este último definido como "banco de segundo piso", ya que no presta recursos directamente, sino que los dispone a través de entidades autorizadas.

En ese mismo año, gracias a la Ley 7055, Ley General de Presupuestos Ordinarios y Extraordinarios de la República, se establece el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH), institucionalizando el tema de la vivienda formalmente (Martínez, 2018).

En el año 2014 se origina en el país la primera norma técnica de diseño, construcción y operación sostenible llamada Requisitos para Edificios Sostenibles en el Trópico (RESET), desarrollada por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), con base en un documento elaborado por el Instituto de Arquitectura Tropical (El Financiero, 2015).

Reyes (2019) desarrolló un procedimiento sistemático de diseño sostenible de una vivienda de interés social, utilizando el método japonés del despliegue de la función de calidad (QFD, por sus siglas en inglés) en conjunto con el Modelo Kano. En su trabajo demuestra la utilidad y el potencial de este método, para identificar y priorizar las características de la vivienda que ofrecen mayores beneficios para el propietario, lo que permite optimizar el uso de los recursos disponibles y maximizar la satisfacción del usuario.

A pesar de que en Costa Rica se ha puesto en práctica el uso de estructuras geodésicas recientemente, en la mayoría de los casos, como servicio de alojamiento eco-turístico conocido como *glamping*, no se encontraron precedentes de investigación científica al respecto (La Nación, 2019). Este trabajo pretende dar origen a una línea de investigación de estas estructuras, enfocado en su potencial social y ambiental.

A nivel internacional, la primera vivienda que utilizó el concepto de las estructuras geodésicas fue creada en 1929 por el inventor y arquitecto Richard Buckminster Fuller, quien es reconocido históricamente como el padre de los domos geodésicos. Buckminster obtuvo su primer gran éxito en 1950 con la construcción de la cúpula geodésica de Montreal, en la que utilizó geometría basada en una malla icosaédrica, sentando así las bases de la geometría geodésica, la cual popularizaría en los años sesenta (De Lózar, 2014).

Debido al potencial de estas estructuras, su concepto ha sido tema de estudio de varios autores en las últimas décadas. Murcia, Ortiz, y Umaña (2020) realizaron el diseño y la construcción a escala de una cabaña geodésica para fin turístico en el municipio de Cubarral, Colombia, en el cual resaltan sus ventajas estructurales, climáticas y estéticas, puesto que cuentan con una mayor variedad de materiales para desarrollar la obra y la inclusión de estrategias bioclimáticas.

Galdeano y Massa (2018) enfocaron su investigación en la promoción del acceso a viviendas geodésicas, a través de la autoproducción sustentable, como posible alternativa de inclusión habitacional, particularmente para mujeres como principales actoras políticas y económicas del área rural de Lavalle, Argentina; esto gracias a su bajo costo y su breve tiempo de construcción.

Zhivotov y Pastukh (2020) presentaron un artículo en el cual mencionan con detalle las ventajas que tienen los domos geodésicos en madera. Su estudio se enfoca en la aplicación de estas estructuras en la conservación de objetos e infraestructura patrimonial, utilizándolas como refugios temporales para su protección y como infraestructura de área de trabajo para estudios arqueológicos.

Serrano (2011) elaboró un artículo en el cual se explica el uso que se les dio a los domos geodésicos como coberturas post catástrofe durante la emergencia ocasionada por el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile. El artículo menciona que los domos se utilizaron como salas de clase de escuelas unidocentes, como centros comunitarios y como salas de atención médica transitorias.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el uso de estructuras geodésicas sostenibles como alternativa de vivienda de interés social en Costa Rica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar sobre el uso de estructuras geodésicas como solución de vivienda en el mundo
- Identificar materiales locales de uso potencial para la construcción de viviendas geodésicas
- Desarrollar un modelo digital de información BIM de vivienda geodésica que cumpla con la Directriz N° 27 emitida en conjunto por el Presidente de la República, la ministra de Salud y el ministro de Vivienda y Asentamientos Humanos
- Seleccionar un método de evaluación de sostenibilidad para viviendas de interés social.
- Evaluar la sostenibilidad y viabilidad económica del modelo

1.3. Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

El presente trabajo comprendió el diseño y la evaluación de sostenibilidad y viabilidad económica de un prototipo de vivienda geodésica en Costa Rica. El modelo desarrollado incluye una verificación rápida de la capacidad estructural del sistema, y su distribución y conceptualización arquitectónica básica; el modelo es completamente digital, se realizó en los programas, AutoCAD y SketchUp. Este no cuenta con planos constructivos; sin embargo, se generaron planos arquitectónicos conceptuales y renderizaciones representativas. El diseño del sistema electromecánico y detalles como mobiliario y acabados quedaron fuera del alcance.

El cálculo de la huella de carbono no incluye el transporte ni la instalación de los materiales por lo que no es un análisis de ciclo de vida completo, a excepción de la madera de Pino importada que sí incluye las emisiones de su transporte.

En cuanto al análisis económicos, este contempla únicamente el costo de los materiales, excluyendo costos de transporte e instalación, sin embargo, se incluyó un porcentaje de costo de mano de obra sobre el costo total de los materiales.

El modelo se adaptó a las especificaciones mínimas establecidas en la Directriz N° 27 del MIVAH, Ministerio de Salud y la Presidencia de la República, por lo que cumple con las demandas constructivas, sociales y climatológicas particulares de una vivienda de interés social en Costa Rica. En caso de modificaciones futuras a dicha directriz, se debe reevaluar el modelo para verificar el cumplimiento de las nuevas especificaciones.

1.3.2 Limitaciones

La principal limitación para el desarrollo de este proyecto es el recurso económico, ya que, al tratarse de una vivienda de interés social, el costo total del modelo de vivienda geodésica debe ajustarse al tope máximo del Bono Familiar de Vivienda ordinario, el cual es de ₡7 100 000 en el año 2021.

El objetivo de la investigación fue evaluar un modelo sostenible que implemente materiales locales de bajo impacto, por lo cual el catálogo de materiales a utilizar está restringido a su disponibilidad en el territorio nacional o posibilidad de importación. Además, algunos de estos materiales no cuentan con pruebas de laboratorio.

En Costa Rica no se ha implementado el uso de estructuras geodésicas para viviendas de interés social, por lo que la experiencia en este ámbito es inexistente. Debido a la geometría circular de la vivienda, el diseño es viable para proyectos de interés social donde la dimensión de los lotes permita espacios libres entre las casas.

1.4. Metodología

Se propuso una metodología de naturaleza descriptiva tanto cualitativa como cuantitativa, según el fenómeno de estudio. Esta se muestra en la Figura 2, la cual indica la división del trabajo en cuatro fases.

La primera fase consistió en un estado del arte del fenómeno de estudio, la cual está compuesta de una investigación sobre los domos geodésicos, su uso como vivienda a nivel mundial, y materiales utilizados para su construcción. Esta se complementó con una investigación sobre proyectos de interés social en Costa Rica, en la que se identificaron los requisitos técnicos de una vivienda de interés social.

En la segunda fase se realizó un listado de materiales de bajo impacto ambiental utilizados a nivel internacional, en la que se identificaron algunas de sus características, entre estas su huella ecológica, costo, ventajas y desventajas. De igual manera se generó una lista con materiales locales de uso potencial para la fabricación de la vivienda geodésica, y se seleccionaron los que se incluyeron en el modelo.

La tercera fase comprendió el diseño como tal de la vivienda geodésica y la elaboración de un modelo BIM en el software SketchUp, implementando los materiales seleccionados en la fase anterior. Se realizó un análisis estructural preliminar y un diseño arquitectónico básico en el cual se contemplaron aspectos de bioclimatismo.

En la cuarta fase, primero se sometió el modelo desarrollado a una evaluación, constituida por un análisis de sostenibilidad, en el que se utilizó el Método de Presupuesto de Materiales para calcular su huella de carbono; luego se realizó el análisis económico de la vivienda y se compararon los resultados obtenidos con un análisis de igual índole de una VIS típica prefabricada en concreto.

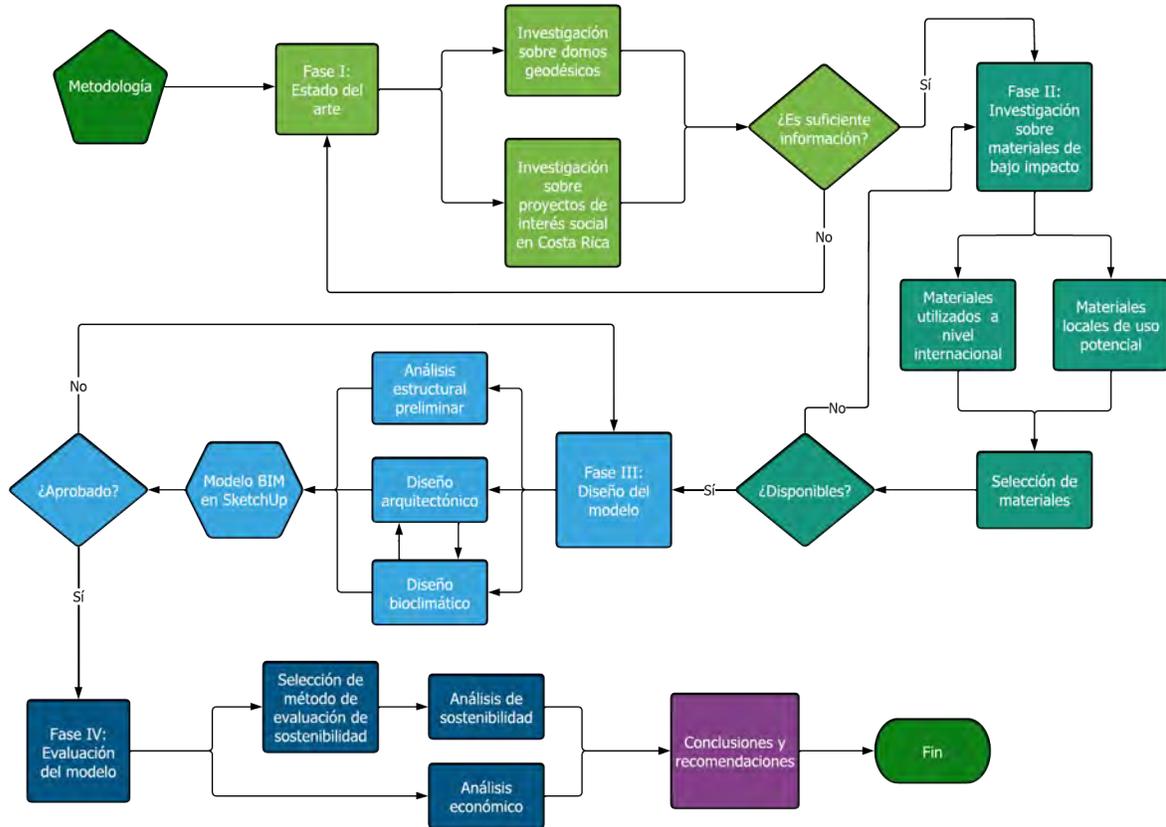


Figura 1. Metodología propuesta

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Hipótesis

Esta investigación pretendió responder las siguientes preguntas: ¿Puede una estructura geodésica ser una alternativa viable, a nivel ambiental, social y económico, a la necesidad insatisfecha de vivienda en Costa Rica? Así mismo, ¿Cuenta Costa Rica con materiales de bajo impacto que respondan a las demandas económicas y estructurales de una vivienda sostenible de interés social?

2.2 Sostenibilidad y construcción sostenible

A raíz del aumento exponencial del poder productivo mundial ocasionado por la revolución industrial en el Siglo XVIII, la capacidad de renovación de recursos del planeta se excedió, antes de que la humanidad reaccionara y se organizara para intentar solucionar el problema. El concepto de desarrollo sostenible se abordó de manera internacional por primera vez en el Informe Brundtland de 1987, en el cual se definió como el "desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que generaciones futuras atiendan sus propias necesidades" (Cagiao et al., 2010).

La sostenibilidad aplicada a cualquier industria se logra al alcanzar el equilibrio entre el aspecto económico, el social y el ambiental, sin que uno se sobreponga ante otro, como se ilustra en la Figura 2. Cada uno de estos tres pilares deben ser respetados por cualquier empresa que tenga como objetivo alcanzar la sostenibilidad. A pesar de ser un concepto bastante simple, la realidad es que son pocas las industrias o empresas que logran aplicarlo verdaderamente.



Figura 2. Pilares de la sostenibilidad

La industria de la construcción no es la excepción, puesto que es una de las principales responsables de la producción de desechos y el consumo de energía y agua. En un artículo publicado en la edición 264 del 2016 de la Revista CFIA, la Ing. Ana Grettel Leandro, profesora en el Instituto Tecnológico de Costa Rica y experta en Administración de la Construcción, graduada de la Universidad Purdue en Estados Unidos, afirmó lo siguiente:

En el caso de la construcción, la sostenibilidad en el desarrollo de proyectos se debe ver reflejada en cada una de las etapas del ciclo de vida de la obra, es decir en el planeamiento, diseño, ejecución, uso, operación, mantenimiento y final de la vida útil, manteniendo estándares de calidad, promoviendo la productividad, el uso racional de los recursos naturales y energía y el respeto por la vida humana y por el medio ambiente. (Mora, 2016, p. 17)

2.3 Cambio climático

El cambio climático es sin duda uno de los temas de mayor discusión en las últimas décadas, y es, indiscutiblemente, el principal desafío del Siglo XXI. Fue definido por la Organización de las Naciones Unidas (1992) como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

Según datos de un informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se estima que las actividades humanas son responsables de un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales a finales del Siglo XVII, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Según proyecciones del mismo informe, es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (IPCC, 2018).

El aumento acelerado de la temperatura traerá consigo riesgos climáticos para los sistemas humanos y naturales. Entre algunas de las consecuencias se mencionan el incremento de temperaturas extremas en muchas regiones, el aumento de la frecuencia, intensidad o cantidad de precipitaciones intensas en varias regiones, el aumento de la frecuencia o intensidad de las sequías en algunas regiones, y el aumento del nivel del mar promedio a nivel mundial debido al deshielo (IPCC, 2018).

2.4 Materiales de bajo impacto

Para que un material de construcción sea considerado de bajo impacto ambiental, este debe contar con una menor huella de carbono [kgCO_2/ton , kgCO_2/m^3 o kgCO_2/m^2] o cantidad de energía incorporada [MJ/ton , MJ/m^3 o MJ/m^2] que su material homólogo convencional, estas son las dos grandes cargas ambientales asociadas a cada etapa de su ciclo de vida. La energía incorporada se define como la cantidad de energía requerida para producir el material y suministrarlo hasta el lugar de utilización. Dicha energía consiste en: energía requerida para su manufactura; energía asociada al transporte de materias primas a la fábrica y del producto final al consumidor y energía necesaria para su ensamblaje en obra. Es por esto que la escogencia de materiales locales reduce significativamente el impacto ambiental que puede tener una edificación (Joseph & Tretsiakova-McNally, 2010).

Un material de bajo impacto puede llegar a considerarse sostenible si cumple con los siguientes criterios: uso racional de los recursos naturales, energéticamente eficiente, eliminación o reducción de desechos generados, baja toxicidad, conservación del agua y asequibilidad. Los materiales de construcción sostenibles pueden ofrecer un conjunto de beneficios específicos al propietario o usuario de la edificación, tales como reducción de costos de remplazo y mantenimiento, conservación de la energía, mejora de la salud y productividad y bajos costos asociados al cambio de configuración de espacios.

2.5 Arquitectura pasiva y bioclimática

La arquitectura es un trabajo esencialmente social ya que su enfoque principal es proveer un espacio físico agradable y práctico para la habitación e interacción entre personas. Los principios de la tendencia bioclimática van dirigidos a los siguientes puntos:

- El mejoramiento de la calidad de vida de los usuarios desde el punto de vista de confort higrotérmico
- Incidir en la reducción de la demanda de energía convencional y al aprovechamiento de fuentes energéticas alternativas, como resultado del concepto ecológico que enmarca esta tendencia

Por lo tanto, el diseño bioclimático procura crear edificaciones energéticamente eficientes, con una expresión formal-tecnológica acorde a su contexto. Esta tendencia toma en cuenta el clima y las condiciones del entorno para alcanzar el máximo confort higrotérmico, involucrando

exclusivamente los elementos arquitectónicos, sin utilizar sistemas mecánicos, siendo esta la razón por la que se considera arquitectura pasiva (Garzón, 2007).

El objetivo es diseñar edificaciones tomando en cuenta el entorno y las orientaciones favorables, aprovechando los recursos naturales disponibles como el sol, la vegetación, la lluvia y el viento, en procura de la sostenibilidad del medio ambiente. Aunque el costo de construcción puede ser mayor, puede ser rentable, ya que el incremento en el costo inicial puede llegar a amortizarse en el tiempo al reducirse los costos de operación. Para ser aplicada, la arquitectura pasiva requiere del conocimiento extensivo de los factores físico-geográficos del sitio en el que se planea realizar la construcción (Del Cisne & Castro, 2020).

Algunos objetivos específicos de la arquitectura bioclimática son los siguientes:

- Alcanzar una temperatura agradable, humedad, movimiento y calidad del aire en el interior del edificio
- Controlar los efectos negativos de las edificaciones en el entorno: desechos sólidos, aguas servidas y gases de combustión vinculados al acondicionamiento
- Contribuir a la reducción del consumo de combustibles entre un 50% y 70%
- Reducir la emisión de gases contaminantes a la atmosfera entre un 50% y 70%
- Reducir el consumo de agua potable en un 30% y la iluminación artificial en un 20%

Los sistemas pasivos se basan en el control de las variables climáticas en el interior de las edificaciones aplicando un uso racional de la geometría y de los materiales utilizados en arquitectura, incidiendo principalmente en la radiación solar, ya sea facilitando o limitando su incidencia y empleando las propiedades de aislamiento e inercia térmica de los materiales como amortiguamiento térmico. Un ejemplo es la elección de los vidrios, cerramientos y sistemas livianos orientados hacia los objetivos mencionados (Del Cisne & Castro, 2020).

2.6 Normativa e instituciones competentes

2.6.2. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos

Es el órgano técnico Rector del Gobierno de la República en materia de ordenamiento territorial y asentamientos humanos. Encargado de emitir políticas y directrices en función de las necesidades y demandas de los distintos estratos socioeconómicos, con el propósito de facilitar el acceso a viviendas, sujetas a la coordinación de una planificación integral en el país.

2.6.3. Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo

Entidad pública autónoma, responsable de la ejecución de políticas y planes en materia de desarrollo urbano y ordenamiento del territorio. Tiene como función diseñar, coordinar y promover programas habitacionales que permitan a las personas tener acceso a una vivienda propia, de acuerdo con sus necesidades y posibilidades.

2.6.4. Banco Hipotecario de la Vivienda

Entidad de derecho público, de carácter no estatal, con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía administrativa. Es el ente rector del SFNV dedicado exclusivamente al financiamiento de vivienda para los sectores de menores ingresos del país y de la clase media. Creado mediante la Ley N° 7052 del Sistema Financiero Nacional para la vivienda y creación del BANHVI; entre sus responsabilidades están: administrar los recursos asignados por la ley para invertirlos en bonos de vivienda, supervisar la distribución y uso de estos recursos y gestionar mediante productos financieros nuevos ingresos para garantizar la sostenibilidad al SFNV (Ley N° 7052, 1986).

2.6.5. Reglamento de construcciones y Directriz N° 27

El Reglamento de Construcciones, anteriormente llamado Código de Construcción, publicado como Reglamento a la Ley de Planificación Urbana, promulgada por el INVU en 1968, cuya última versión data del 2022, es de acatamiento obligatorio para los ciudadanos del país, en especial para los miembros del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Dicho reglamento tiene como objetivo fijar las normas para la planificación, diseño y construcción de edificaciones y obras de infraestructura urbana, en lo relativo a la arquitectura e ingenierías, con la finalidad de garantizar en toda obra solidez, estabilidad, seguridad, salubridad, iluminación y ventilación adecuadas (Reglamento de Construcciones, 2018).

Como complemento al reglamento mencionado anteriormente, el Presidente de la República en el 2003, en conjunto con la Ministra de Salud y el Ministro de Vivienda y Asentamientos Humanos, emitieron la Directriz N° 27, denominada Especificaciones técnicas y lineamientos para la escogencia de tipologías arquitectónicas para la construcción de vivienda y obras de urbanización, financiadas mediante la aplicación del Sistema Financiero Nacional para la Vivienda.

El objetivo de la directriz es identificar la población objetivo que el MIVAH desea impulsar con el desarrollo de proyectos habitacionales de interés social, así como determinar los lineamientos técnicos que deben seguirse para la planificación, diseño y construcción de las viviendas. (Directriz N° 27, 2003). Algunos de los lineamientos más importantes se presentan a continuación:

- Se deben utilizar sistemas constructivos sismorresistentes, duraderos, livianos y modulares
- Se consideran preferibles los materiales cuyo uso sea de nula toxicidad y que en la medida de lo posible sean duraderos
- Serán preferibles las tecnologías que apoyen la conservación sostenible del ambiente (disminución del movimiento de tierras) y se adecuen a las características de la zona
- Los nuevos sistemas que sean propuestos en los proyectos deberán contar con diseños de profesionales inscritos en el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos
- Los nuevos materiales que se propongan deberán estar certificados por laboratorios, reconocidos e inscritos en el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos

Además de estos lineamientos, la Directriz N° 27 establece ciertas características mínimas que debe cumplir una vivienda de interés social bajo el amparo del Artículo 59 de la Ley del SFNV:

- Área mínima de 42 m² y dos dormitorios para núcleos familiares de menos de cinco miembros
- Área mínima de 50 m² y tres dormitorios para núcleos familiares de cinco o más miembros
- Contrapiso con espesor mínimo resultante de la memoria de cálculo del ingeniero responsable del diseño, de concreto, madera tratada, fibrocemento u otro material si el sistema de vivienda es sobre pilotes
- Acabado de paredes exteriores libre de grietas, imperfecciones y que garantice efectiva impermeabilización
- Paredes internas de concreto, madera o algún tipo de muro seco que preferiblemente tenga ambos lados de su acabado igual. En caso de ser madera esta debe estar en perfecto estado y estar tratada contra insectos y humedad

- Estructura de techo metálica protegida contra corrosión, soldada o apernada, o en madera debidamente tratada contra insectos y humedad, que no tenga secciones menores a 2,5 x 7,5 cm
- Cubierta de techo en lámina galvanizada ondulada con calibre Nº 28 como mínimo. En caso de usarse madera se deberán usar clavos con arandelas de neopreno o plomo
- Marcos de ventanas en aluminio chapa x-11 o x-12, acero inoxidable, hierro galvanizado o madera tratada
- Marcos de puertas de madera de primera calidad, tratada contra insectos y humedad, cepillada a cuatro caras y con dimensiones no menor a 2,5 x 7,5 cm (o el ancho que se ajuste al sistema constructivo utilizado) o metálicos como perfiles laminados tratados contra corrosión
- Tres puertas como mínimo, dos exteriores que podrían ser de madera, metal o de estructura o bastidor de madera, resistentes a la humedad y la intemperie y una en el baño que podrá ser a doble forro. La principal y posterior con llavín de doble paso, la del baño con llavín de pistillo. Todas las puertas serán guindadas con al menos dos bisagras de bronce de 7,5 cm de ancho
- Cielo raso en los corredores y aleros de madera, fibrocemento o yeso prensado para exteriores o similar. Los aleros no deben medir menos de 50 cm de ancho y el emplantillado puede ser de madera tratada de sección 2,5 x 5 cm
- Canoas y bajantes que recolecten toda el agua que caiga en los techos, de hierro galvanizado liso de calibre 28 o superior, o de PVC. Debidamente conectadas por medio de cajas de registro al sistema pluvial, permitiendo el drenaje adecuado de la zona donde se ubiquen
- Precintas y tapicheles, que pueden ser de concreto, fibrocemento u otro material mientras cumplan con espesores mínimos establecidos por los fabricantes para su uso en exteriores. No deben presentar despuntamientos, resquebrajamientos o fisuras
- Instalaciones eléctricas diseñadas y construidas bajo las especificaciones del Código de Instalaciones y demás normativa vigente, por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, por el ICE o por la empresa suministradora de servicios de electricidad de la zona. Mínimo tres salidas eléctricas por aposento, una iluminación, un apagador y un tomacorriente, deberá contar con una prevista para cocina de 220 voltios.

