

Análisis de Viabilidad de la Construcción de una Vivienda Ecológica Aplicando Técnicas de
Construcción Sostenible

Adrián Camilo Bustos Gélvez

Marlon Asmedth Villamizar Leal

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, PhD

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hijo David Santiago y a todas aquellas personas que me apoyaron y me acompañaron en esta bonita etapa de mi vida.

A mi Mama Leonor Gélvez, a mi papa Hernán Bustos, quienes me inculcaron los más nobles valores y han apoyado siempre mi educación.

Ellos fueron, son y serán siempre mis más importantes maestros.

Que toda la gloria sea para Dios, pues Él es el principal artífice de todo y nada se puede lograr sin Él.

Adrián Camilo Bustos Gélvez

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi mama Gisela Leal y a mi hermana Saidy Villamizar por ser las mujeres más hermosas que con su gran cuidado llegaron a formar el hombre que soy en este momento, a ellas les debo todo.

A mi tío Carlos Villamizar por ser el autor económico que con su apoyo logro hacer realidad la ilusión de poder estudiar en la universidad. También a todos mis compañeros con los cuales estude por muchísimas horas y a todas aquellas personas que confiaron y dieron parte de su vida enseñando sus conocimientos. A Leidy Romero por enseñarme que debía culminar con cada inicio de un proyecto.

Marlon Asmedth Villamizar Leal

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro agradecimiento con la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas para que pudiéramos obtener una educación superior de calidad.

Agradecemos a Dios por su inmenso amor hacia nosotros y su deseo de que seamos cada día mejores personas para que sirvamos bien a nuestra comunidad y a nuestro país.

Agradecemos a nuestros padres, amigos y familiares quienes nos han apoyado en aquellos momentos más difíciles de nuestras vidas y con su compañía nos han fortalecido.

También damos nuestro agradecimiento a los profesores, que con su conocimiento, formación y experiencia nos han formado y han hecho de nosotros mejores personas.

A nuestro director el Dr. Julián Ernesto Jaramillo, por aceptar ser nuestro tutor y por estar siempre dispuesto a atender nuestras solicitudes. Lo admiramos y le apreciamos mucho.

Tabla de contenido

Introducción	20
1. Descripción del Problema	21
2. Justificación	22
3. Objetivos	24
3.1 Objetivo General	24
3.2 Objetivos Específicos.....	24
4. Proyecto Arquitectónico	25
4.1 Lugar y Clima	25
4.1.1 Orientación.....	25
4.2 Primera Planta	25
4.2.1 Estructura.	26
4.2.2 Reforzamiento.....	27
4.2.3 Rediseño.....	28
4.3 Segunda Planta.....	28
4.3.1 Muros.....	30
4.3.2 Vanos.....	32
4.3.3 Sistema Mixto.....	33
4.3.4 Tímpanos.....	33
4.3.5 Escaleras.....	34
5. Proyecto Estructural.....	35
5.1 Grado de capacidad de disipación de energía.....	35
5.2 Estructuración y predimensionamiento.....	36
5.2.1 Losa.....	37

5.2.2 Vigas.	37
5.2.3 Columnas.	38
5.2.3.1 Áreas tributarias.	39
5.2.3.2 Cargas muertas.	39
5.2.3.3 Cargas vivas.	40
5.2.3.4 Combinaciones de carga.	40
5.3 Métodos de diseño.	41
5.3.1 Método por esfuerzos de trabajo.	41
5.3.2 Método de la resistencia o LRFD.	41
5.4 Parámetros de diseño con Cypecad.	42
5.4.1 Grupos de uso.	42
5.4.2 Espectro de aceleraciones.	43
5.4.3 Fuerzas sísmicas.	44
5.4.4 Caracterización del suelo.	45
5.5 Resultados de Modelamiento.	45
5.5.1 Armado de columnas.	46
5.5.2 Armado de vigas.	47
5.5.3 Cimentación.	48
6. Construcción con Tierra.	49
6.1 Generalidades.	49
6.1.1 Historia.	49
6.1.2 Composición.	51
6.1.3 Preparación.	52
6.1.3 Consistencia.	52

6.2 Ventajas de la construcción con tierra.	53
6.2.1 Regular la humedad.	53
6.2.2 Difusión de vapor.	54
6.2.3 Influencia térmica.	56
6.2.4 Disminuye la contaminación ambiental.	57
6.2.5 Salud.	58
6.3 Limitaciones del barro	59
6.3.1 Permeabilidad.	59
6.3.1 Retracción.	60
6.3.2 Resistencia.	61
6.4 Estabilización.	62
6.4.1 Estabilización con arena.	62
6.4.2 Estabilización con paja.	63
6.5 Ensayos de campo.	63
6.5.1 Tests Táctil-Visuales.	64
6.5.3 Test del vidrio.	67
6.5.4 Test del cordón.	67
6.5.5 Test de la cinta.	68
6.5.6 Test de Exudación.	69
6.5.7 Test de resistencia seca.	70
6.6 Evaluación de Resultados	71
6.7 Muestras de adobes	73
6.7.1 Preparación de la mezcla.	73
7. Techo Verde.	75

7.1 Antecedentes	75
7.1.1 Techo verde productivo, Bogotá.....	75
7.1.2 Beneficio térmico de techo verde, UIS.....	77
7.2 Ventajas de los techos verdes	77
7.2.1. Efecto isla de calor.....	78
7.2.2 Equilibrio de CO2.	78
7.2.3 Regulación de la temperatura.....	78
7.2.4 Capacidad de retención del agua.....	79
7.2.5 Mejora la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.	79
7