- Debe contar en la acometida con una condeleta botaguas en tubo EMT de 38 mm. El medidor y la cuchilla deberán ir adecuadamente sujetos a elementos fijos y estar protegidos contra la lluvia
- Tendrá un baño con ducha con cachera de una llave y una llave de chorro para lavapies y un inodoro tipo hábitat (económico) o similar. El piso de la ducha debe tener una pendiente mínima de 1% hacia el sumidero y una textura antideslizante no áspera. Deberá contar con ventilación e iluminación natural y las paredes de la ducha deben estar impermeabilizadas hasta la altura de la ventana o a 1,80 m. Todos los elementos deben contar con sifón
- Pila de concreto de un tanque y una batea montada sobre bloques de concreto, llave de chorro, sifón, salida a desagua y un cenicero independiente del resto del sistema de aguas residuales
- Fregadero de cocina de fibra de vidrio o acero inoxidable de un tanque y una batea, montado sobre un marco de metal o de concreto con una llave de chorro, sifón y un cenicero o trampa de grasa independiente del resto del sistema de aguas residuales
- Sistema de agua potable con tuberías que cumplan las normas y estándares que dicta el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (ICAA) y el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). Esta debe ser en tubo PVC CSH-40 de 12,5 mm (pared gruesa)
- Sistema de tuberías de aguas residuales que cumplan con las normas y estándares del ICAA, el Ministerio de Salud e INTECO. Toda tubería y accesorio debe cumplir con la Norma Oficial de Tubería y Conexiones Cloruro de Polivinilo PVC Alcantarillado Sanitario. Para las aguas de servicios sanitarios un diámetro mínimo de 10 cm y 5 cm para el resto del sistema. Deben instalarse cajas de registro en cada cambio de dirección o unión de tuberías
- La vivienda debe contar con un sistema de disposición y tratamiento de aguas residuales o tanque séptico y su buen desempeño es responsabilidad de los profesionales encargados del diseño y construcción del proyecto
- La vivienda deberá estar pintada exteriormente con no menos de dos manos de pintura de buena calidad (pro-plus, látex o similares). Pueden utilizarse revestimientos, estucos y otros materiales mientras se garantice la impermeabilidad y la durabilidad de las paredes que vayan a quedar expuestas, así como los aleros y precintas

2.7 Proyectos de vivienda de interés social en Costa Rica

El Reglamento de Operaciones del Sistema Financiero Nacional para Vivienda (1996) define en su artículo N° 123 una vivienda de interés social como “aquella que no sobrepase el límite máximo del monto que para tales efectos haya acordado la Junta Directiva del BANHVI, con base en la metodología de cálculo aprobada, independientemente de si dicho inmueble ha recibido o no financiamiento subsidiado”. Según la página oficial del BANHVI, dicho monto es de ₡65 801 000 (incluye el valor del lote), por lo que las viviendas cuyo valor se encuentre por debajo de este tope, pueden ser declaradas de interés social y gozar de las exoneraciones que establece la ley.

Según la Ley N° 7052 (1986), las viviendas financiadas con recursos del bono de vivienda cuentan con las siguientes exoneraciones:

- Honorarios profesionales: exoneración del 50% de honorarios profesionales fijados por los decretos de honorarios aplicables a abogados, ingenieros, arquitectos, peritos y contadores.
- Inscripción de escrituras: exoneración del 100% del pago de los derechos de registro, de los timbres fiscales, de los timbres de los colegios de profesionales y de cualquier otro timbre, así como del impuesto de transferencia de bienes inmuebles en la inscripción de escrituras en las que se formalicen las operaciones del SFNV.
- Construcción de viviendas: exención del pago de derechos de catastro de planos, de los timbres fiscales, de los timbres de construcción, de los cupones de depósito, de otros cargos y de timbres de los colegios profesionales y exoneración del 50% del pago de permisos de construcción y urbanización y de todo otro impuesto.

Según datos del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (2018), al finalizar el año, se construyeron 595 184 m² de vivienda de interés social, lo que representa un 5,6% del área total de construcción para ese año. Además, en la X Auditoría de Vivienda de Interés Social, realizada por el mismo colegio de profesionales, se encontró que, de una muestra estadística de 235 viviendas, el 95,75% están construidas en concreto, con el 59,55% en elementos prefabricados y 36,20% en mampostería. Solo 4,25% de las viviendas se construyeron en madera, siendo el proyecto El Porvenir en Batán, Limón, mostrado en la Figura 3, uno de los más recientes. Auditorías anteriores muestran muy poca variación porcentual en estos rubros,

por lo que es claro que el sistema de construcción con elementos prefabricados de concreto es predominante.



Figura 3. Vivienda de interés social en proyecto El Porvenir en Batán, Limón.

Fuente: El Mundo CR, 2015.

2.8 Sistemas de concreto prefabricado

Se le conoce como elementos estructurales prefabricados a aquellos que son elaborados antes de su utilización y en un lugar distinto al de su instalación final. Estos sistemas se han ido modificando a través de los años para adaptarse a las demandas y necesidades de los tiempos. El concreto reforzado figura como el material más utilizado para la fabricación de estos elementos, gracias a su alta resistencia a la compresión, durabilidad, resistencia al fuego y a su capacidad de ser moldeable, además de la resistencia a la tensión y la ductilidad de los refuerzos de acero. Estos elementos se fabrican habitualmente creando, intencionalmente, esfuerzos permanentes en el concreto, con el propósito de aumentar su resistencia, y se les conoce como elementos pretensados o postensados, según se realice el tensado del acero antes o después de haber fraguado el concreto (Novas, 2010).

En Costa Rica, el sistema de columnas y paneles horizontales se ha convertido en la primera opción de sistemas modulares de paredes prefabricadas de concreto. Este sistema se ha utilizado en el país por más de cuarenta años para la fabricación de viviendas y otras edificaciones. Es gracias a su bajo costo, modulación y corto tiempo de instalación, que este sistema predomina en la construcción de viviendas de interés social (Villalobos, 2015).

2.9 Estructuras geodésicas

Denominadas de esta manera al estar conformadas por una malla espacial, compuesta por barras rectas conectadas entre sí en sus vértices a través de nodos que crean triángulos, en la mayoría de los casos, que componen polígonos regulares, siendo el pentágono y el hexágono los más comunes. Esto resulta en una red tridimensional de gran robustez, la cual se utiliza generalmente para generar la popular forma semiesférica de los domos geodésicos (Calluqueo, 2019).

Estos domos se forman con base en cinco sólidos platónicos, siendo el icosaedro el más utilizado, y del cual, a partir de la subdivisión de este, se generan domos de mayores frecuencias. Los domos geodésicos tienen la mayor proporción de espacio exterior-interior, su estructura principal es de rápida instalación, son sismo resistentes y la poca utilización de materiales para su construcción los vuelve relativamente económicos (Ghorbanzadeh, 2016). La implementación de este concepto geométrico en la construcción ocurrió por primera vez en 1922, cuando Walther Bauersfeld diseñó y construyó la cubierta de un planetario en la ciudad de Jena, Alemania, observado en la Figura 4. Posteriormente fue Richard Buckminster quien se encargó de popularizar estas estructuras en las siguientes décadas (Stasi, 2018).



Figura 4. Construcción de domo geodésico en Jena, Alemania

Fuente: Dyckerhoff & Widmann, s.f.

Casa Fuller en Carbondale, 1960

La primera vivienda geodésica habitada registrada es también la primera y única casa que tuvo Richard Buckminster en Carbondale, Illinois, la cual fue su hogar durante 12 años, mostrada en la Figura 5. La cabaña, en pie hasta el día de hoy, es una cúpula geodésica icosaédrica, truncable y de frecuencia 3, lo que quiere decir que su estructura se compone de 3 tipos de barras de diferentes dimensiones. La estructura principal tiene un diámetro de 12,15 m y está construida en madera, con un peso de 1 800 kg. La construcción experimental y los estudios en geometría geodésica de Buckminster, demostraron las ventajas de una red geodésica basada en el icosaedro, esto gracias a la estabilidad estructural otorgada por los triángulos (De Lózar, 2014).



Figura 5. Casa domo de R. B. Fuller en Carbondale, Illinois, EUA

Fuente: RBF Dome NFP, s.f.

Debido al hecho de que la vivienda sería habitada únicamente por él y su esposa, Buckminster tenía el interés de reducir el volumen interior de la cúpula, por lo que decidió truncarla aproximadamente 1 m por encima del ecuador. La construcción de toda la estructura se redujo al ensamblaje de los tres tipos de barras, que formaban dos tipos de triángulos: la barra A de 2,45 m de longitud, elemento común en la base de los dos tipos de triángulos, formaba las aristas de los pentágonos y los hexágonos; la barra B de 2,12 m, une el centro de los pentágonos con sus vértices; y la barra C de 2,51 m, hace lo mismos con los hexágonos, como se muestra en la Figura 6.

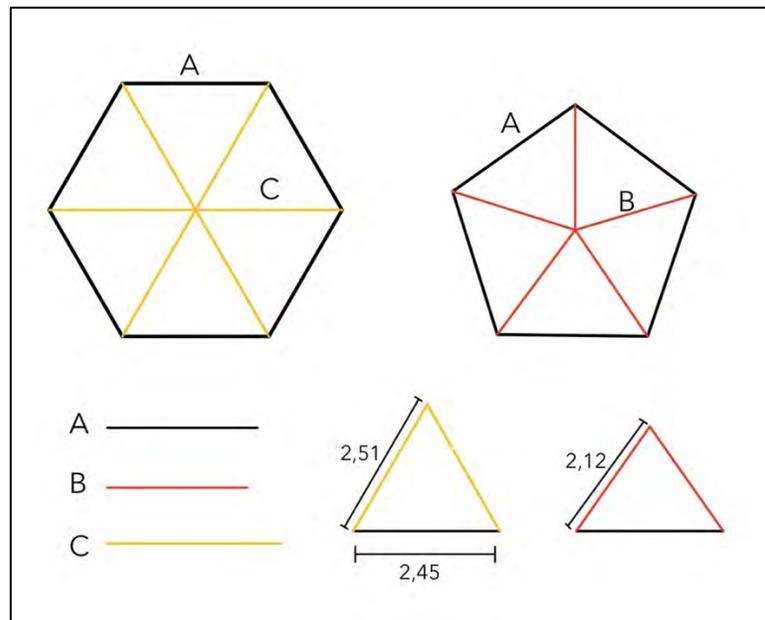


Figura 6. Análisis geométrico de red truncable con frecuencia 3 (cotas en metros)

En lo que respecta a su construcción, Buckminster optó por llevar los dos tipos de triángulos prefabricados a la obra con el objetivo de agilizar el proceso. Las unidades incluían tanto las tres barras estructurales como su cobertura exterior, además de una subestructura, también de madera, con la mitad de sección que la estructura principal, dispuesta en las aristas de los triángulos y unidas en el vértice que formaría el ápice de las pirámides por un listón.

El fin de la subestructura era meramente facilitar el ensamblaje de las piezas. Estos listones intermedios aseguraban un mejor anclaje de los revestimientos de madera y por lo tanto, una mayor durabilidad del cerramiento. El armazón completo de la cúpula se levantó sobre un anillo de cimentación de concreto reforzado en tan solo siete horas. En la Figura 7 se puede observar en detalle el sistema de recubrimiento del domo (De Lózar, 2014).

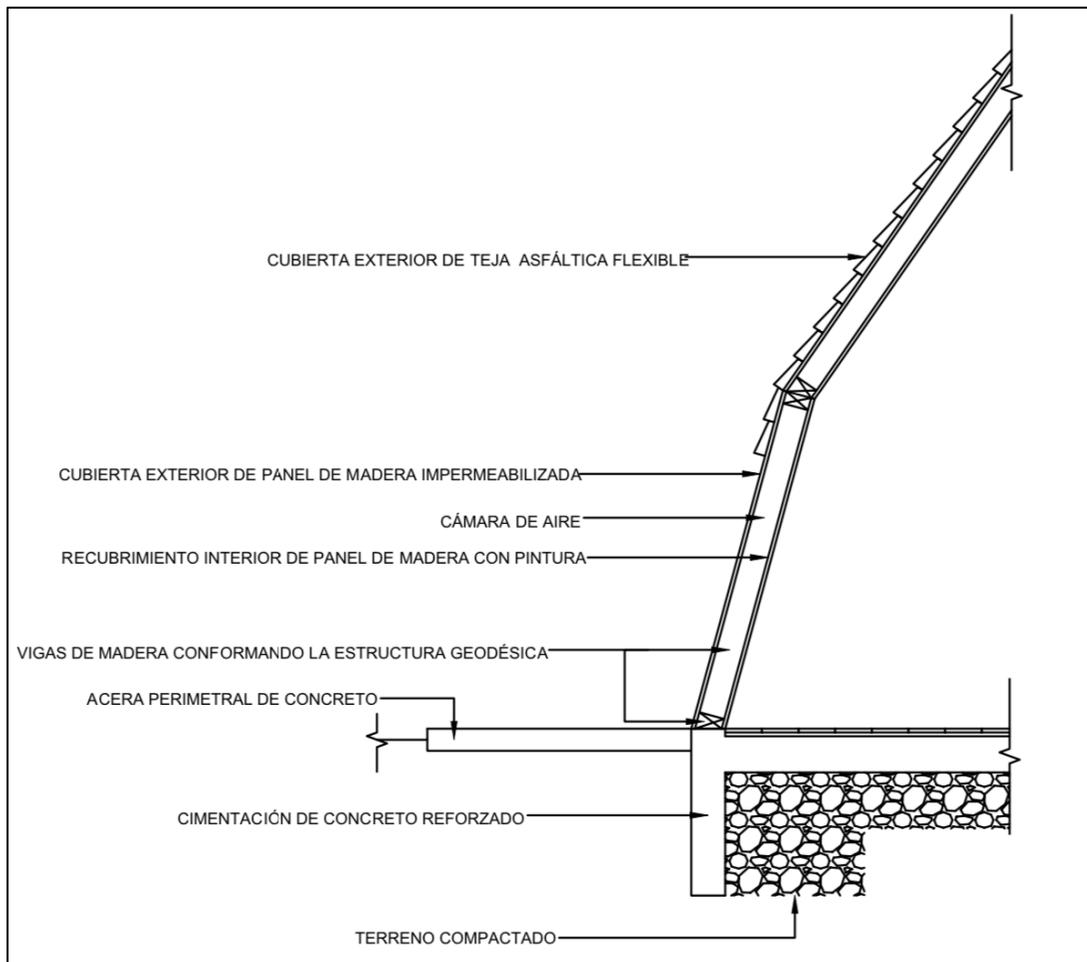


Figura 7. Detalle de recubrimiento y cimentación

Fuente: De Lózar, 2014. Modificado por Cordero, 2021

Domo geodésico en Yecla, 2014

Esta vivienda está compuesta por una cúpula de 11,8 m de diámetro exterior y un tambor de 1 m para garantizar suficiente altura libre en la segunda planta, teniendo una altura máxima de 6,9 m. A continuación, se muestra la vivienda finalizada en la Figura 8.



Figura 8. Vivienda unifamiliar geodésica autosuficiente en Yecla, Murcia, España

Fuente: Ecoprojecta, 2014

La primera planta está compuesta por un espacio único, integrado por un salón, comedor y cocina, más un dormitorio y un baño. La segunda planta contiene un dormitorio con baño propio y una pequeña sala. Se observa con detalle la distribución espacial en la Figura 9 y la Figura 10.

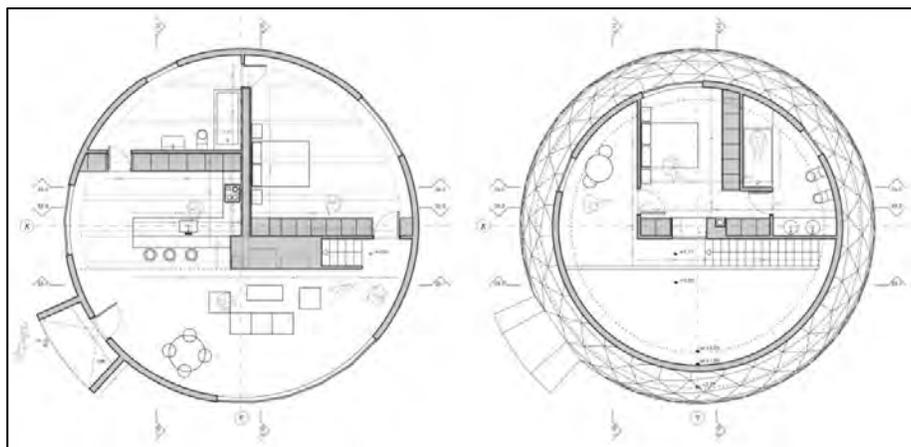


Figura 9. Distribución espacial de vivienda geodésica en Yecla

Fuente: Ecoprojecta, 2014

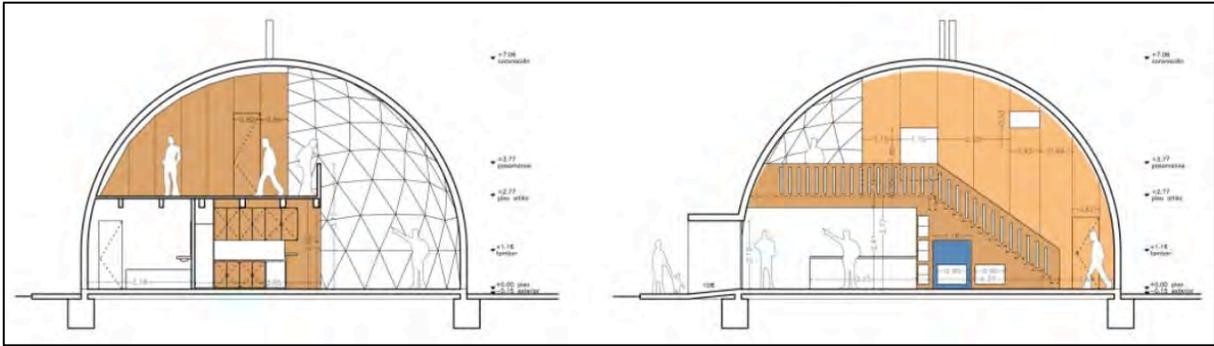


Figura 10. Sección transversal y longitudinal de vivienda geodésica en Yecla

Fuente: Ecoprojecta, 2014

La estructura está compuesta por barras de madera laminada de abeto con certificado PEFC (por sus siglas en inglés: Programme of Endorsement of Forest Certification), al igual que los tabiques y revestimientos interiores realizados en tableros de fibra de madera. Las barras de abeto forman triángulos que se unen entre sí por gravedad y tornillos en los laterales, sin requerir piezas especiales en los vértices como se observa en la Figura 11 y la Figura 12. El entrepiso de la segunda planta es un tablero tipo sándwich de madera y corcho natural, que se apoya sobre columnas y vigas de madera y la propia estructura triangular en su perímetro.



Figura 11. Unión entre triángulos por simple contacto (Tipo GoodKarma)

Fuente: Ecoprojecta, 2014



Figura 12. Detalle de primer anillo de la cúpula

Fuente: Ecoproyecta, 2014. Modificado por Cordero, 2021

A continuación, se muestra en la Figura 13 un ejemplo de anclaje utilizado para unir la cúpula geodésica al tambor de concreto en un proyecto en Santa Ana, Costa Rica.



Figura 13. Anclaje típico de la estructura geodésica con el tambor de concreto

La envolvente del domo se cierra en el interior y exterior por los tableros de fibra de madera, mientras que la cámara de aire que queda en medio se rellena con celulosa natural, cumpliendo la función de aislante térmico. Finalmente se envuelve la cúpula con una lámina impermeabilizante higroscópica que permite la transpiración y se le da un acabado final con mortero de cal. En el interior, el sistema de paredes liviano se compone por secciones de madera, tableros de fibra de madera, y pintura mineral. El piso de la cocina y los baños es de baldosa hidráulica mientras que el resto de espacios utilizan madera.

El sistema constructivo geodésico de la vivienda optimiza el uso de materiales al cubrir un gran volumen con poca cantidad de estructura, sin embargo, se incorporaron técnicas de bioclimatismo que permiten mantener el confort térmico a un bajo costo energético. En cuanto a la renovación del aire y el confort térmico se emplearon las siguientes estrategias:

- Envolvente térmica de celulosa natural con espesor de 12 cm, ausencia de puentes térmicos y buena carpintería de madera y vidrio con doble cristal.
- Renovación de aire y climatización por medio de un pozo canadiense
- Calefacción mediante chimenea a base de biomasa, diseñada para calentar ambos niveles al mismo tiempo por medio de un circuito hidráulico que alimenta un piso radiante en el primer nivel y unos radiadores en el segundo

El pozo canadiense consiste en una entrada de aire exterior que aprovecha la inercia térmica del terreno para reducir la temperatura del aire antes de ingresar en la vivienda. Gracias a la estabilidad térmica del terreno a una profundidad de 1,5 a 2 m, se consigue que el aire entrante en invierno sea más cálido que el del exterior y en verano que sea más fresco. Además, se garantiza el movimiento del aire mediante un sistema híbrido de ventilación y las ventanas de la cúpula. (Ecoprojecta, 2014).

Estas estrategias bioclimáticas, sumado a la obtención de agua caliente mediante colectores solares, hacen que el consumo energético de la vivienda sea mínimo y sea prácticamente autosuficiente.

Domos geodésicos en biocerámica de Geoship

La empresa estadounidense Geoship se encuentra en ese momento desarrollando una nueva propuesta de vivienda sostenible, utilizando una combinación de innovadora tecnología de materiales con las ventajas de la geometría geodésica. En la Figura 14 y Figura 15 se observan una renderización y un detalle de uno de sus modelos respectivamente.



Figura 14. Renderización de domo geodésico en biocerámica de Geoship

Fuente: Geoship, 2020

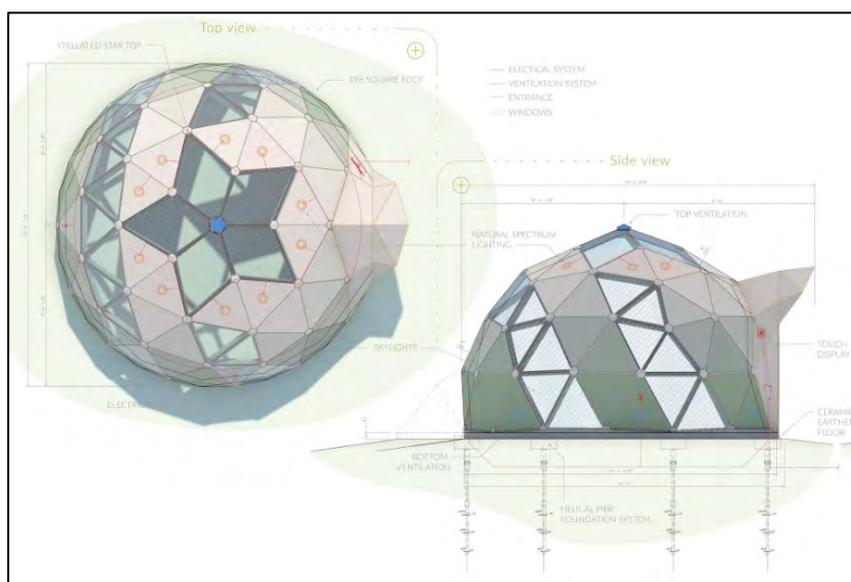


Figura 15. Vista en planta y lateral de domo de biocerámica de Geoship

Fuente: Geoship, 2020

Los domos están contruidos en su totalidad con puntales, conexiones y paneles de material compuesto de biocerámica. Este material es una nueva clase de geopolímero, que presenta características similares al cemento, como su activación en contacto con el agua, pero con la diferencia de que su impacto ambiental es mucho menor. Su composición es principalmente de minerales crudos y fibras naturales como coco y cáñamo.

En esta nueva propuesta, Geoship asegura presentar diversas ventajas contra una vivienda convencional, entre las que destacan su sostenibilidad, resiliencia y armonía con la salud. El carbono incorporado en un domo de biocerámica es 90 % menos que una vivienda de madera de igual área. Además, estos materiales cerámicos capturan CO₂, proceso que puede ser acelerado al curar los paneles en cámaras de gas ricas en CO₂ o utilizando agua con infusión de CO₂.

El proceso de instalación es similar al de una casa convencional. Una vez que se completa la fundación, se ensambla el marco de la cúpula y luego se instalan los paneles exteriores. En este punto, la cúpula se sella lo suficiente para evitar que entre el viento y la lluvia. A continuación, los sistemas electromecánicos se pueden instalar dentro de las paredes y finalmente se instalan los paneles interiores y se rellena la cúpula con un material aislante.

La instalación del domo no requiere de cortes por lo que no produce residuos sólidos. Además, los paneles cerámicos son completamente inorgánicos y no tóxicos. Al final de su larga vida, pueden pulverizarse y utilizarse para fabricar nuevos paneles cerámicos. El material cerámico también es un excelente fertilizante. Estos domos están ingeniados para tener una vida útil de 500 años gracias a que son resistentes contra la corrosión, el fuego, la humedad, la pudrición y los insectos.

Domo geodésico en bambú, Gujarat

Este domo, mostrado en la Figura 16, fue construido principalmente con elementos de bambú y funciona actualmente como espacio de reunión y estudio en el campus de la Academia de Diseño de Vadorara en India. El domo es una propuesta ganadora presentada por un grupo de estudiantes de arquitectura de la academia para concursar por el Buckminster Fuller Challenge 2016, un galardón que ha ganado reputación recientemente en la categoría de diseños socialmente responsables.



Figura 16. Domo geodésico de bambú en Gujarat, India

Fuente: Centre for Human Habitat and Alternative Technology, 2016

El domo fue previsto para servir como espacio temporal para actividades rurales y agrarias, así como albergues y refugios para inmigrantes sin domicilio, esto ejemplifica el potencial del bambú como material estructural en la construcción de viviendas geodésicas.

Las uniones de acero conectan las estructuras de bambú, que luego se cubren con esteras de bambú y una capa de espuma de poliestireno aislante, y finalmente se cubren con una lámina flexible de PVC impermeable. Abarcando todo el perímetro de la cúpula hay un espacio casi a la altura de una persona, lo que proporciona un ambiente bien ventilado y una atmósfera abierta. El esqueleto de bambú del diseño más grande se puede construir en aproximadamente cinco horas y media, y toma otras cuatro horas para estar completamente cubierto y listo para ser habitado.

CAPÍTULO 3. MATERIALES DE USO POTENCIAL

3.1 Materiales utilizados a nivel internacional

Madera

Es un material de origen orgánico celular compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina. Es uno de los materiales de construcción más comunes, utilizado desde la antigüedad debido a su abundancia en la naturaleza y su facilidad de extracción. Comercialmente se obtiene en dos grupos: las coníferales (maderas blandas) y las angiospermas (maderas duras). Es un material estructuralmente fuerte, adecuado para diversas aplicaciones como construcción de marcos, pisos, techos y revestimientos.

En el proyecto desarrollado por la empresa Ecoprojecta en 2014 en Yecla, España, se evidencia la funcionalidad de la madera en la construcción de estructuras geodésicas. En este caso se optó por utilizar madera laminada de Abeto para la construcción de la estructura principal, lo que aparenta ser una buena elección, ya que la madera laminada presenta mayor resistencia estructural que los otros tipos como la contrachapada, aserrada, o estructural compuesta (Paniagua, s.f.). En el caso del proyecto de interés social El Porvenir en Batán, mostrado en la Figura 3, la madera utilizada para construir la totalidad de las viviendas es madera de Pino Amarillo proveniente de EUA.

Bambú

Al igual que la madera, también es un material de origen orgánico y abundante principalmente en regiones tropicales de América Latina, Asia y África. Su uso se ha incrementado en los últimos años en el sector de la construcción gracias a sus excelentes propiedades mecánicas, peso liviano, flexibilidad, rapidez de crecimiento y costos relativamente bajos, especialmente en zonas donde crece naturalmente (Joseph & Tretsiakova-McNally, 2010).

El domo geodésico construido en el 2016 en Gujarat, India, por el Centre for Human Habitat and Alternative Technology demuestra que el bambú es una excelente opción para la construcción sostenible de estas estructuras, siempre y cuando se le dé un curado y un tratamiento adecuado contra humedad e insectos. Gracias a sus propiedades mecánicas, así como este espacio de estudio, también existen numerosas estructuras que emplean este material.

Cáñamo

Actualmente su uso se da en bloques elaborados con la parte leñosa de la planta del cáñamo, como se muestra en la Figura 17, o en fardos como se observa en la Figura 18. Al ser de origen orgánico es un excelente material alternativo de bajo impacto, además de ser es un cultivo de rápido crecimiento y no requerir el uso de plaguicidas (Hernández, Jiménez & Sánchez, 2021). Hoy en día la marca más popular es CANNABRIC, empresa europea localizada en Granada, España. Además de en los bloques, el cáñamo es utilizado en la construcción principalmente como material aislante, en forma de paneles o fieltros en rollo, debido a sus propiedades termoacústicas. Se puede utilizar también como agregado en conjunto con cal o cemento para fabricar concreto, el cual recibe el nombre de "Hempcrete".



Figura 17. Bloque de cáñamo CANNABRIC

Fuente: CANNABRIC, 2009



Figura 18. Filtro de cáñamo en rollo CANNABRIC

Fuente: CANNABRIC, 2009

Paja

Es un material orgánico utilizado desde el Siglo XIX en la construcción, disponible en grandes cantidades a nivel mundial y de fácil disposición final debido a su uso frecuente como compostaje y alimento para el ganado. Además, al ser un desecho del cultivo de cereales, una especie vegetal, contribuyen positivamente al ambiente al captar CO₂ durante su crecimiento. Este material alternativo se ha utilizado como material estructural o como relleno, pero principalmente como material aislante, en forma de pacas o paneles (Hernández, Jiménez & Sánchez, 2021).

Cal

Este material obtenido a partir de la cocción de rocas carbonatadas, principalmente calizas y dolomías, se ha utilizado como conglomerante desde tiempos antiguos. Su uso data desde la época de la civilización Mesopotámica, donde se utilizó como revestimiento de paredes en templos, en conjunto con barro. A pesar de su durabilidad demostrada, el uso de los morteros a base de cal disminuyó considerablemente con la aparición del cemento Portland, debido a su superioridad en versatilidad, facilidad de trabajo y rápida resistencia.

Según la Norma Europea UNE_EN 459-1, la cal puede dividirse en dos grandes categorías; cales aéreas y cales hidráulicas. Las cales aéreas se dividen en vivas o hidratadas, siendo estas últimas la más utilizadas para la fabricación de morteros, específicamente las cales hidratadas que contienen menos de 5% de óxido de magnesio (Usedo, 2015). Sin embargo, es común

encontrar en el mercado sacos de morteros de cal hidráulica natural, como es el caso de las marcas españolas Ibercal y Morcem, siendo esta última comercializada en Costa Rica.



Figura 19. Morteros de cal Ibercal y Morcem

Fuente: Ibercal y Morcem, 2021

Fibra de celulosa natural

Material de origen orgánico utilizado como aislante termo-acústico en paredes, azoteas y pisos. Se fabrica a partir de papel periódico reciclado y ácido bórico en la mayoría de los casos para otorgarle resistencia contra el fuego, insectos y el moho. Es una excelente alternativa al asilamiento con fibra de vidrio utilizado comúnmente.

Membranas poliméricas impermeabilizantes

En Europa existe una variedad de membranas transpirables impermeabilizantes que se utilizan en techos debajo del elemento de cubierta escogido, ya sean tejas de barro, sintéticas, asfálticas u otro tipo de cubiertas. La función principal de estas membranas es evitar la condensación de humedad dentro de la estructura y minimizar al máximo las filtraciones de agua.

Un ejemplo de este tipo de membranas es la utilizada en el proyecto del domo geodésico en Yecla, España. La empresa Ecoprojecta utilizó la membrana Permo Ultra SK de la empresa española Red Verde, la cual se especializa en la fabricación de materiales ecológicos para bioconstrucción. Esta membrana está compuesta principalmente de polipropileno y polietileno reciclados. La empresa Klover del Reino Unido también tiene dentro de su catálogo una variedad de membranas de polipropileno.

Existen otras opciones que se pueden encontrar en la base de datos de Declare del International Living Future Institute, como es el caso de las membranas impermeabilizantes de la empresa norteamericana Henry.

Corcho proyectado

Es el producto que se obtiene al mezclar corcho natural granulado, dispersado en resinas junto con copolímeros acrílicos y emulsionado normalmente en agua. Este material se desarrolló especialmente para aislar y amortiguar acústicamente el sonido. Presenta un alto grado de elasticidad y flexibilidad, larga duración y es adecuado para la protección y revestimiento de fachadas, muros de contención y cubiertas de naves. Además, es un excelente impermeabilizante natural.

3.1.1 Huella ambiental

Madera

Este material de construcción, que si bien es cierto está popularmente asociado con la deforestación, puede ser considerado renovable dada la estrategia de la administración sostenible de bosques y prácticas de cosecha monitoreadas por programas de certificación de estos bosques. El impacto ambiental de la madera dependerá de diversos factores, entre los cuales destacan la certificación de su origen mencionada anteriormente, la composición de los preservantes y acabados utilizados para su tratamiento y la disposición que se le dé al final de su vida útil. Además, tanto bosques como la madera y sus productos tienen la capacidad de fijar CO₂ hasta su eventual liberación a través de la combustión, descomposición bacteriana o fúngica, o al ser consumida por insectos (Joseph & Tretsiakova-McNally, 2010).

Gracias a sus propiedades de fijación de CO₂, los productos de madera pueden ser considerados como "carbono negativos" por lo que se les puede asociar un factor de emisión de CO₂ negativo. Debido a lo anterior, la huella de carbono y la energía incorporada asociada a la madera a utilizar para la construcción de la vivienda geodésica estarían asociadas únicamente a su transporte desde el extranjero y su instalación. En este caso el factor de emisión variará dependiendo de la especie de madera y será considerada sostenible solo si proviene de bosques con certificación de administración responsable.

Para el caso de la madera de Pino Amarillo, Vega (2014) propone utilizar un factor de emisión de 0,7 TonCO₂ negativo/m³ y un factor de 0,00001536 TonCO₂/Ton Producto/Km viaje, asociado al transporte marítimo desde la costa sur de EUA, lugar donde se produce Pino Amarillo certificado.

Bambú

En un estudio desarrollado en Colombia por Arango y Camargo en 2015, se determinó la huella de carbono asociada a la producción de Guadua rolliza preservada hasta el momento en que el producto sale de la puerta de la empresa. Los resultados muestran que, al realizar todos los procesos involucrados de manera eficiente, se obtiene un factor de emisión de 0,00122 TonCO₂ negativo/m³.

Cáñamo

Como se mencionó anteriormente, los productos de cáñamo al ser de origen orgánico vegetal tienen la característica de que retienen CO₂ y según la ficha técnica del bloque CANNABRIC, este posee un factor de emisión de 0,000624 TonCO₂ negativo/kg.

Paja

En el caso de un panel de paja, este tiene un factor de emisión de 0,00180 TonCO₂ negativo/kg y una paca tiene un factor de 0,00210 TonCO₂ negativo/kg (Bernal, 2018).

Cal

Los morteros naturales de cal representan una alternativa de bajo impacto ambiental a los morteros convencionales de concreto que, además, la mayoría incluyen aditivos químicos para mejorar sus propiedades. Algunas empresas inclusive cuentan con certificaciones ambientales y etiquetado energético en sus productos como es el caso de Morcem, que ofrece este producto respaldado por el Consejo de Construcción Verde de España y cuenta con etiqueta ecológica tipo III, Declaración Ambiental de Producto verificada por la Asociación Española de Normalización y Certificación, según se observa en la Figura 20.



Figura 20. Etiquetado ambiental de producto Morcem Cal Base

Fuente: Ficha técnica Morcem Cal Base

El factor de emisión asociado a un mortero de cal hidráulica en saco es de 0,814 TonCO₂/kg, según un estudio realizado en España (Freire, Muñoz & Marrero, 2016).

Fibra de celulosa natural

La fibra de celulosa es una gran alternativa de material de aislamiento gracias a que gran parte su materia prima es material reciclado. Su factor de emisión varía dependiendo del fabricante, sin embargo, este se tomará como 0,0005 TonCO₂/kg de manera conservadora (Grazieschi, Asdrubali & Thomas, 2021).

Membranas poliméricas impermeabilizantes

En este caso el polipropileno y el polietileno de baja densidad, tienen un factor de emisión de 1,679 TonCO₂/kg y de 1,694 TonCO₂/kg respectivamente (Freire, Muñoz & Marrero, 2016).

Corcho proyectado

El corcho es un material totalmente natural obtenido de la corteza del Alcornoque, no contiene sustancias tóxicas y presenta la característica de fijar CO₂. La huella de carbono del corcho proyectado dependerá de sus agregados y la sustancia líquida que funcione como base emulsionante. Es por lo anterior que se tomará un factor de emisión de 0 TonCO₂/kg de manera conservadora (Hernández, Jiménez & Sánchez, 2021).

3.1.2 Ventajas y desventajas

A continuación, se resumen en el Cuadro 1 las ventajas y desventajas que presentan los materiales mencionados anteriormente.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de materiales investigados

Material	Ventaja	Desventaja
Madera laminada	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Técnicamente se puede obtener cualquier tamaño deseable ◆ Se puede obtener variedad de formas: vigas de sección variable, vigas 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Requiere tratamiento con preservantes y acabados para su protección contra humedad e insectos ◆ Material anisotrópico

Material	Ventaja	Desventaja
	<p>curvas, arcos o marcos rígidos</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Mayor resistencia mecánica ◆ Libre de rajaduras y torceduras ◆ Material carbono negativo ◆ Reciclable ◆ Poca demanda energética en su producción ◆ Propiedades aislantes termo-acústicas 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Durabilidad limitada si no se toman medidas preventivas
Bambú	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Material versátil, dúctil y elástico ◆ Fácil integración a otras estructuras ◆ Con buen tratamiento y curado puede tener una vida útil de más de 50 años ◆ Liviano ◆ Rápido crecimiento ◆ Bajo costo ◆ Poca demanda energética en su producción ◆ Favorece las condiciones de la calidad del aire 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Requiere tratamiento con preservantes y acabados para su protección contra humedad e insectos ◆ Algunas especies son muy frágiles ◆ Dificultad de selección debido a la falta de uniformidad en sus dimensiones ◆ Material no reglamentado
Cáñamo	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Es un cultivo beneficioso para el suelo 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Costo elevado en comparación a materiales convencionales

Material	Ventaja	Desventaja
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Propiedades aislantes termo-acústicas ◆ Facilita la ventilación y la regulación de la humedad ◆ No es susceptible a ser atacado por parásitos ◆ Larga vida útil ◆ Reciclable ◆ Poca demanda energética en su producción ◆ Alta inercia térmica 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Dependiendo de la ubicación, no es fácil conseguirlo ◆ Se requiere mano de obra capacitada para su instalación ◆ No está reglamentado
Paja	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Técnicamente se puede obtener cualquier tamaño deseable ◆ Se puede obtener variedad de formas: vigas de sección variable, vigas curvas, arcos o marcos rígidos 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ En le caso de las pacas, estas requieren un control estricto durante la construcción para que no se humedezcan, ya que esto podría generar moho ◆ Es un material que no está reglamentado
Cal (Morteros puros)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Buena plasticidad y trabajabilidad ◆ Gran elasticidad ◆ Constancia de volumen bajo condiciones variables de humedad ◆ Permeabilidad al vapor de agua ◆ No provoca eflorescencias 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Mayor tiempo de fragua que los morteros de cemento

Material	Ventaja	Desventaja
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Larga vida útil ◆ Propiedades aislantes termo-acústicas 	
Fibra de celulosa	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Material de origen orgánico ◆ Utiliza poca energía en su fabricación ◆ Es adaptable a cualquier cavidad ◆ Propiedades aislantes termo-acústicas ◆ Rápida instalación ◆ Resistente al ataque de insectos 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Susceptible al agua y la humedad ◆ Se recomienda mano de obra capacitada para su instalación
Membranas poliméricas	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Material impermeabilizante ◆ Protegen los elementos internos susceptibles a la humedad ◆ Alta durabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Compuestas principalmente de materiales poliméricos ◆ Precios relativamente altos
Corcho proyectado	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Reducen la posibilidad de filtraciones de agua dentro de la edificación ◆ Protegen los elementos internos susceptibles a la humedad ◆ Resistente al ataque de insectos 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Su precio puede ser elevado en comparación a otros impermeabilizantes

Material	Ventaja	Desventaja
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Resistente a la humedad, la intemperie y la radiación ultravioleta ◆ Alta durabilidad ◆ Material altamente flexible y elástico 	

3.2 Materiales de uso potencial a nivel nacional

Madera y bambú

En el Cuadro 2 y Cuadro 3 se muestra un resumen de las especies de madera certificada y de bambú disponibles en el país, así como de algunos proveedores.

Cuadro 2. Especies de madera certificadas disponibles en Costa Rica

Especie	Origen	Proveedores
Pino Amarillo	Importado (Norte América)	Maderas Kodiak S.A.
Abeto	Importado (Norte América)	Maderas Kodiak S.A.
Teca	Local	Flor y Fauna S.A. Panamerican Woods S.A.
Pino Radiata	Importado (Chile)	Ecomaderas S.A. Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A.
Melina	Local	Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A.

Fuente: Kurú: Revista Forestal, Costa Rica, 6(16), 2009

Cuadro 3. Especies de bambú disponibles en Costa Rica

Especie	Origen	Proveedores
Dendrocalamus Asper	Local	BambuTico S.A.
Guadua Angustifolia	Local	BambuTico S.A.
Phyllostachys Aurea	Local	BambuTico S.A.

Fuente: BambuTico S.A.

Cáñamo

En Costa Rica el cáñamo es un material que todavía no tiene mucho desarrollo y son pocos los profesionales que tienen experiencia trabajándolo, sin embargo, hay una empresa llamada Zegreenlab S.A. ubicada en Santa Cruz, Guanacaste, que se especializa en la construcción con este material. Esta empresa pionera en la utilización del "hempcrete", construyó en el 2018 la primera vivienda completamente de cáñamo en Flamingo, Guanacaste y se encuentra realizando proyectos de hotelería, vivienda y comercio en la zona. En la Figura 21 se pueden observar espacios internos de la vivienda mencionada anteriormente.



Figura 21. Vista interior de vivienda construida con cáñamo en Costa Rica

Cal (Morteros puros)

En el país se pueden conseguir los morteros de cal de la marca Morcem mencionados anteriormente a través del conjunto empresarial Grupo Puma, el cual tiene una sede en Santa Cruz, Guanacaste. Esta empresa cuenta con una línea de morteros de cal que se adecuan a la necesidad específica del cliente, ya sea para interiores, exteriores, uso estructural o acabados.

Impermeabilizante acrílico

La empresa costarricense Promatico cuenta con una variedad de impermeabilizantes acrílicos que funcionan como sistema impermeable único para fachadas o techos de tránsito ligero. La línea Elaston es uno de estos productos que, además de tener resistencia al intemperismo, es elástico, flexible y no contiene solventes tóxicos ni inflamables.

Los productos Elaston no cuentan con una declaración de huella de carbono que permita conocer su factor de emisión de carbono exacto, sin embargo, para efectos de esta investigación se tomará el factor de un aglutinante acrílico, el cual es de 1,279 TonCO₂/kg (Freire, Muñoz & Marrero, 2016).

Membrana impermeabilizante TPO

La empresa Roofland ofrece una opción de impermeabilización con su membrana Sure-Weld TPO, que, a pesar de estar compuesta de polímeros, esta cuenta con etiquetado energético de Energy Star y además, contribuye a créditos de certificación LEED.

Corcho proyectado

En Costa Rica se puede conseguir corcho proyectado con la empresa Kliu, que ofrece un revestimiento ecológico a base de agua y corcho natural.

Fibra de vidrio

Es el material más habitual utilizado para el aislamiento térmico y acústico en el país. Existen distintos proveedores de marcas que cuentan con etiquetado energético y certificaciones ambientales como Energy Star y Declare. Su factor de emisión es de 0,002408 TonCO₂/kg (Freire, Muñoz & Marrero, 2016).

3.2.1 Costo

Madera

En la Figura 22 se muestran precios de referencia promedio, expresados en colones por pulgada maderera tica (¢/pmt).

Especie	En pie (col/pmt)*	En troza (col/pmt)			Aserrada (col/pmt)
		<8pulg	8-10pulg	>10pulg	
Acacia (tarimas)	43	91	N/A	N/A	284
Anonillo	N/D	N/A	N/D	160	375
Anonillo (tarimas)	55	100	N/A	N/A	260
Areno	N/D	N/A	165	180	390
Areno (tarimas)	30	100	N/A	N/A	N/D
Botarrama	80	N/A	159	178	348
Botarrama (tarimas)	40	100	N/A	N/A	250
Caña fístula	N/D	N/A	N/D	145	310
Caobilla	N/D	N/A	160	193	409
Caobilla (tarimas)	30	100	N/A	N/A	N/D
Cebo	78	N/A	142	165	329
Cebo (tarimas)	N/D	94	N/A	N/A	251
Cedro amargo	250	N/A	223	310	798
Cedro amargo (tarimas)	30	106	N/A	N/A	280
Ceibo	70	N/A	N/A	165	335
Cenizaro	250	N/A	N/A	341	867
Chilamate	N/D	N/A	N/A	163	333
Ciprés	103	N/A	170	207	449
Ciprés (tarimas)	N/D	100	N/A	N/A	225
Cocobolo de San Carlos	N/D	N/A	160	180	350
Cocobolo de San Carlos (tarimas)	30	80	N/A	N/A	N/D
Cucaracho	N/D	N/A	160	180	350
Cucaracho (tarimas)	30	100	N/A	N/A	N/D
Espavel	N/D	N/A	N/A	200	450
Eucalipto	N/D	N/A	156	181	383
Eucalipto (tarimas)	N/D	100	N/A	N/A	250
Fruta dorada	N/D	N/A	155	165	321
Gallinazo	80	N/A	N/D	170	300
Gavilán	83	N/A	N/D	130	400
Guácimo	N/D	N/A	N/D	165	N/D
Guácimo (tarimas)	55	100	N/A	N/A	240
Guanacaste	250	N/A	N/A	355	863
Jaúl	N/D	N/A	N/D	175	325
Jícaro	N/D	N/A	170	180	N/D
Lagartillo	N/D	N/A	160	180	N/D
Laurel	118	N/A	177	196	473
Laurel (tarimas)	52	102	N/A	N/A	267
Melina	90	N/A	160	178	449
Melina (tarimas)	53	123	N/A	N/A	299
Pilón	100	N/A	N/D	230	825
Pilón (tarimas)	55	120	N/A	N/A	245
Pino	98	N/A	161	179	395
Pino (tarimas)	50	110	N/A	N/A	N/D
Pochote (bosque)	N/D	N/A	N/A	285	625
Pochote	83	N/A	146	172	402
Pochote (tarimas)	40	105	N/A	N/A	268
Poró	N/D	N/A	N/A	150	408
Querosén	30	100	160	180	350
Roble coral	N/D	N/A	155	187	450
Roble coral (tarimas)	N/D	100	N/A	N/A	250
Roble Sabana	80	N/A	160	180	290
Teca	174	N/A	228	345	933
Teca (tarimas)	68	115	N/A	N/A	289
Terminalia	N/D	N/A	123	155	N/D
Terminalia (tarimas)	48	94	N/A	N/A	282

Figura 22. Precios de referencia promedio para madera en pie, en troza y aserrada

Fuente: Oficina Nacional Forestal (ONF), 2021

1, a) Algunas notas importantes para comprender la Figura 22 son las siguientes:

- Una pulgada maderera tica (pmt) equivale a una pieza de 2,54 cm x 2,54 cm x 3,36 m
- En madera aserrada 1 m³ equivale a 462 pmt
- N/A: No aplica en vista de la especie y la categoría diamétrica
- N/D: No disponible

Bambú

Su precio varía dependiendo del producto final que se solicite ya que dependiendo de este se utilizan piezas de bambú de menor o mayor diámetro. El rango de precios de los paneles se encuentra entre ₡30 000/m² y ₡40 000/m² (no incluye instalación ni transporte).

Cáñamo

La empresa Zegreenlab realiza la presupuestación de sus servicios por encargo, en el que se incluye el transporte y la instalación del producto prefabricado. Consultando con la fundadora de la empresa, se obtuvo el dato de que 1 m³ de "hemcrete" tiene un costo de aproximadamente ₡257 000 (no incluye instalación ni transporte) (J. Ashley, Comunicación personal, Enero 26, 2022).

Membrana impermeabilizante de poliéster

En el caso de la membrana Permo Ultra SK de Red Verde, el rollo de 12 kg tiene un valor de ₡281 600 (no se incluye costo de importación) y cubre una superficie de 45 m².

Impermeabilizante acrílico

A continuación, se muestra en el Cuadro 4 un resumen de los precios de los distintos impermeabilizantes que ofrece la empresa Promatico.

Cuadro 4. Precio de impermeabilizantes acrílicos de Promatico

Producto	Precio
Elaston Primario Cubeta 19 L	₡33 900
Elaston Base Cubeta 19 L	₡57 700
Elaston 4 Cubeta 19 L	₡58 600

Producto	Precio
Elaston 6 Cubeta 19 L	₡71 500

Fuente: Promatico S.A.

Corcho proyectado

Un revestimiento final de tres capas de corcho proyectado con dos capas de impermeabilizante acrílico, tiene un costo de ₡39 700/m², según se consultó con uno de los fundadores de Domo Bida. (L, Álvaro , Comunicación personal, Marzo 15, 2022).

Fibra de vidrio

Se consigue en paquetes de 15 m² en promedio a un precio de ₡50 000 por unidad. Dependiendo del espesor seleccionado el precio puede variar. (Construplaza, Comunicación personal, Junio 7, 2022)

3.3 Selección de materiales

Antes de seleccionar los materiales a utilizar en el modelo, es conveniente identificar los elementos principales que componen la vivienda geodésica. A continuación, se listan los principales elementos:

- Estructura geodésica
- Aislamiento
- Revestimiento
- Paredes internas
- Piso
- Ventanería
- Puertas
- Tambor
- Aleros

El componente principal de una vivienda geodésica es la estructura, que funge como cerramiento, techo y como sistema estructural sismorresistente. Se consideró que el material más apropiado para utilizarse en este elemento es la madera, principalmente por el hecho de ser un material con mayor capacidad de modulación en comparación al bambú, además de que

el conocimiento para su diseño y construcción es familiar para una mayor cantidad de profesionales de la construcción en Costa Rica.

Adicionalmente, la capacidad de fijación de carbono de la madera es mayor en comparación a la del bambú según las fuentes consultadas, y el hecho de poder conseguir madera certificada en el país asegura, no solo la trazabilidad del material, sino que garantiza la calidad y uniformidad de los elementos.

Otra razón por la que se escogió el uso de la madera tanto para la estructura geodésica, como para las paredes internas, es el hecho de que se ha demostrado su viabilidad en proyectos de este tipo a nivel internacional, como lo es el caso de los domos geodésicos construidos en España por la empresa Ecoprojecta y en Costa Rica por la empresa Domo Bida.

Para mantener el confort higrotérmico dentro de la vivienda, el interior de la estructura geodésica debe contener material aislante termo-acústico, ya que a diferencia de una vivienda convencional, esta no contiene cielo raso ni aleros que resguarden las paredes exteriores de la radiación solar, a excepción de las ventanas. Para esta función se consideró que los materiales más aptos son la fibra de celulosa natural o la fibra de vidrio.

Si bien ambos materiales ofrecen un alto rendimiento como aislantes termo-acústicos, y cada uno presenta algunas ventajas sobre el otro, la mayor diferencia es que en el país no se cuenta aún con proveedores de aislamiento de celulosa natural.

El revestimiento de la vivienda geodésica es uno de los elementos más importantes, ya que de este depende su impermeabilización contra los agentes climáticos como la lluvia, el polvo y la humedad. Se consideró que lo más adecuado es utilizar paneles de fibra de madera tipo OSB, los cuales se recubren con una combinación de tres capas de corcho proyectado y dos capas de impermeabilizante acrílico a base de agua de 1 mm cada una, resultando en un revestimiento total de 5 mm como se muestra en la Figura 23. Las juntas se sellan con una capa de impermeabilizante acrílico.

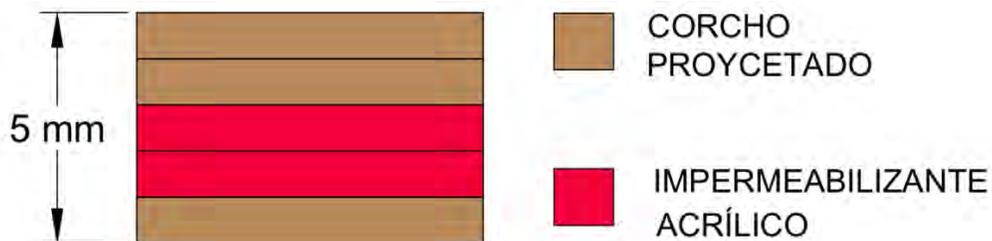


Figura 23. Diagrama de revestimiento de la vivienda geodésica

La razón por la cual se escogió esta combinación para el revestimiento es principalmente por su bajo impacto ambiental, además de que ya ha sido probada por la empresa Domo Bida en la construcción de domos geodésicos en el territorio costarricense. En la Figura 24 se muestra la colocación de la primera capa de corcho proyectado en un domo construido por la empresa mencionada anteriormente en Santa Ana. Este material resulta en un acabado estético que no requiere de manos de pintura y su color puede variar según la elección del cliente.



Figura 24. Colocación de primera capa de corcho proyectado en domo geodésico ubicado en Santa Ana, Costa Rica

Con el objetivo de mantener la línea de sostenibilidad en el modelo, se utilizaría ventanearía con marcos de madera, reduciendo el impacto ambiental que generan los marcos de materiales convencionales como el aluminio y los polímeros.

Para el tambor donde se apoya la estructura geodésica se determinó que el material a utilizar sería el cáñamo, al ser una excelente alternativa al concreto convencional gracias a sus propiedades mecánicas y su bajo impacto ambiental. Si bien es cierto que su precio en comparación al concreto convencional es elevado, es probable que este disminuya en el futuro gracias a la aprobación del proyecto de Ley N. 21.388 que permitirá su cultivo para usos industriales, lo que permitiría a las empresas reducir sus costos de producción al no tener que importar la materia prima.

Finalmente, los aleros colocados en las ventanas de la vivienda se construirían en bambú, como se ejemplifica a continuación en la Figura 25. Este material aportaría protección contra la radiación solar directa y la lluvia.



Figura 25. Ejemplo de aleros de bambú en construcción

Fuente: Escobedo, 2019

CAPÍTULO 4. MODELO DESARROLLADO

4.1 Diseño arquitectónico

El diseño del modelo de vivienda geodésica inició en el programa AutoCAD, obedeciendo lo estipulado en la Directriz N° 27, por lo que a partir de esta se obtuvieron las dimensiones principales del domo, como lo son su radio y el área de su base. Se seleccionó un radio de esfera de 3,65 m para obtener una base de 42 m², siendo esta dimensión la mínima establecida para núcleos familiares de menos de cinco miembros. Además, la Directriz N° 27 establece otros lineamientos como cantidad mínima de cuartos con sus respectivas áreas, cantidad de puertas, materiales para paredes internas, ventilación e iluminación natural, etc. Se realizó la distribución arquitectónica mostrada en Figura 26 cumpliendo con dichos lineamientos previamente mencionados en el Capítulo 2.

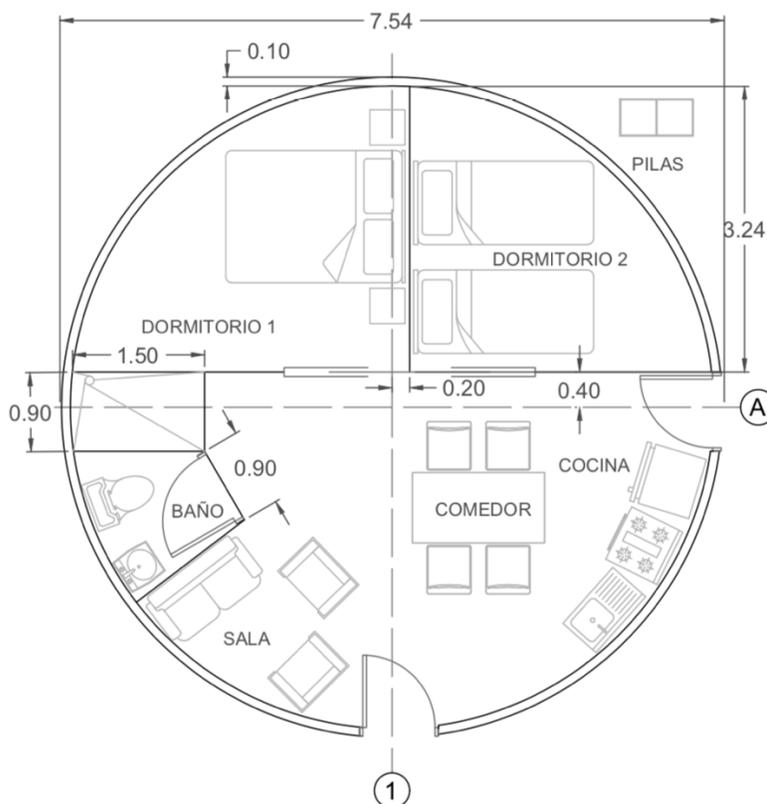
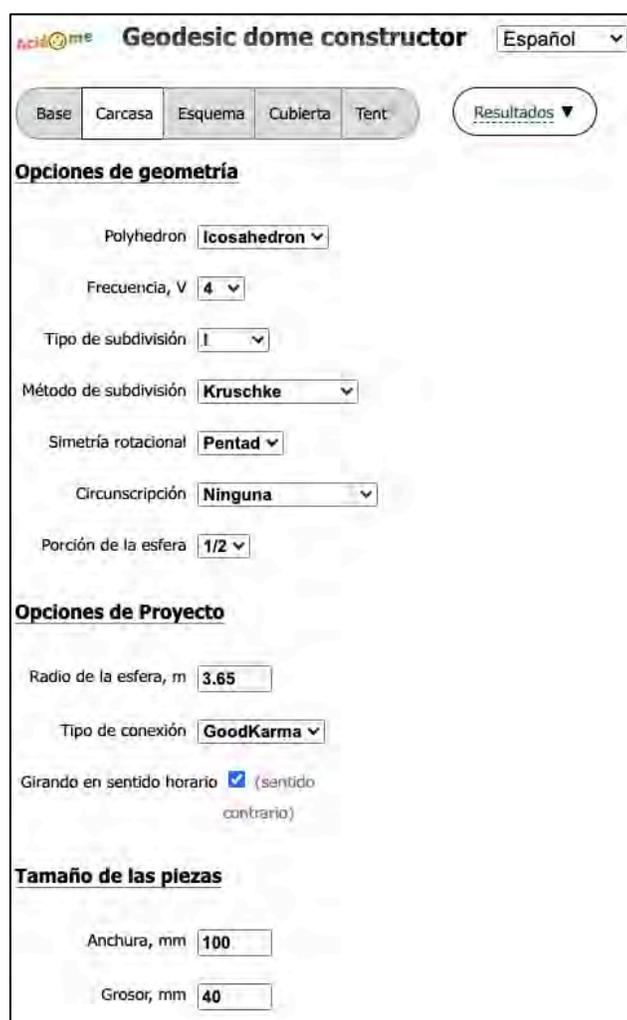


Figura 26. Distribución arquitectónica del primer nivel (cotas en metros)

Para el diseño de la estructura geodésica como tal, se utilizó el software libre Acidome, el cual genera un modelo exportable al programa SketchUp, donde se procedió a realizar el modelo tridimensional del domo. Se decidió realizar el modelado en SketchUp para aprovechar el modelo generado en Acidome y así agilizar el proceso.

El programa Acidome es una interfaz gratuita en línea, en donde se insertan los parámetros y dimensiones deseadas para la estructura geodésica y este automáticamente genera el modelo tridimensional. En la Figura 27 se observan los parámetros utilizados. Además, este genera una tabla de resultados, mostrada en la Figura 28, con parámetros como alturas y radios, y detalles bidimensionales de las barras que componen el domo.



The image shows the user interface of the 'Geodesic dome constructor' software. At the top, there is a navigation menu with buttons for 'Base', 'Carcasa', 'Esquema', 'Cubierta', and 'Tent', along with a 'Resultados' button. The interface is set to 'Español'. The main area is divided into three sections: 'Opciones de geometría', 'Opciones de Proyecto', and 'Tamaño de las piezas'. Each section contains various dropdown menus and input fields for configuring the dome's geometry and construction details.

Section	Parameter	Value
Opciones de geometría	Polyhedron	Icosahedron
	Frecuencia, V	4
	Tipo de subdivisión	1
	Método de subdivisión	Kruschke
	Simetría rotacional	Pentad
	Circunscripción	Ninguna
	Porción de la esfera	1/2
Opciones de Proyecto	Radio de la esfera, m	3.65
	Tipo de conexión	GoodKarma
	Girando en sentido horario	<input checked="" type="checkbox"/> (sentido contrario)
Tamaño de las piezas	Anchura, mm	100
	Grosor, mm	40

Figura 27. Parámetros de diseño utilizados en el programa Acidome

Resultados ▼	
Altura desde la base, m	3.65
Radio de la base, m	3.65
Área de la base, m ²	41.17
Área de la cubierta, m ²	82.08
Tamaños (unidades)	
Caras	6 (160)
Aristas	16 (480)
Vértices	4 (91)
Travesaños 100x40mm	
Longitud total de los travesaños, m	498.81
Volumen total de los travesaños, m ³	1.92
Longitud del travesaño, mm	762-1155
Ángulo entre caras, °	168.93-171.11
Triángulos	
Altura mín., mm	658-1027
Longitud máx. del lado, mm	947-1202

Figura 28. Resultados obtenidos del programa Acidome

Se seleccionó una frecuencia de 4 ya que así se obtiene un ángulo más recto en la base del domo, lo que aporta mayor comodidad para los inquilinos a la hora de acercarse a las paredes. Se seleccionó el método de división Kruschke para obtener la menor cantidad de piezas y triángulos diferentes, facilitando el proceso de prefabricación del domo. De esta manera se obtienen solo 6 tipos de triángulos, los cuales se observan de la Figura 29 a la Figura 34. El parámetro de "porción de la esfera" determina el punto en el que se trunca la esfera para generar el domo, y se determinó que lo más eficiente en términos constructivos es truncar la esfera a la mitad y elevarla sobre un tambor de concreto de cáñamo.

Seguidamente se seleccionó el tipo de conexión de las piezas, y se determinó que el tipo GoodKarma, mostrado en la Figura 11, es el más adecuado ya que no necesita de elementos de conexión extra. Finalmente se determinó la anchura y el grosor de las piezas, las cuales pueden observarse en el Anexo 1. En la Figura 35 se observa el modelo tridimensional generado en Acidome.

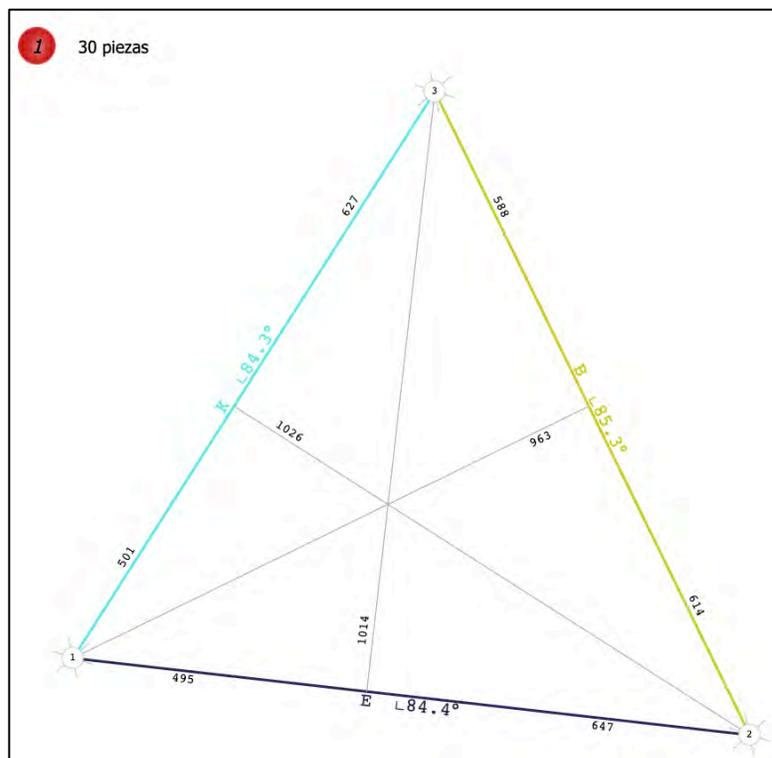


Figura 29. Esquema de triangulo 1 (cotas en milímetros)

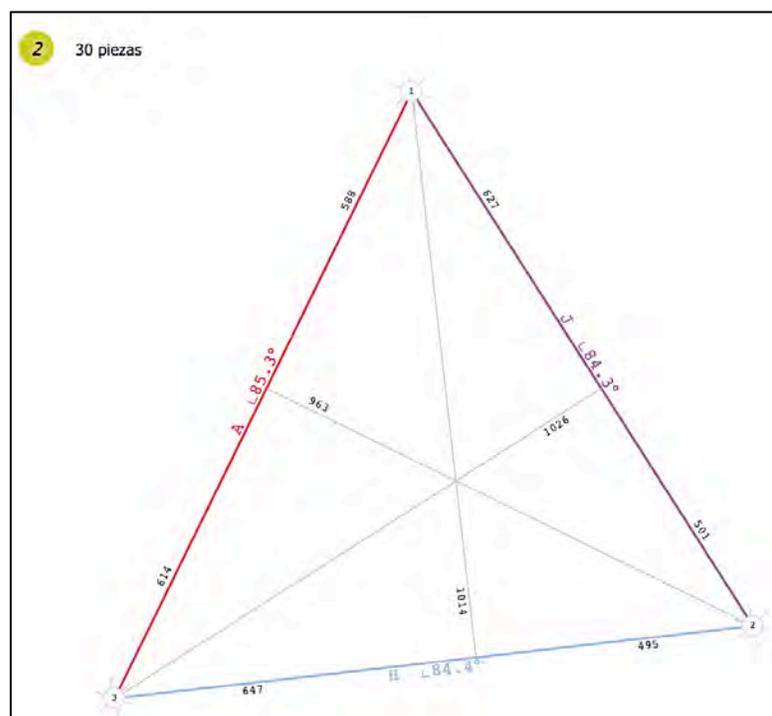


Figura 30. Esquema de triangulo 2 (cotas en milímetros)

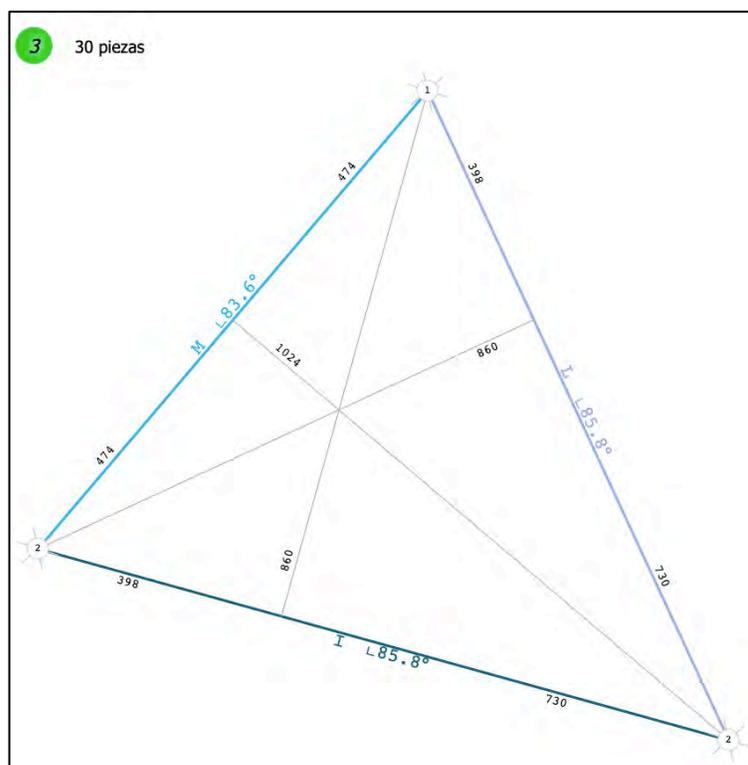


Figura 31. Esquema de triángulo 3 (cotas en milímetros)

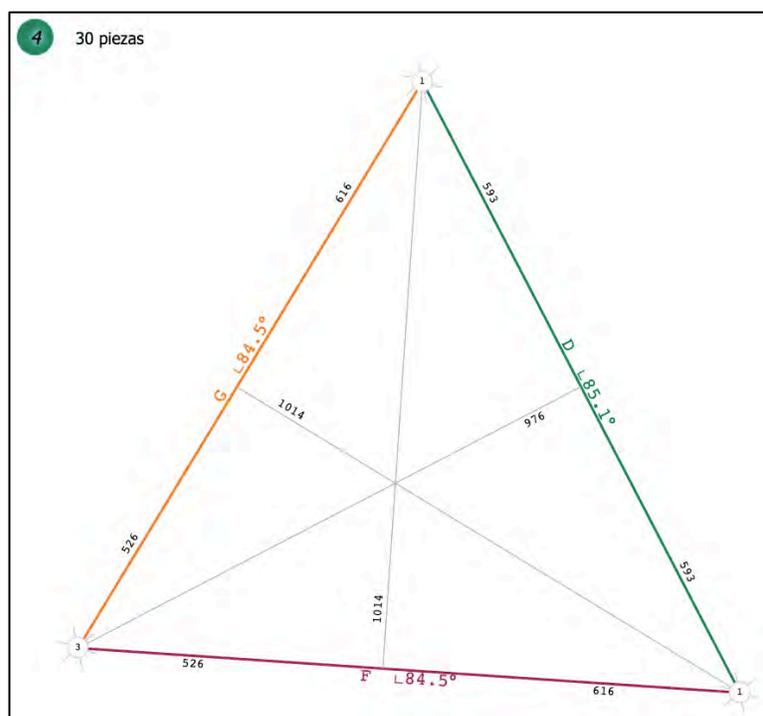


Figura 32. Esquema de triángulo 4 (cotas en milímetros)

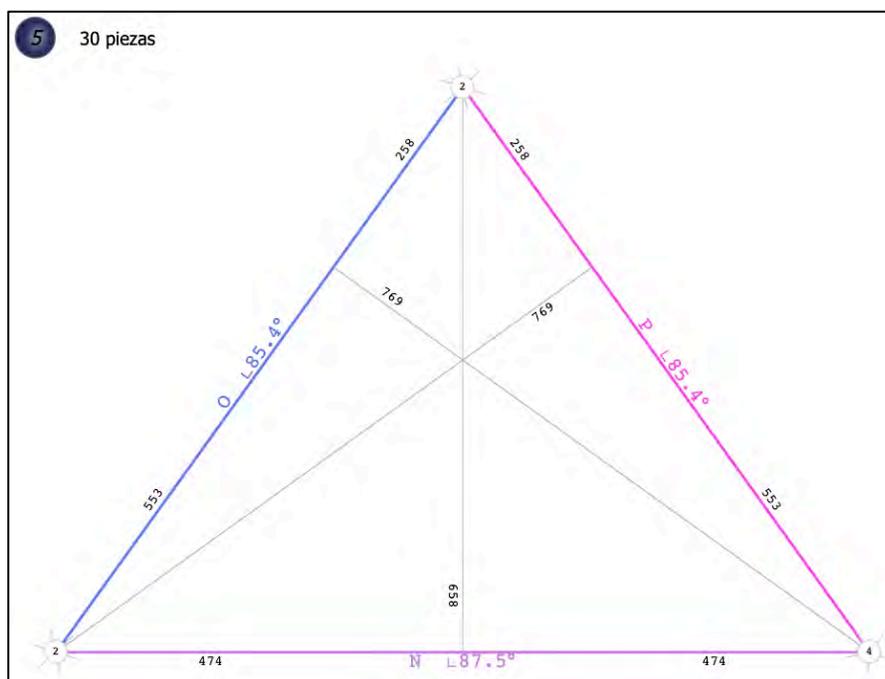


Figura 33. Esquema de triangulo 5 (cotas en milímetros)

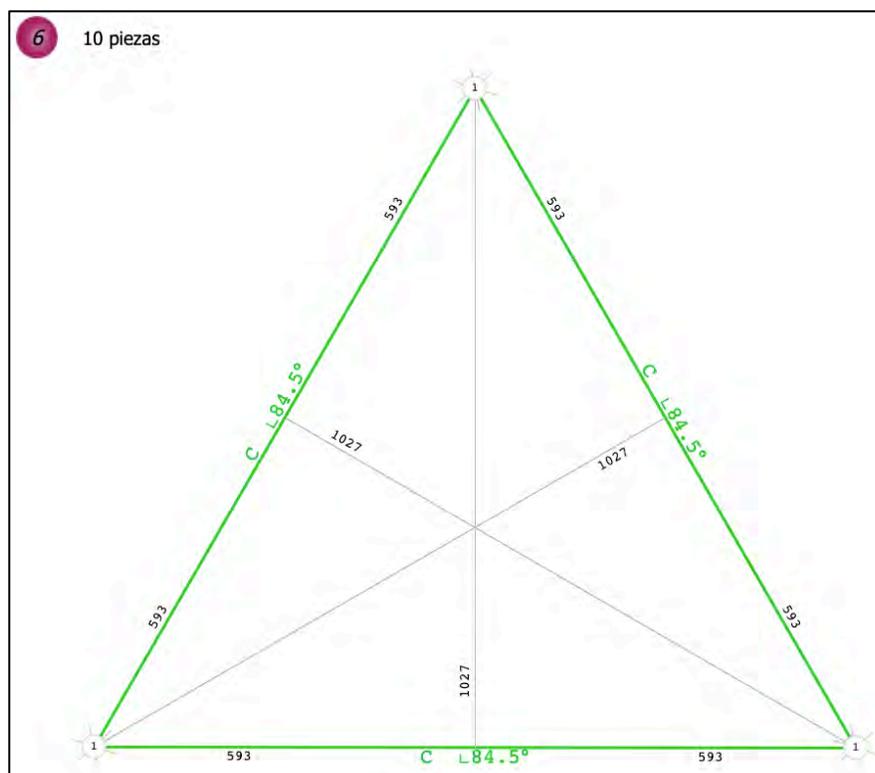


Figura 34. Esquema de triangulo 6 (cotas en milímetros)

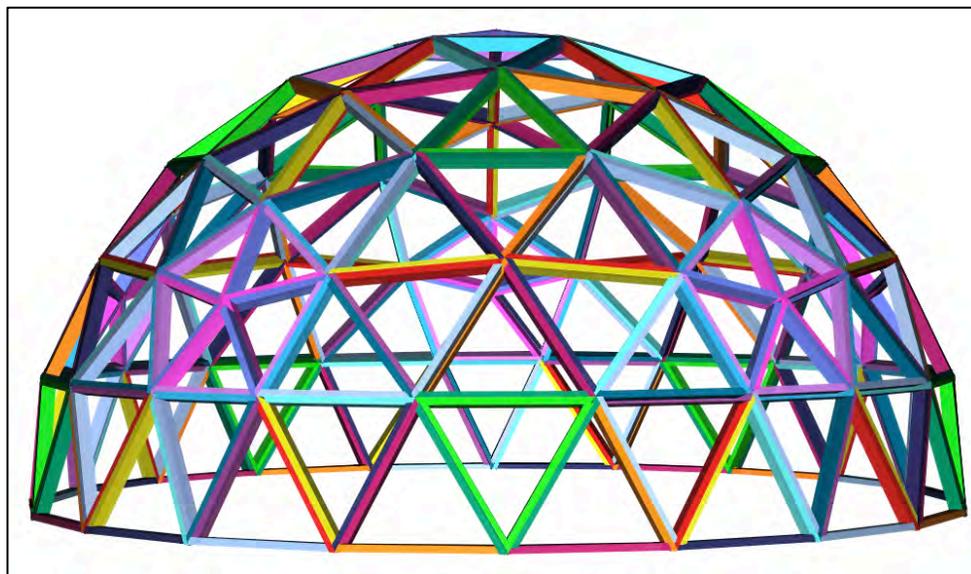


Figura 35. Modelo generado en el programa Acidome

Gracias a la altura obtenida en el domo, el espacio interior es más aprovechable si se coloca un mezanine sobre los dormitorios y el baño. Al hacer esto el área de construcción útil aumenta y se aprovecha más el espacio interno. A continuación, se observa en la Figura 36 la vista en planta de la ubicación del mezanine, el cual puede utilizarse como dormitorio extra o área común.

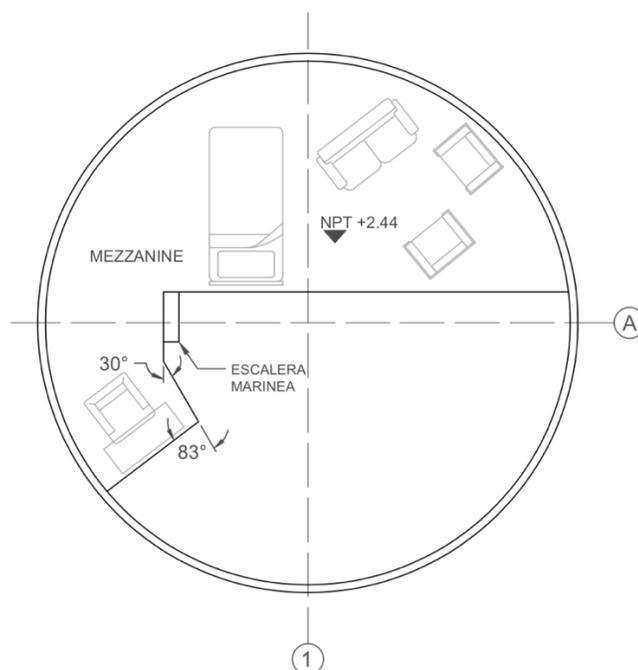


Figura 36. Vista en planta del mezanine (sin escala)

Además de lo establecido en la Directriz N° 27, el modelo debe cumplir con las dimensiones mínimas de áreas establecidas en el Reglamento de Construcciones. A continuación, se resumen en el Cuadro 5 las áreas de los espacios respectivos del modelo, obtenidas de AutoCAD.

Cuadro 5. Áreas de la distribución arquitectónica del modelo

Espacio	Área del modelo (m ²)	Área establecida por el Reglamento de Construcciones (m ²)
Dormitorio 1	9,66	9,00
Dormitorio 2	8,36	7,50
Baño	3,47	NA
Sala	8,45	6,50
Cocina-Comedor	11,92	5,00
Mezanine	18,78	NA
Total	60,64	

El Reglamento de Construcciones también define áreas mínimas para las ventanas de una vivienda, por lo que se verifica que las ventanas del modelo cumplan con lo estipulado. En el Cuadro 6 se resume dicha verificación.

Cuadro 6. Verificación de relación de área de ventanería del modelo

Ventanería	Área del modelo (m ²)	Relación obtenida en el modelo	Relación de área establecida por el Reglamento de Construcciones
Ventana dormitorio 1	2,43	25 %	15 %
Ventana dormitorio 2	2,43	25 %	15 %
Ventana baño	0,99	28 %	10 %
Ventana cocina	2,59	22 %	15 %

Para finalizar la conceptualización del modelo de vivienda geodésica, es importante contar con renderizaciones de alta calidad, que permitan visualizar las características mencionadas anteriormente. A continuación, se observa desde la Figura 37 a la Figura 41 las principales vistas del modelo, generadas a partir del programa SketchUp.

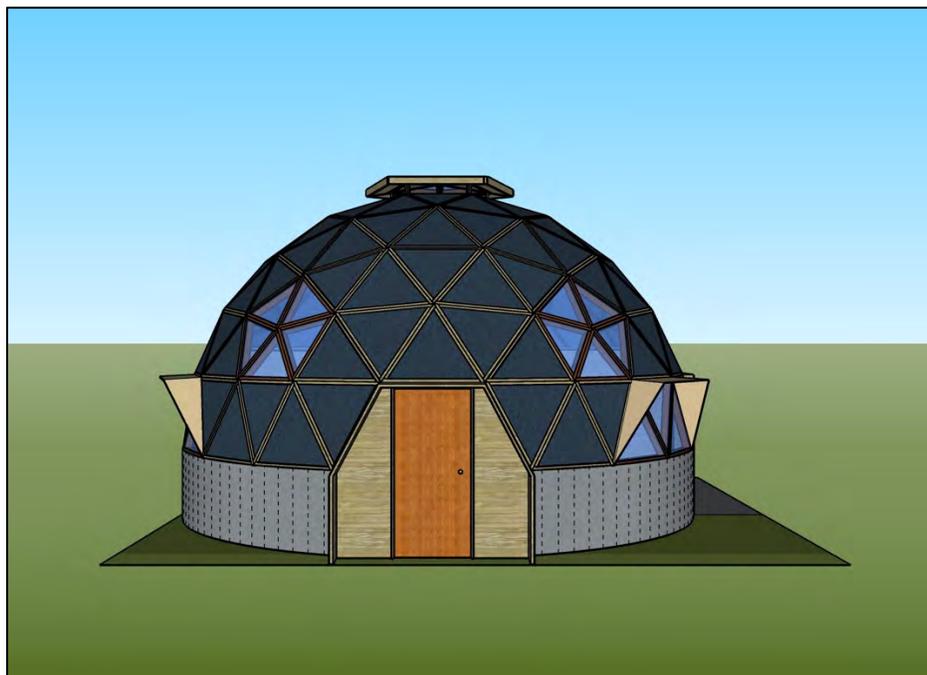


Figura 37. Vista Frontal del modelo

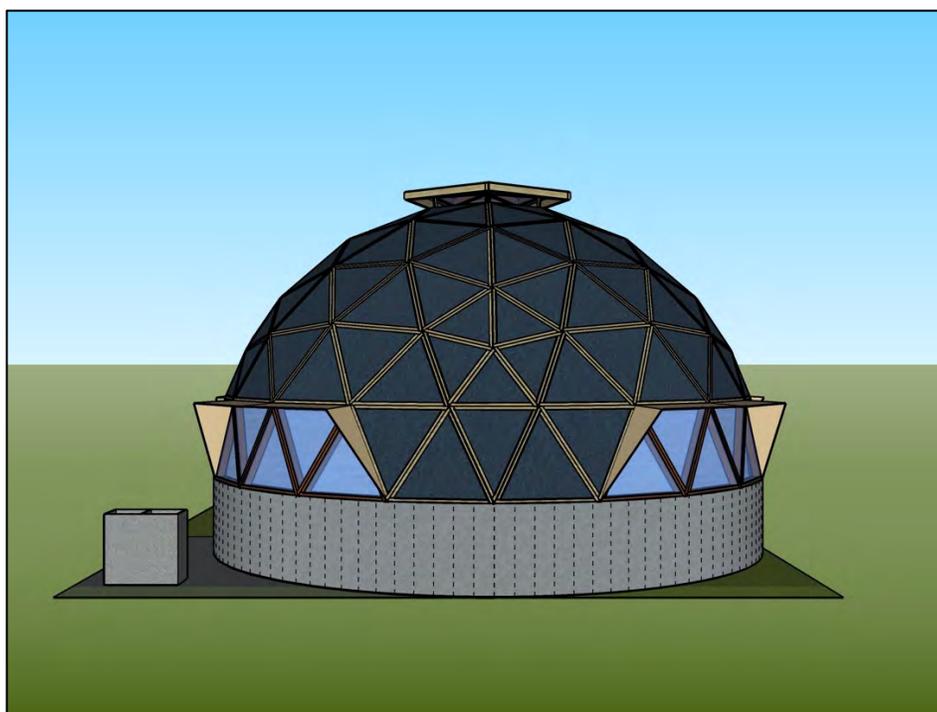


Figura 38. Vista trasera del modelo

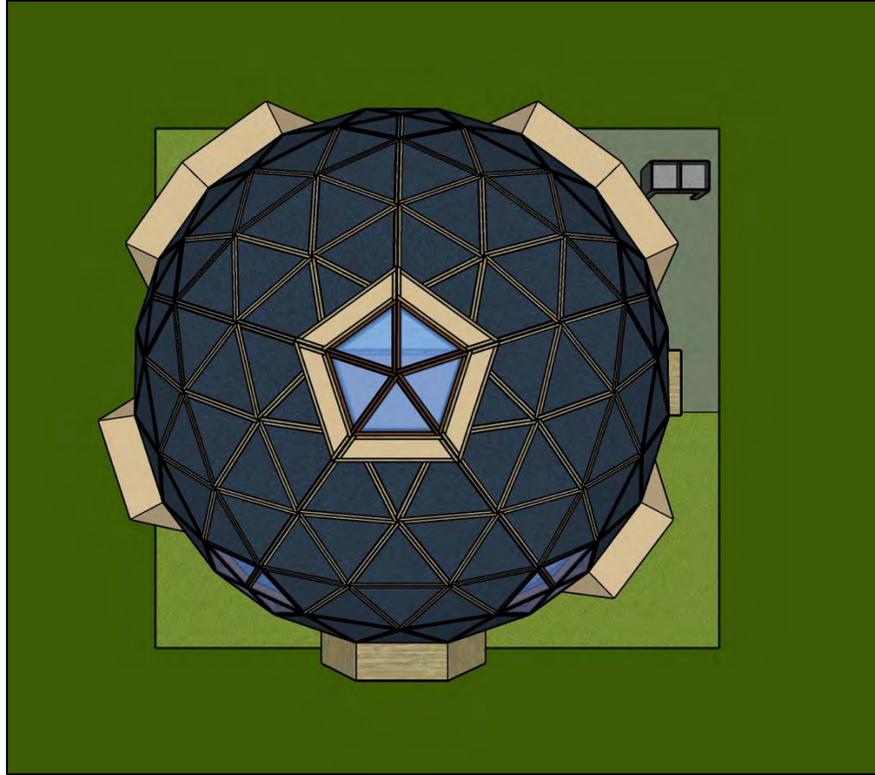


Figura 39. Vista superior del modelo

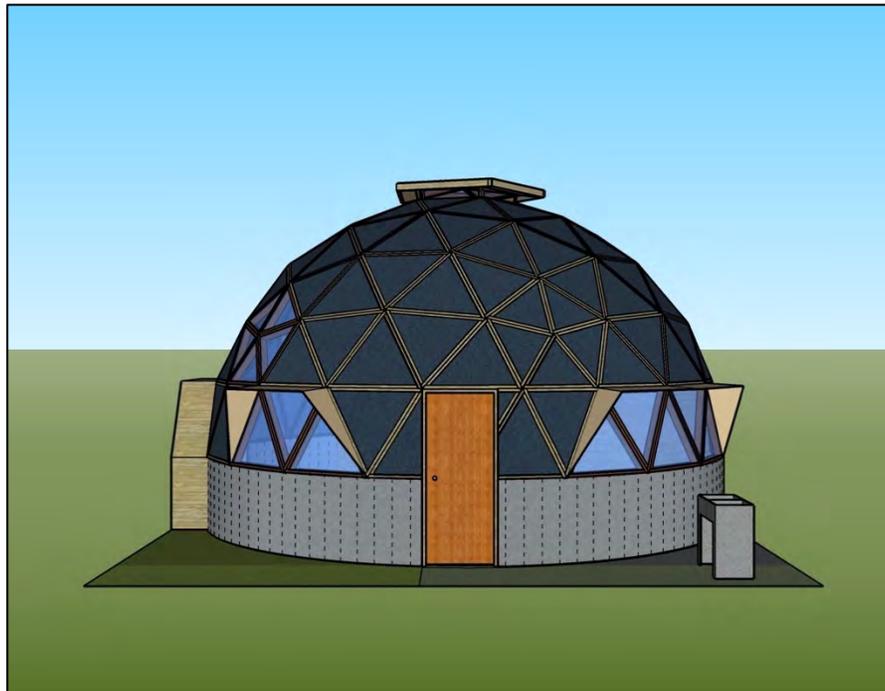


Figura 40. Vista lateral derecha del modelo

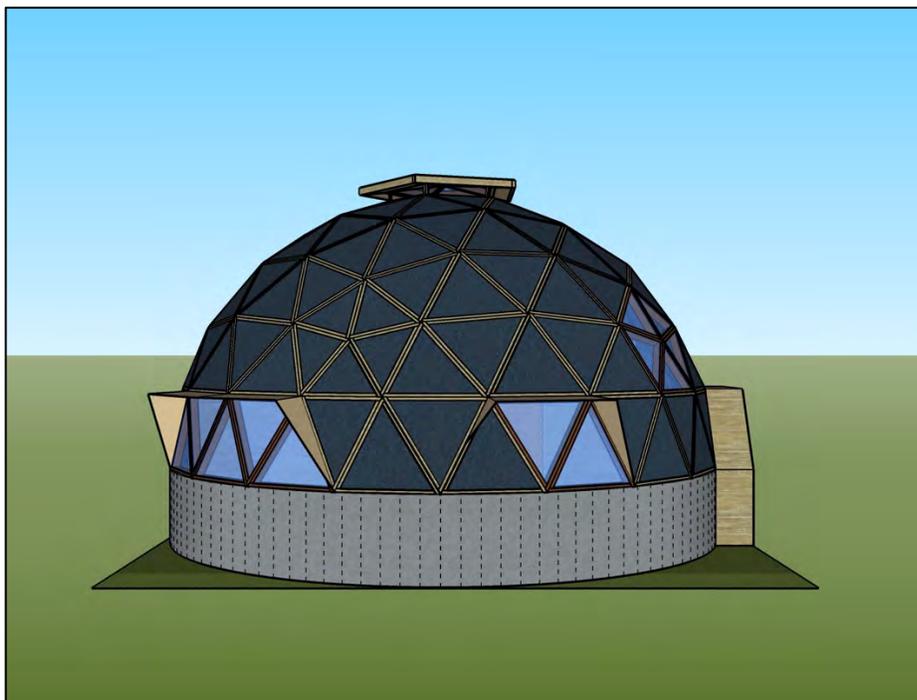


Figura 41. Vista lateral izquierda del modelo

De igual manera, se muestra en la Figura 42 al área que cubre el mezanine, y el lugar donde se colocaría una escalera marinera para su acceso.

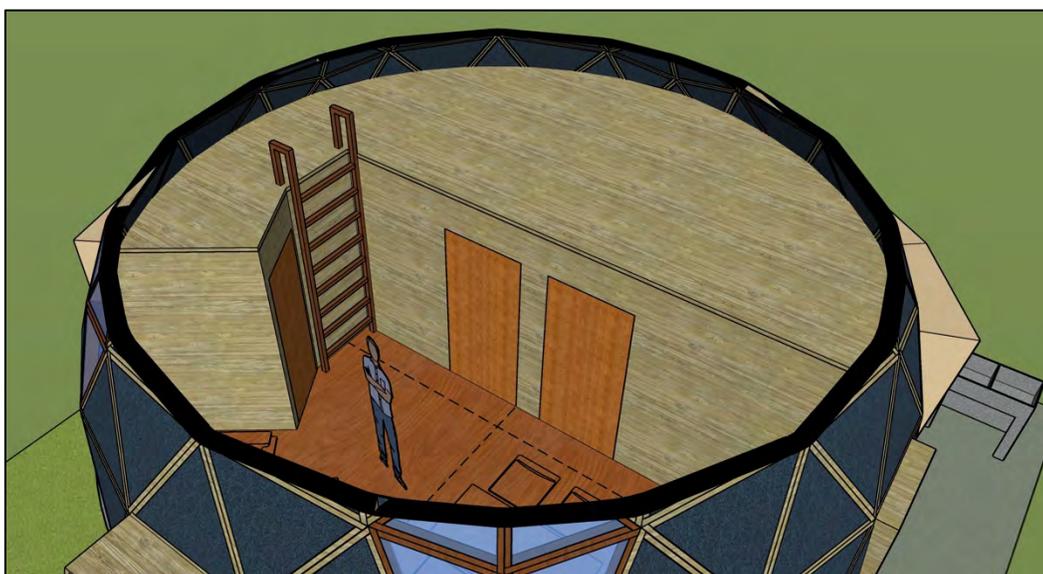


Figura 42. Vista en corte del mezanine

En la vivienda geodésica, al tener una forma circular, se disminuye la cantidad de paredes internas y se opta por un diseño de espacios mejor integrados, de esta manera se reduce la

cantidad de material de construcción, reduciendo la huella de carbono resultante. En la Figura 43 se observa la ubicación de las paredes internas del modelo.

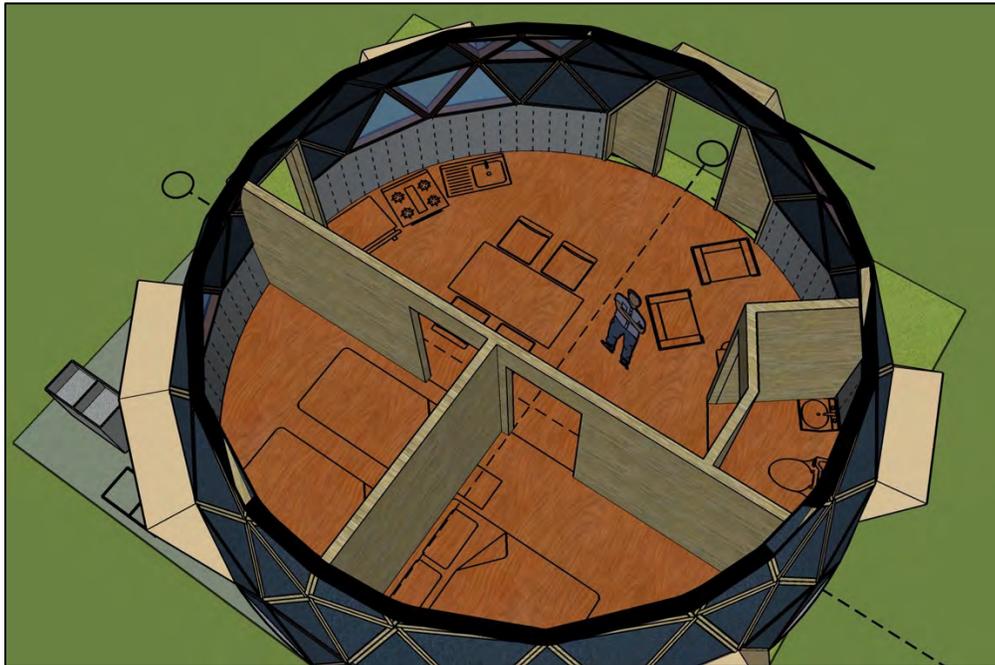


Figura 43. Vista en corte de las paredes internas del modelo

4.2 Análisis estructural preliminar

El diseño estructural del modelo quedó fuera del alcance, sin embargo, se realizó una verificación rápida para determinar cual fuerza rige el diseño estructural, si la fuerza sísmica o la fuerza cortante ejercida por el viento. A continuación, se muestra el cálculo obtenido para el análisis por viento, calculado a una altura de 1 m sobre el suelo, donde se ubicarían los pernos que anclan la estructura geodésica al tambor.

Se utilizó el procedimiento establecido en los Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica, con ayuda del Anexo A mostrado en la Figura 44 y los parámetros geométricos del modelo mostrados en el Cuadro 7.

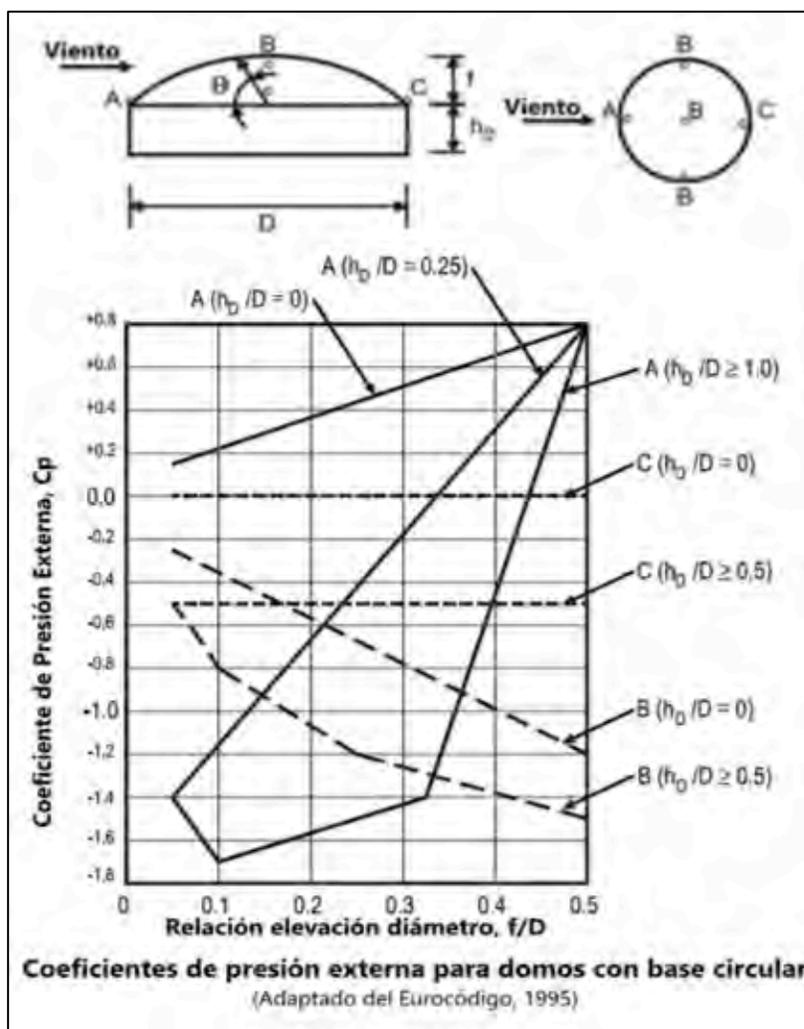


Figura 44. Coeficientes de presión externa para techos en forma de domo

Fuente: Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica, 2020

Cuadro 7. Parámetros geométricos del modelo para el análisis de viento

Parámetro	Valor
D	7,30 m
f	3,65 m
h_D	1,00 m

Al realizar el cálculo se asumieron los siguientes puntos:

- La vivienda geodésica se ubica en Santa Cruz, Guanacaste
- La vivienda es una edificación rígida cerrada
- El periodo natural de la vivienda es menor a 1 s
- El techo de la vivienda es arqueado
- La vivienda se encuentra en una zona con poco o nulo relieve por lo que el coeficiente topográfico (C_t) es 1
- Valor de $Z = 2,83$ m

En primer lugar, se clasificó la edificación según la Tabla 4.1. del Código Sísmico de Costa Rica 2010/14 como una edificación de ocupación normal, por lo que se le otorga una categoría III según la Tabla 2-1 de los Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica.

En segundo lugar, partiendo de la categoría de diseño por viento, se estableció un periodo de retorno (T_R) de 700 años para un nivel de demanda alta.

Seguidamente, se asignó la zonificación a la cual pertenece la vivienda de acuerdo con la ubicación asumida. El cantón asumido pertenece a la zona IV, por lo que se utiliza una velocidad básica de viento (V_b) de 125 km/h.

Como cuarto paso, se determinó la presión básica del viento utilizando la Ecuación 1.

$$q_b = 0,005 * V_b^2 \quad (1)$$

$$q_b = 0,005 * 125^2 = 78,13 \text{ kg /m}^2$$

Posteriormente se procedió a obtener los coeficientes necesarios para el cálculo de la presión de diseño con la Ecuación 2.

$$q(Z) = q_b * C_e(Z) * C_r * C_t * C_d \quad (2)$$

- Coeficiente de exposición: calculado con la Ecuación 3

$$C_e(Z) = 2,01 * \left(\frac{Z}{Z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}} \geq 2,01 * \left(\frac{Z_{min,e}}{Z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}} \quad (3)$$

Valores calculados según Tabla 3-2 de los Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica:

$$Z_{ge} = 274 \text{ m}$$

$$Z_{min,e} = 4 \text{ m}$$

$$\alpha_e = 9,5$$

$$C_e(Z) = 2,01 * \left(\frac{2,83}{274}\right)^{\frac{2}{9,5}} \geq 2,01 * \left(\frac{4}{274}\right)^{\frac{2}{9,5}}$$

$$C_e(Z) = 0,77 \geq 0,83$$

Según indica la formula, se utilizó el valor de $C_e(Z) = 0,83$.

- Coeficiente de recurrencia: calculado según la Tabla 3-3 de los Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica utilizando la Ecuación 4

$$C_r = [0,36 + 0,1 * \ln(12 * T_R)]^2 \quad (4)$$

$$C_r = [0,36 + 0,1 * \ln(12 * 700)]^2$$

$$C_r = 1,597$$

- Coeficiente de direccionalidad: calculado según la Tabla 3-5 de los Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica

$$C_d = 0,85$$

Una vez obtenidos los coeficientes se calculó la presión de diseño con la Ecuación 2.

$$q(Z) = 78,125 * 0,83 * 1,597 * 1 * 0,85 = 87,53 \text{ kg/m}^2$$

Presión a barlovento

Se calculó la presión neta con la Ecuación 5.

$$P = q * G * C_p - q_i * (GC_{pi}) \quad (5)$$

Para esto se asumió lo siguiente:

$$q = q(Z) = q_i$$

$$G = 0,85$$

$$GC_{pi} = -0,18$$

Se calculó el coeficiente de presión externa según la Figura 44.

$$\frac{f}{D} = \frac{3,65 \text{ m}}{7,3 \text{ m}} = 0,5$$

$$\frac{h_D}{D} = \frac{1}{7,3} = 0,137$$

$$C_p = +0,8$$

$$P = 87,53 * 0,85 * 0,8 - 87,53 * (-0,18)$$

$$P = 75,27 \text{ kg/m}^2$$

Presión a sotavento

Se calculó la presión neta con la Ecuación 5.

$$P = q * G * C_p - q_i * (GC_{pi})$$

Para esto se asumió lo siguiente:

$$q = q(Z) = q_i$$

$$G = 0,85$$

$$GC_{pi} = +0,18$$

Se calculó el coeficiente de presión externa según la Figura 44.

$$\frac{f}{D} = \frac{3,65 \text{ m}}{7,3 \text{ m}} = 0,5$$

$$\frac{h_D}{D} = \frac{1}{7,3} = 0,137$$

$$C_p = -0,14$$

$$P = 87,53 * 0,85 * -0,14 - 87,53 * (+0,18)$$

$$P = -5,34 \text{ kg/m}^2$$

Al sumar las fuerzas generadas a barlovento y a sotavento se obtuvo una presión neta de 80,61 kg/m². Finalmente se procedió a calcular la fuerza cortante al multiplicar la presión de neta por el área efectiva que incluye el techo del domo.

$$\text{Área efectiva} = \frac{4 * \pi * r^2}{4}$$

$$\text{Área efectiva} = \frac{4 * \pi * 3,65^2}{4} = 41,85 \text{ m}^2$$

$$\text{Fuerza cortante en la base} = 41,85 \text{ m}^2 * 80,61 \text{ kg/m}^2 = 3373,53 \text{ kgf}$$

Seguidamente, se muestra el cálculo del cortante sísmico. Al realizar el cálculo se asumieron los siguientes puntos:

- Zona sísmica III
- Tipo de suelo S₃
- Ductilidad global asignada 1.0 al ser estructura tipo otros según la Figura 45

Sistema estructural tipo otros					
Tipo	Regular	Irregular	Ductilidad local óptima	Ductilidad local moderada	Ductilidad global asignada
otros a	X		X		1.0
otros b	X			X	1.0
otros c		X	X		1.0
otros d		X		X	1.0

Figura 45. Ductilidades globales asignadas para estructuras tipo otros

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica 2010/14

El coeficiente sísmico se calculó según la Ecuación 6 obtenida del CSCR 2010/14 mostrada a continuación.

$$C = \frac{a_{ef} * I * FED}{SR} \quad (6)$$

La aceleración pico efectiva (a_{ef}) se obtiene de la Figura 46.

Tipo de sitio	Zona II	Zona III	Zona IV
S_1	0.20	0.30	0.40
S_2	0.24	0.33	0.40
S_3	0.28	0.36	0.44
S_4	0.34	0.36	0.36

Figura 46. Aceleración pico efectiva de diseño

Fuente: CSCR 2010/14

El factor de importancia (I) es de 1,0 al ser una edificación de ocupación normal, según se establece en la Tabla 4.1 del CSCR 2010/14.

La sobrerresistencia (SR) tiene un valor de 1,2 al ser una estructura tipo otros, según se establece en el Capítulo 5 del CSCR 2010/14.

El Factor Espectral Dinámico (FED) se obtuvo a partir de la Figura 47. Como se busca obtener el mayor coeficiente sísmico, se utiliza el valor más alto, siendo 2,5 en este caso.

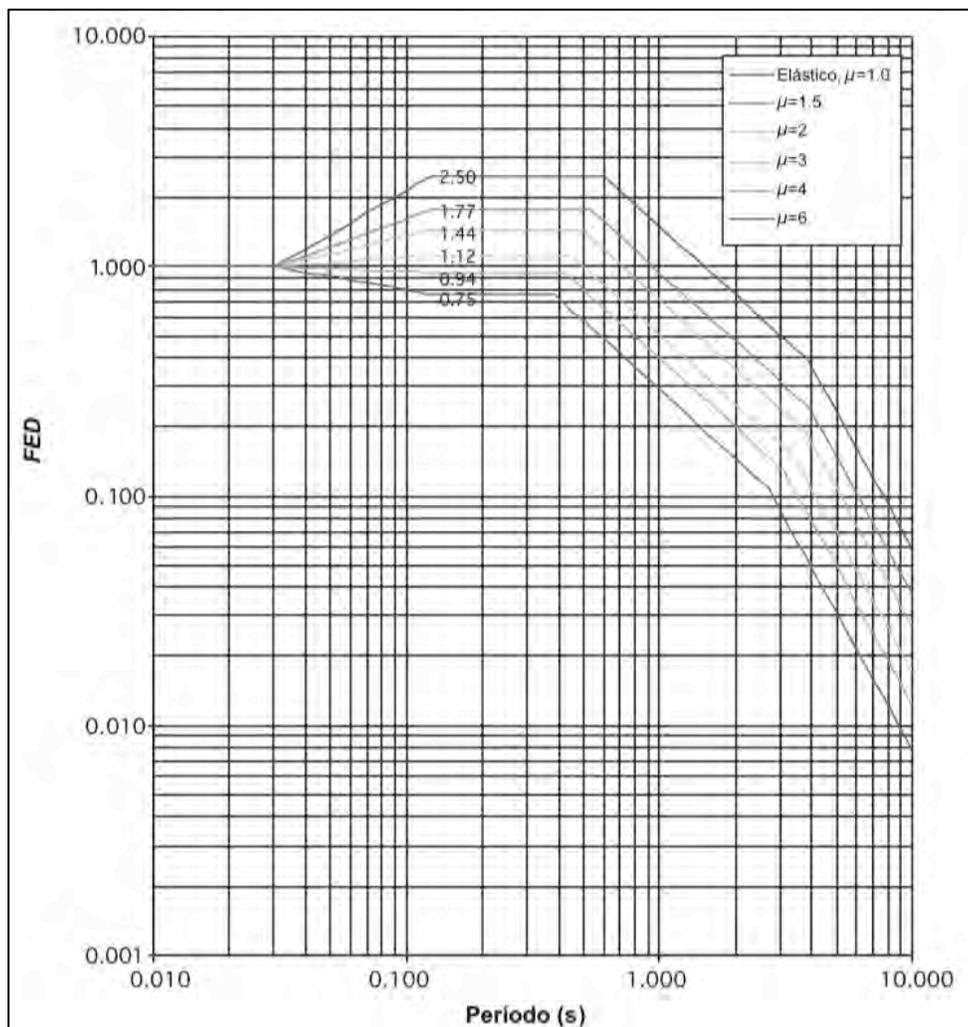


Figura 47. Factor espectral dinámico para sitios con cimentación tipo S_3 en zona sísmica III

Fuente: CSCR 2010/14

Finalmente se calculó el coeficiente sísmico con la Ecuación 6 y se obtuvo el siguiente resultado:

$$C = \frac{a_{ef} * I * FED}{SR} = \frac{0,36 * 1 * 2,5}{1,2} = 0,75$$

Seguidamente se procedió a calcular el peso de la estructura, el cual se consideró como la masa sísmica para el cálculo del cortante en la base. En este caso, de forma conservadora, se incluyó el peso total de la estructura de madera (la cual se apoyaría sobre un muro de concreto a 1,0 m sobre el nivel del suelo), así como el peso tributario del mezanine interno y sus respectivas cargas.

La estructura geodésica de madera tiene un volumen total de 1,92 m³ según se observa en la Figura 28, esto sin tomar en cuenta que se eliminan varias piezas de madera para colocar el pórtico, las puertas externas y que no está incluido el volumen de los elementos que conforman el tragaluz.

Con ayuda del programa SketchUp se obtienen los volúmenes restantes y se ajusta el valor total de volumen de madera para efectos sísmicos, siendo este de 2,18 m³. Como las paredes internas no están ancladas a la cúpula del domo, que en este caso es el techo, no se toma en cuenta su masa. El pino amarillo tiene un peso específico de 600 kg/m³, por lo que se obtuvo un peso total de 1308 kg de madera (Vega, 2014).

A este valor se le agregó el peso de los sistemas electromecánicos, el cual se tomó como 5 kg/m². La cúpula tiene un área de 82,08 m² según se observa en la Figura 28, por lo que se obtiene un peso de sistemas electromecánicos de 410,4 kg. A continuación, se resume la composición de la carga permanente en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Resumen de cargas permanentes

Elemento	Peso (kg)
Estructura de madera	1308,0
Sistemas electromecánicos	410,4
Total	1718,4

Para el cálculo de las cargas temporales se realizó el siguiente análisis. Se tomó el valor de 40 kg/m² para techos tipo otros según lo establece el CSCR 2010/14 en la Figura 48. Además, debido a que el modelo cuenta con un mezanine, a este se le otorgó una carga de temporal de habitación de 200 kg/m² y se distribuyó según el área tributaria.

El área tributaria del mezanine se calculó según la distancia promedio de la cúpula a las paredes internas y se obtuvo un resultado de 7,25 m². Al multiplicar el área por la carga de habitación se obtuvo un total de 1450 kg.

Destino del piso	Carga temporal (kg/m ²)
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares).	200
Oficinas, despachos, laboratorios, salones de lectura, aulas, salas de juego y similares.	250
Escaleras, rampas, vestíbulos y pasajes de libre acceso al público.	400
Lugares de reunión desprovistos de asientos fijos, estadios, salones de baile, etc.	500
Bibliotecas y salones de archivo.	500
Lugares de reunión con asientos fijos, templos, cines, teatros, gimnasios, etc.	400
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía ligera.	500
Comercios, bodegas y fábricas de mercancías con <i>peso</i> intermedio.	650
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía pesada.	800
Techos de fibrocemento, láminas de acero galvanizado y otros.	40
Azoteas con pendiente superior al 5 por ciento.	100
Azoteas con pendiente inferior o igual al 5 por ciento.	200
Voladizos en vía pública (marquesinas, balcones y similares).	300
Garajes y aparcamientos (para automóviles exclusivamente).	300

Figura 48. Cargas temporales unitarias mínimas

Fuente: CSCR 2010/4

Para el área del techo se tomó como un cuarto de la esfera, para un valor de 41,04 m². Seguidamente al multiplicar estos valores se obtuvo un peso de carga temporal de 1641,6 kg. En el Cuadro 9 se resume el valor de las cargas gravitacionales.

Cuadro 9. Resumen de cargas gravitacionales

Carga	Valor (kg)
Permanente	1718,4
Temporal mezanine	1450,0
Temporal techo	1641,6

La sección 6.1.3 del CSCR 2010/14 establece que el peso de la edificación (W) para efectos sísmicos, es la suma su carga permanente más una fracción de su carga temporal. En este caso se utilizó una fracción del 0% para el techo y 15% para el mezanine.

$$W = \text{Carga permanente} + 0,15 * \text{Carga temporal mezzanine}$$

$$W = 1718,4 \text{ kg} + 0,15 * 1450 \text{ kg} = 1936 \text{ kg}$$

Finalmente se procedió a calcular el cortante sísmico con la Ecuación 7.

$$V = C * W \quad (7)$$

$$V = 0,75 * 1936 \text{ kg} = 1452 \text{ kgf}$$

Como se puede observar, se obtuvo un valor de cortante sísmico en la base significativamente menor que el valor de la fuerza cortante ejercida por el viento, por lo que se comprobó que en el diseño estructural del modelo rige el análisis de viento gracias a que es una estructura relativamente liviana. Es importante recalcar que el diseño estructural detallado se debe realizar de acuerdo con la zona donde se ubique el proyecto.

4.3 Diseño bioclimático

Como se mencionó en el Capítulo 2, uno de los pilares fundamentales de la arquitectura bioclimática es el estudio intensivo del clima y las condiciones del entorno físico donde se ubica el proyecto. En este caso, al estar trabajando con un prototipo de vivienda, no se cuenta con una ubicación física específica, sin embargo, en este apartado se proponen estrategias pasivas dirigidas a las zonas de vida de Holdrige donde predominan las altas temperaturas y se busca la disipación del calor y la reducción de la transferencia térmica sin utilizar sistemas mecánicos. A continuación se presentan algunas estrategias incluidas en el diseño del modelo de vivienda geodésica.

4.3.1 Cámara de aire

Alfaro, Aymerich, Blanco, Bolaños, Campos, y Matarrita (2013), proponen utilizar cámaras de aire aislado de 10 cm a 15 cm de espesor dentro de estructuras sólidas como se muestra en la Figura 49. Con esta estrategia se busca aumentar la resistencia térmica de la envolvente. Esta

4.3.3 Disipación por abertura

Esta estrategia consiste en la disipación del aire caliente por convección a través de aberturas en el techo de la edificación. Es por esta razón que se incluyó en el diseño un tragaluz elevado en el centro de la cúpula del domo, abierto totalmente para que el flujo del aire se maximice, como se muestra en la Figura 51. De esta manera se aprovecha el fenómeno de la convección para evacuar las corrientes de aire caliente.

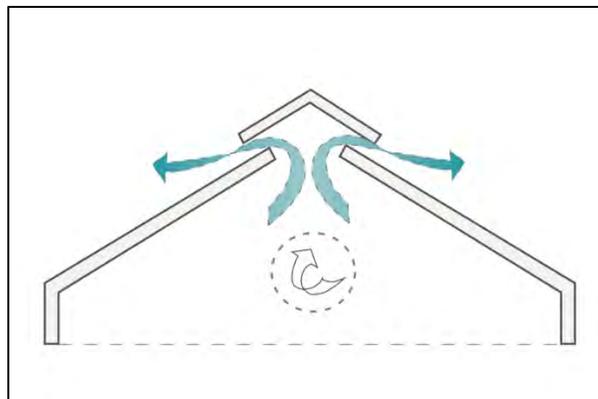


Figura 51. Ejemplo de flujo de aire por abertura

Fuente: Alfaro et al., 2013

A continuación se muestra en la Figura 52 el detalle del tragaluz ubicado en el centro de la cúpula del domo, el cual estaría cubierto con una malla mosquitera para evitar el ingreso de insectos y cualquier otro animal a la vivienda.

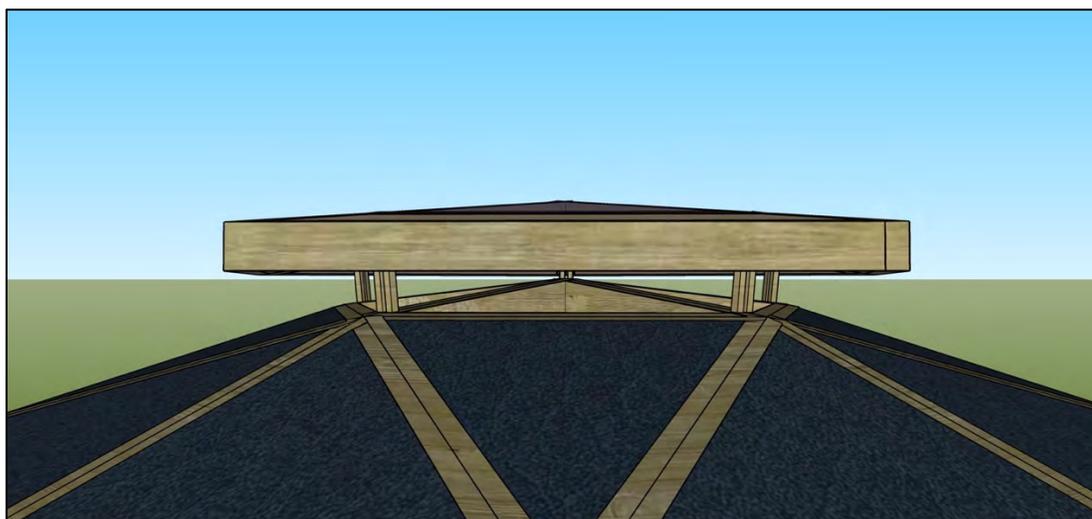


Figura 52. Detalle de tragaluz en la cúpula del domo

4.3.4 Ventilación natural

Se recomienda que todas las ventanas sean abatibles para maximizar la efectividad de la ventilación natural y aumentar el confort térmico dentro de la vivienda en las horas en las cuales se recibe la máxima radiación solar. En la Figura 53 se observan los distintos índices de efectividad de ventilación que tiene una ventana dependiendo de su sistema de abertura.

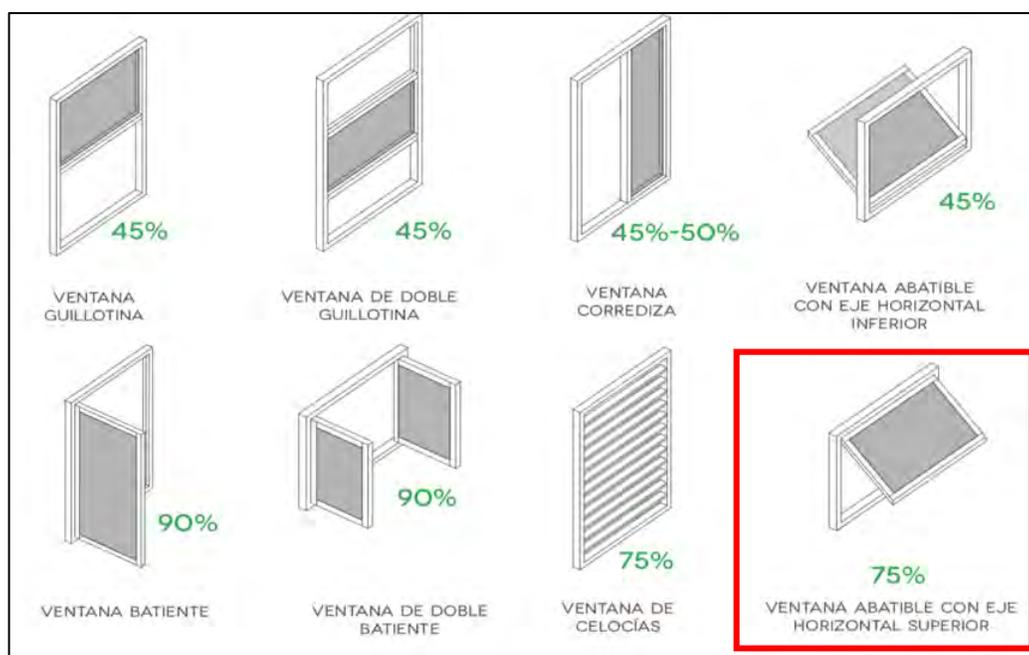


Figura 53. Índice de efectividad de ventilación para distintos modelos de ventana

Fuente: Arce et al., 2012. Modificado por Cordero, 2022.

4.3.5 Aislamiento térmico con materiales resistivos

Consiste en utilizar materiales aislantes en la envolvente de la edificación para reducir sustancialmente la ganancia de calor a través de ella. Para esto se recomienda utilizar materiales que tengan una fina estructura de espuma que formen celdas de aire dentro de sí. En este caso se optó por utilizar fibra de vidrio ya que es el material que se consigue actualmente en el país.

Otra excelente opción para esto es la fibra de celulosa natural, ya que su impacto ambiental es menor, sin embargo, este material no se encuentra disponible en el país y su importación incurriría en emisiones de CO₂ adicionales.

La fibra de vidrio se colocaría dentro de toda la envolvente del domo, contenida por los tableros OSB de fibra de madera, por lo que esta podría llegar a tener un espesor de aislamiento de hasta 10 cm. En la Figura 54 se muestra un ejemplo del efecto de atenuación de temperatura exterior que tienen los materiales aislantes en las envolventes.

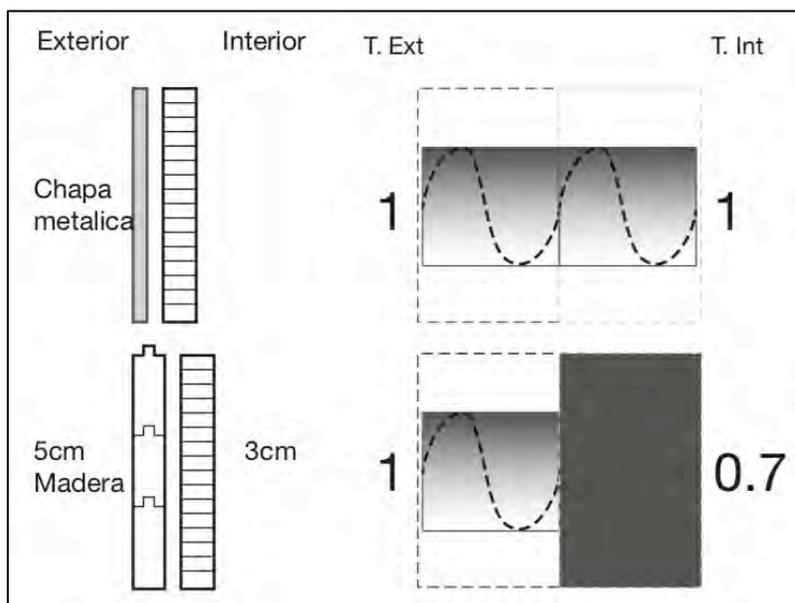


Figura 54. Capacidad de atenuación del ciclo de temperatura exterior de diversos materiales

Fuente: Arce et al., 2012

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD ECONÓMICA

5.1 Selección de método de evaluación de sostenibilidad

Para evaluar el nivel de sostenibilidad del modelo desarrollado, este se comparó con una vivienda de interés social prefabricada en concreto de dimensiones similares en cuanto a área de construcción. Vega (2014) calculó la huella de carbono de una VIS prefabricada en concreto utilizando el Método de Presupuesto de Materiales, el cual consiste en identificar la cantidad de cada material de construcción presente en la vivienda y multiplicar este valor por un factor de emisión, para así determinar la cantidad total de kilogramos de CO₂ equivalente.

Con el fin de utilizar los resultados obtenidos por Vega (2014), se decidió utilizar el mismo método y de esta forma poder realizar una comparación directa entre ambos modelos de vivienda. Es importante aclarar que esta metodología tiene limitaciones y supuestos que fueron tomados en cuenta por Vega a la hora de realizar los cálculos, entre ellos destacan los siguientes:

- Los pesos y volúmenes de los materiales son aproximados por lo que se utilizaron valores promedio
- El cálculo de la huella no incluye el transporte ni la instalación de los materiales por lo que no es un análisis de ciclo de vida completo, a excepción de la madera

Estas limitaciones aplican de igual manera para el modelo de vivienda geodésica desarrollado, ya que la huella de carbono calculada tampoco incluye el transporte ni la instalación de los materiales, a excepción de la madera que sí incluye las emisiones del transporte desde el extranjero. Tampoco se incluye la huella de carbono que puedan generar las obras provisionales como instalación de servicios públicos y construcción de bodegas y oficinas. Queda excluido del cálculo también el acarreo de desechos y la huella de la maquinaria y equipo utilizado, así como de los sistemas mecánicos y eléctricos.

En resumen, la huella calculada corresponde únicamente a la fabricación de los materiales de construcción que componen el modelo arquitectónico presentado en los capítulos anteriores.

5.2 Análisis de sostenibilidad

En el Cuadro 10 se presentan los resultados obtenidos para el modelo de vivienda geodésica.

Cuadro 10. Huella de carbono de vivienda geodésica

Elemento	Material	Cantidad	Unidad	Cantidad convertida	Unidad de emisión	Factor de emisión	Ton de CO ₂
Tambor	Concreto de cáñamo	2,00	m ³	2,200	Ton	-0,0006	-0,0013
Pórticos	Madera	0,42	m ³	0,420	m ³	-0,7000	-0,2940
Puertas	Madera	0,24	m ³	0,240	m ³	-0,7000	-0,1680
Piso	Madera	1,67	m ³	1,670	m ³	-0,7000	-1,1690
Paredes Internas	Madera	3,24	m ³	3,240	m ³	-0,7000	-2,2680
Mezzanine	Madera	0,70	m ³	0,700	m ³	-0,7000	-0,4900
Estructura geodésica (Incluye marcos de ventana y piezas del tragaluz)	Madera	2,18	m ³	2,180	m ³	-0,7000	-1,5260
Aislamiento	Fibra de vidrio	6,20	m ³	0,124	Ton	0,0024	0,0003
Ventanería	Vidrio	0,09	m ³	0,233	Ton	0,9100	0,2116
Aleros traga luz	Bambú	0,10	m ²	0,001	m ³	-0,0012	0,0000
Aleros ventanas	Bambú	5,93	m ²	0,059	m ³	-0,0012	-0,0001
Recubrimiento	Tablero OSB Madera (externo e interno)	132,58	m ²	1,326	m ³	-0,7000	-0,9281
	Impermeabilizante acrílico a base de agua (2 capas)	132,58	m ²	0,265	Ton	0,0003	0,0001
	Corcho proyectado (3 capas)	198,87	m ²	0,497	Ton	0,0000	0,0000
Pileta	Cemento	0,77	Sacos	0,770	Sacos	0,0314	0,0241
	Arena	0,06	m ³	0,060	m ³	0,0037	0,0002
	Piedra Quintilla (12 mm)	0,05	m ³	0,050	m ³	0,0032	0,0002
						Total	-6,6080

A este resultado se le agregaron las emisiones producidas por el transporte de la madera certificada de pino. El cálculo se muestra a continuación en el Cuadro 11. Para esto se tomó una distancia de 3000 km de vía marítima desde el sur de EUA hasta Costa Rica. Al sumar los resultados se obtuvo un total de -6,3744 Ton de CO₂ .

Cuadro 11. Emisiones de CO₂ producidas por el transporte de la madera de pino certificada

Material	Modo de transporte	Cantidad	Unidad	Cantidad convertida	Unidad de emisión	Factor de emisión	Distancia (km)	Ton de CO ₂
Madera	Marítimo	8,45	m ³	5,07	Ton	0,00001536	3000	0,2336

5.3 Análisis económico

El análisis realizado en este apartado no incluye los precios de transporte ni instalación de los materiales, estos representan únicamente el costo de compra de los materiales de construcción. En el Cuadro 12 se muestra el desglose de precios de los materiales utilizados en el modelo desarrollado.

Cuadro 12. Presupuesto de materiales de construcción de la vivienda geodésica

Elemento	Material	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Precio
Tambor	Concreto de cáñamo	2,00	m ³	∅ 257.000,00	∅ 514.000,00
Pórticos	Madera de Pino	0,42	m ³	∅ 182.500,00	∅ 76.650,00
Puertas	Madera	0,24	m ³	∅ 182.500,00	∅ 43.800,00
Piso	Madera de Pino	1,67	m ³	∅ 182.500,00	∅ 304.775,00
Paredes Internas	Madera de Pino	3,24	m ³	∅ 182.500,00	∅ 591.300,00
Mezzanine	Madera de Pino	0,70	m ³	∅ 182.500,00	∅ 127.750,00
Estructura godésica (Incluye marcos de ventana y piezas del tragaluz)	Madera de Pino	2,18	m ³	∅ 182.500,00	∅ 397.850,00
Aislamiento	Fibra de vidrio	66,29	m ²	∅ 3.400,00	∅ 225.386,00
Ventanería	Vidrio	18,60	m ²	∅ 50.000,00	∅ 930.000,00
Aleros traga luz	Bambú	0,10	m ²	∅ 40.000,00	∅ 4.000,00
Aleros ventanas	Bambú	5,93	m ²	∅ 40.000,00	∅ 237.200,00
Recubrimiento	Tablero OSB Madera	132,58	m ²	∅ 25.000,00	∅ 3.314.500,00
	Corcho proyectado (3 capas) + Impermeabilizante acrílico (2 capas)	66,29	m ²	∅ 39.700,00	∅ 2.631.713,00
Pileta	Concreto	0,40	m ³	∅ 60.000,00	∅ 24.000,00
				Total	∅ 9.422.924,00

Además, se muestra a continuación en el Cuadro 13 el peso que tiene cada material en el valor total de la vivienda, representado como un porcentaje del valor total de los materiales. De esta manera se aprecia claramente en cuales elementos de la vivienda se puede aplicar ingeniería de valor para reducir su costo.

Cuadro 13. Porcentaje de participación de cada material sobre el valor total

Material	Porcentaje
Madera de Pino	16,4%
Cáñamo	5,5%
Fibra de vidrio	2,4%
Vidrio	9,9%
Bambú	2,6%
Corcho proyectado + Impermeabilizante acrílico	27,9%
Concreto	0,3%
Tablero OSB en madera	35,2%

Del cuadro anterior se observó que el elemento en donde hay mayor posibilidad de reducción de costos es el revestimiento de la vivienda geodésica, que se compone de los tableros de madera OSB y el recubrimiento de corcho proyectado con impermeabilizante acrílico.

5.4 Comparación de resultados

En el Cuadro 14 se observa la comparación entre la huella de carbono calculada para el modelo de VIS geodésica y la VIS prefabricada en concreto, calculada por Vega (2014). Con este resultado se demostró que al utilizar materiales sostenibles y de bajo impacto ambiental, la cantidad de emisiones de CO₂ no solo se reduce considerablemente, sino que llega a ser negativa, lo que se traduce en captación de CO₂ de la atmosfera.

Cuando se multiplican estos valores por el número de viviendas que se llegan a construir en proyectos de interés social, es evidente el potencial que tiene un modelo sostenible para revertir los efectos inminentes del cambio climático.

Cuadro 14. Comparación de huellas de carbono de VIS geodésica con VIS prefabricada

Modelo	Ton de CO ₂ equivalente
VIS geodésica	-6,4
VIS prefabricada	2,5

Como se mencionó en apartados anteriores, la sostenibilidad de cualquier modelo también depende del factor económico. En el Cuadro 15 se muestra el costo aproximado que tienen actualmente ambos modelos de VIS, y se determinó que el modelo de VIS geodésica tiene un mayor costo que el de VIS prefabricada en concreto. El porcentaje de diferencia entre el costo

de cada modelo es de un 73%. Esto refleja el costo relativamente elevado que continúan teniendo algunos materiales de bajo impacto ambiental hoy en día.

Es importante considerar que a pesar de que el costo de una VIS prefabricada en concreto es menor, al igual que su mano de obra y posiblemente su transporte, la utilización de este tipo de modelo a largo plazo podría llegar a tener implicaciones ambientales negativas y por ende también sociales y económicas. Por otro lado, al utilizar un modelo de VIS geodésica, si se considera el mezanine, el área de construcción útil es mayor.

Cuadro 15. Comparación de costo de VIS geodésica con VIS prefabricada

Modelo	Costo aproximado	Costo aproximado por m ² útil
VIS geodésica	₡ 12.249.801,20	₡ 202.000,00
VIS prefabricada	₡ 7.100.000,00	₡ 169.000,00

Nota: El costo final de VIS geodésica se obtuvo del costo total de los materiales más un 30% de mano de obra.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El cambio climático es el principal desafío del Siglo XXI como especie y según las proyecciones de datos, la toma de decisiones en las siguientes décadas será crítica para prevenir o disminuir sus efectos catastróficos.
- En Costa Rica son escasos los proyectos de vivienda de interés social que han contemplado aspectos de sostenibilidad en cuanto a materiales de construcción, lo cual se refleja en el uso intensivo de materiales convencionales como el concreto y el acero, mostrado en los datos recopilados por el CFIA en sus auditorías.
- Las estructuras geodésicas se han utilizado como solución de vivienda por más de medio siglo y son cada vez más las empresas que se dedican a este tipo de construcción enfocada en la sostenibilidad, promoviendo diseños integrales de baja emisión de CO₂ sin sacrificar el confort de los usuarios.
- A nivel internacional la madera es el material de bajo impacto más utilizado en la construcción de viviendas geodésicas, gracias a sus propiedades mecánicas y su amplia disponibilidad. Además, al estar certificada se garantiza no solo la sostenibilidad de su producción sino también la calidad del material.
- A excepción de la madera, la oferta de materiales de construcción de bajo impacto ambiental en Costa Rica que estén respaldados por certificaciones ambientales o energéticas es escasa. La gran mayoría de productos autodenominados como productos eco-amigables no cuentan con declaración de huella de carbono o de energía incorporada, lo cual dificulta el cálculo de la huella de carbono real de un proyecto cuando estos son utilizados.
- Se demostró la posibilidad de realizar un modelo de vivienda geodésica sostenible que cumpla con las especificaciones técnicas establecidas por el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos en la Directriz N° 27 y el Reglamento de Construcciones.

- El modelo de VIS geodésica al tener poco peso en comparación a modelos convencionales de VIS, es una alternativa viable para países de alta sismicidad como lo es Costa Rica, ya que su diseño está regido por la demanda de fuerzas ejercida por el viento.
- Se determinó que al utilizar materiales de bajo impacto ambiental en el modelo de VIS geodésica es posible no solo reducir la huella de carbono significativamente, sino que también estas podrían ayudar a contrarrestar los efectos de cambio climático al tener huellas de carbono negativas. En otras palabras, el modelo de VIS geodésica sostenible contribuye a la captación de CO₂, captando tres veces la cantidad que emite un modelo convencional.
- El Método de Presupuesto de Materiales para el calculo de la huella de carbono permite la comparación directa de las emisiones de CO₂ generadas por edificaciones de dimensiones similares. Es una manera sencilla y directa de comparar el nivel de sostenibilidad de distintos proyectos.
- El modelo de VIS geodésica generado tiene un costo aproximado 73% mayor que el modelo convencional de VIS prefabricada en concreto. El aumento en el costo se debe principalmente a los elementos del recubrimiento de la cúpula geodésica, sin embargo, el costo de mano de obra y transporte podría ser menor. Además, la VIS geodésica presenta la posibilidad de tener mayor área de construcción útil.

6.2 Recomendaciones

- Al sector comercial, específicamente a los fabricantes de materiales de construcción, se les recomienda enérgicamente que inviertan en estudios de ciclo de vida de sus productos y que incorporen la huella de carbono de los mismos en sus fichas técnicas. Además, de aumentar la inversión en tecnología y técnicas que aumente la eficiencia energética de producción de los materiales, con el fin de disminuir su impacto ambiental.

- A las instituciones gubernamentales y no gubernamentales se les recomienda incentivar el uso de materiales de bajo impacto ambiental como la madera, el cáñamo y el bambú en proyectos de interés social y público, con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂ que estos generan.
- A la academia se le recomienda fuertemente propiciar la investigación en materiales de bajo impacto ambiental, con el fin demostrar su viabilidad técnica como alternativas a los materiales convencionales que contienen altas huellas de carbono. Instituciones dedicadas a la investigación como LANAMME deberían incluir más pruebas de laboratorio para estos materiales en sus programas, con el objetivo de incentivar a más profesionales a incluirlos en sus proyectos.
- Se insta a estudiantes a dar seguimiento a esta investigación, con el objetivo de continuar el diseño de los sistemas restantes del modelo como lo son el sistema eléctrico y el mecánico, además del resto de elementos estructurales como las fundaciones y los anclajes de la cúpula, los cuales quedaron fuera del alcance. El diseño general de la VIS geodésica puede optimizarse y al generar un presupuesto más detallado, se podría aplicar ingeniería de valor para reducir su costo al máximo sin sacrificar su sostenibilidad.
- Al sector privado de construcción, se le aconseja estudiar la posibilidad de incluir cada vez más materiales de bajo impacto ambiental en sus proyectos para disminuir la huella de carbono del sector, y evaluar las ventajas que esto podría traer a corto y largo plazo para todos los actores de la industria. Con el paso de los años cada vez se vuelve más atractivo para los clientes y usuarios los proyectos y empresas que sitúan la sostenibilidad como su principal valor.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, A., Aymerich, N., Blanco, G., Bolaños, L., Campos, A. y Matarrita, R. (2013). Guía de diseño bioclimático según clasificación de zonas de vida de Holdridge. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Arango, A., & Camargo, J. (2015). Determinación de la huella de carbono de una empresa forestal productora de guadua. *Recursos Naturales y Ambiente*, 65(66), 56-51.
- Arce, E., Fernández, D., Herrera, M., Rodríguez, S., Vásquez, A. y Vega, C. (2012). Estrategias pasivas de diseño bioclimático para espacios educativos. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2012). Un espacio para el desarrollo: Los mercados de vivienda en América Latina y el Caribe. (C. P. Bouillon, Ed.) Washington D.C., Estados Unidos de América.
- Battelle Memorial Institute. (2002). Toward a Sustainable Cement Industry. Ohio, Estados Unidos de América.
- Bernal, M. (2018). Uso de la paja en la construcción de paneles aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura. [Trabajo de grado de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17851/BernalPe%C3%B1aMariaSol2018.pdf?isAllowed=y&sequence=3>
- Cagiao, J., Doménech, J., Gómez, B., Gonzáles, M., Gutiérrez, H., Gutiérrez, S. y Martínez, F. (2010). Huella ecológica del cemento. Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción. Universidade da Coruña.
- Calluqueo, R. (2019). Estudio técnico en construcción de domo geodésico para cafetería. [Trabajo para optar por el título de Técnico Universitario en Construcción, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/48864>
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2016). Código Sísmico de Costa Rica. San José, Costa Rica.

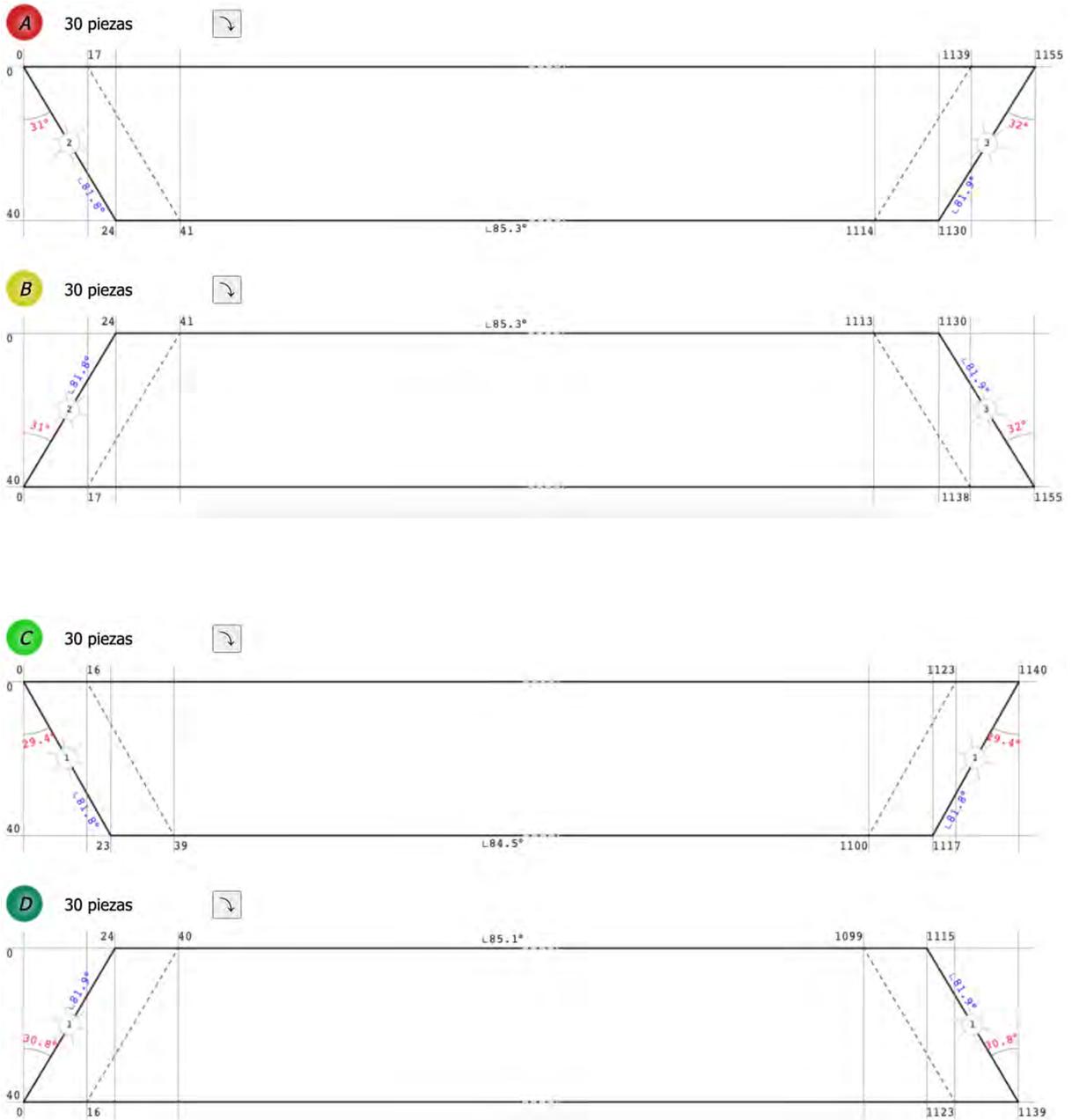
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2020). Lineamientos para el Diseño por Viento de Edificaciones en Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2018). Indicadores CFIA de la Construcción en Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2018). X Auditoría de Vivienda de Interés Social. San José, Costa Rica.
- Construcción sostenible en Costa Rica ya tiene sus cimientos. (2015, 13 de setiembre). El Financiero.
- De Lózar, M. (2014). La cabaña moderna. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. http://oa.upm.es/32608/2/MIGUEL_DE_LOZAR_DE_LA_VINA_2.pdf
- Del Cisne, G., & Castro, J. (2020). Arquitectura Bioclimática. *Polo de Conocimiento*, 5(3), 751-779. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1381>
- Directriz N° 27 Especificaciones técnicas y lineamientos para la escogencia de tipologías arquitectónicas para la construcción de vivienda y obras de urbanización, financiadas mediante la aplicación del Sistema Financiero Nacional para la Vivienda. (2003, 11 de setiembre). La Gaceta N° 175. San José, Costa Rica.
- Freire, G., Muñoz, J., & Marrero, M. (2016). Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. *Hábitat Sustentable*, 6(1), 06-17.
- Galdeano, C., & Massa, M. (2018). Viviendas geodésicas como alternativa de inclusión al hábitat para mujeres del área rural de Lavalle. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cuyo]. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/13215/galdeanoymassa-viviendasgeodesicascomoalternativadeinclusion.pdf
- Garzón, B. (2007). Arquitectura Bioclimática. Argentina, Buenos Aires: Editorial Nobuko <https://elibro-net.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/es/lc/sibdi/titulos/77681>
- Ghorbanzadeh, M. (2016). How to build a geodesic dome. An overview and introduction of geodesic domes in a simple word in addition with studding a case and designing a Research Center with this structure. *Current World Environment*, 11(1), 54-65.

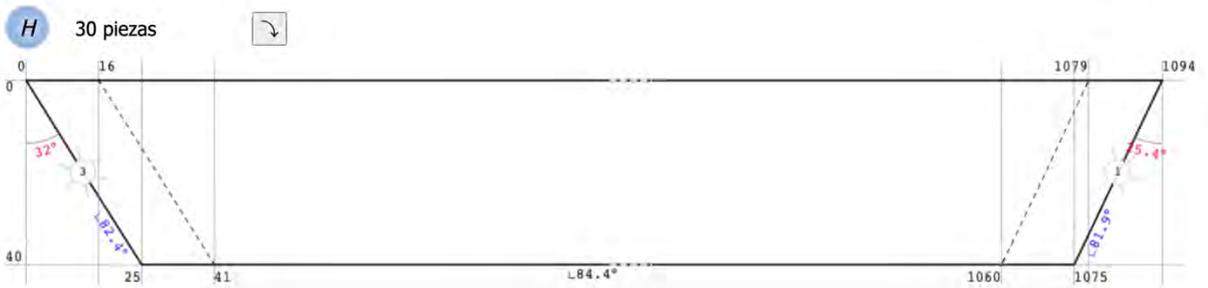
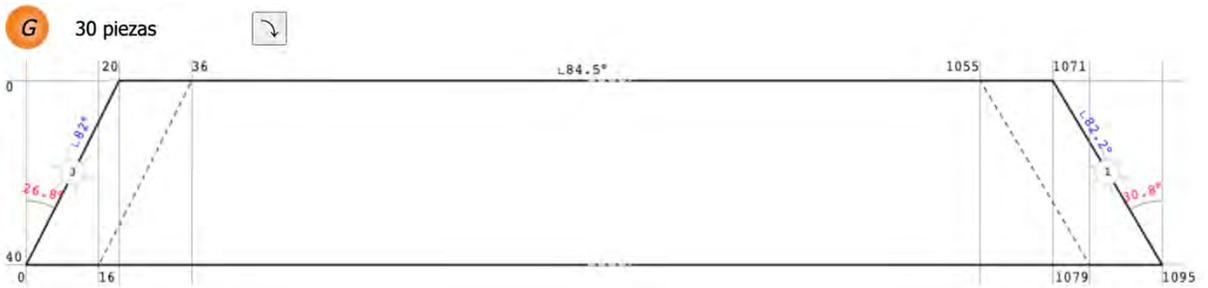
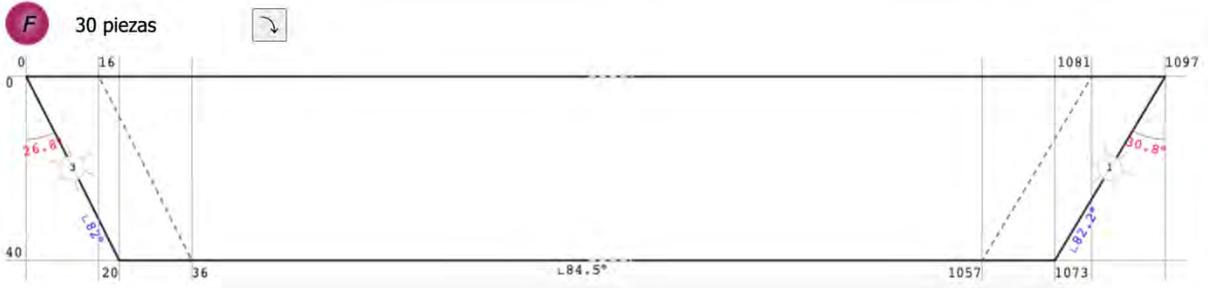
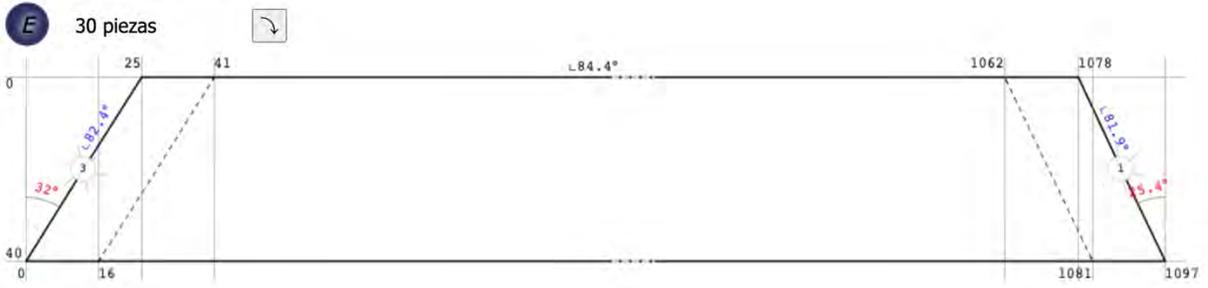
- Glamping en Costa Rica: acampar con todas las comodidades. (2019, 7 de octubre). La Nación, Grupo Nación. <https://www.nacion.com/revista-perfil/vida/glamping-acampar-con-todas-las-comodidades/YAGHHFLYB5F3FJPPYVQ6KYGCXM/story/>
- Grazieschi, G., Asdrubali, F., & Thomas, G. (2021). Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Environmental Systems*, 2(21). <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100032>
- Hernández, M., Jiménez, S., & Sánchez, J. (2021). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector de construcción. *Tecnología en Marcha*, 34(2), 3-10.
- IPCC. (2018). Resumen para responsables de políticas. En: *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza.*
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (Octubre de 2020). Encuesta Nacional de Hogares Julio 2020. San José, Costa Rica.
- Joseph, P., & Tretsiakova-McNally, S. (2010). Sustainable Non-Metallic Building Materials. The Built Environment Research Institute, School of the Built Environment, University of Ulster, Newtownabbey, BT37 0QB, Northern Ireland, UK. *Sustainability*, 2(2), 400-427. <https://doi.org/10.3390/su2020400>
- Ley Nº 7052 del Sistema Financiero Nacional para la Vivienda y Creación del Banco Hipotecario de la Vivienda. (1986, 27 de noviembre). La Gaceta Nº 226. San José, Costa Rica.
- Martínez, J. (2018). Políticas y programas de vivienda: evolución en Costa Rica. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. (2018). Compendio Estadístico de Vivienda 2018. Costa Rica.
- Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. (2011). Costa Rica: Principales estadísticas de vivienda, según Censo 2011. Costa Rica.

- Mora, G. (2016). Construcción Sostenible. Revista CFIA, (264), 16-17.
- Murcia, C., Ortiz, K., & Umaña, M. (2020). Diseño estructural y construcción de un modelo a escala de cabaña turística sostenible en el municipio de Cubarral-Meta. [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/28525/1/2020_dise%c3%b1o_estructural_construcci%c3%b3n.pdf
- Novas, J. (2010). Sistemas constructivos prefabricados aplicables a la construcción de edificaciones en países en desarrollo. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. http://oa.upm.es/4514/1/TESIS_MASTER_JOEL_NOVAS_CABRERA.pdf
- Organización de Naciones Unidas. (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.
- Paniagua, V. (s.f.). Guía de uso y aplicaciones de la madera en la arquitectura en Costa Rica. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Política Nacional de Vivienda y Asentamientos Humanos. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. Marzo 2014.
- Reglamento de Construcciones. (2018, 22 de marzo). La Gaceta N° 54. San José, Costa Rica.
- Reglamento de Operaciones del Sistema Financiero Nacional para la Vivienda. (1996, 10 de mayo). La Gaceta N° 95. San José, Costa Rica.
- Reyes, V. (2019). Diseño sostenible de una vivienda de bien social en Costa Rica. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid].
- Serrano, P. (2011). Geodésicos post terremoto. Investigación aplicada a la emergencia. Revista INVI, 26, 129-151. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/invi/v26n72/art05.pdf>
- Stasi, G. (2018). Estudio técnico en construcción de domo geodésico para cafetería. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://idus.us.es/handle/11441/81714>
- United Nations Environment Programme. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.

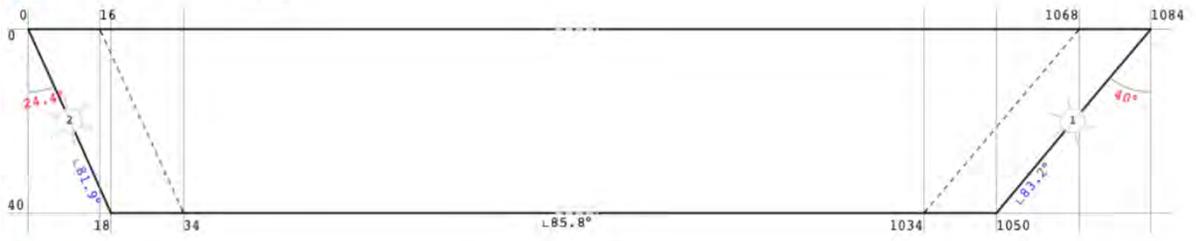
- Usedo, R. (2015). Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico. [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/60200/Memoria.pdf>
- Vega, S. (2014). Cálculo y reducción de huella de carbono en materiales de construcción de viviendas de interés social. [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2815/1/37921.pdf>
- Villalobos, F. (2015). Estado del arte de la normativa técnica sobre elementos prefabricados de concreto para vivienda unifamiliar en Costa Rica. *Métodos y Materiales*, 5(1), 33-34.
- Zhivotov, D., & Pastukh, O. (2020). Construction of geodesic domes made of wood and composite materials during restoration and conservation of cultural heritage objects. *E3S Web of Conferences*, 160(02020), 3-4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016402020>

Anexo 1: Esquema de piezas del domo

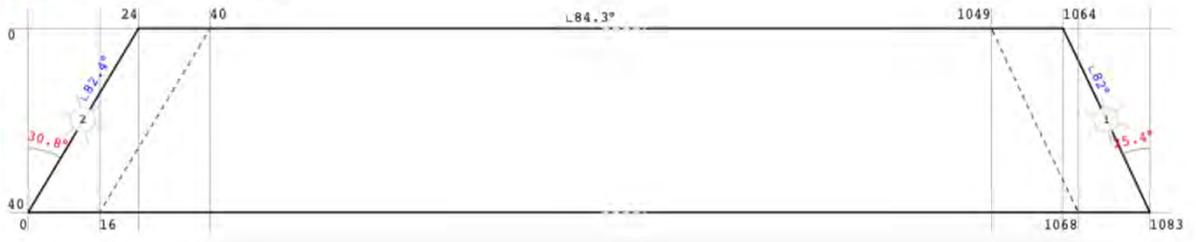




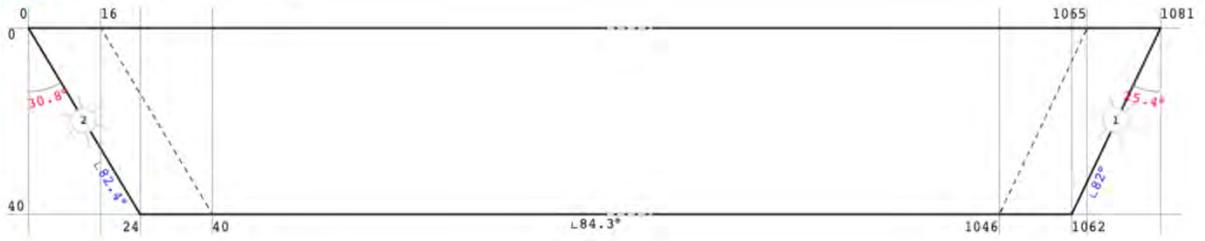
I 30 piezas



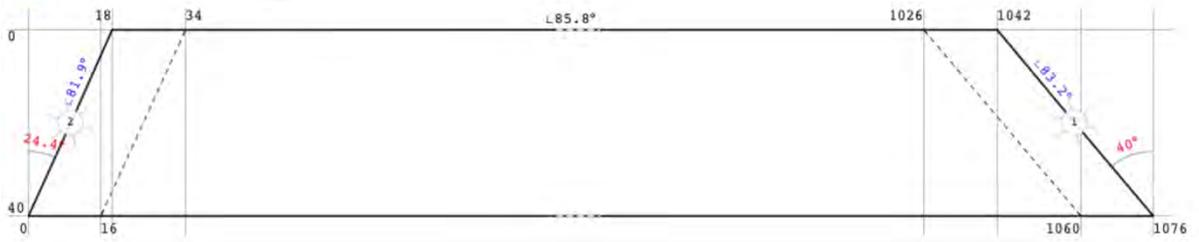
J 30 piezas



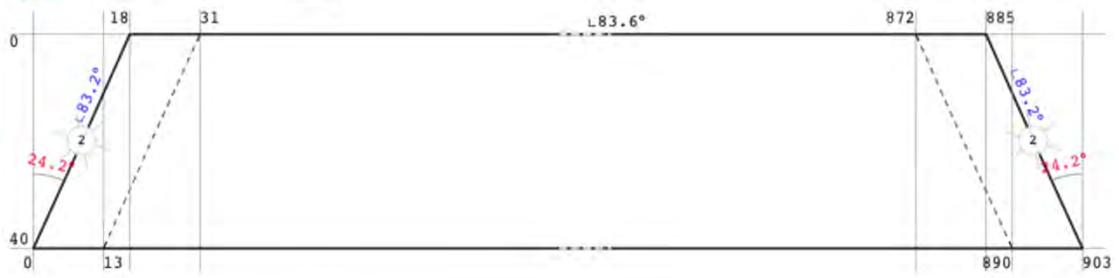
K 30 piezas



L 30 piezas



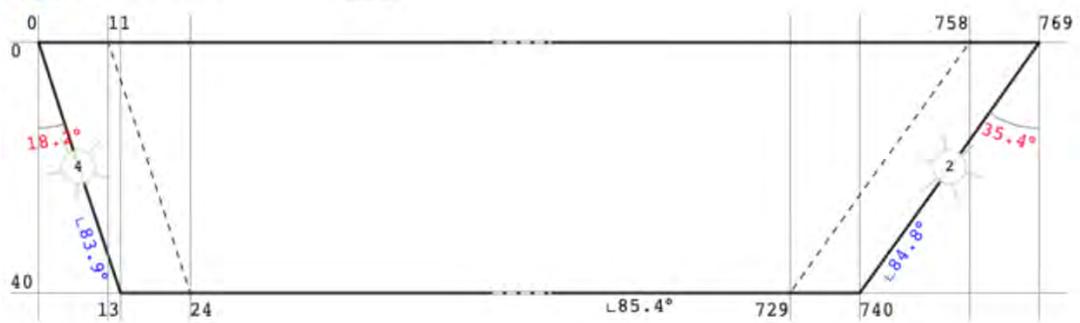
M 30 piezas 



N 30 piezas 



O 30 piezas 



P 30 piezas 

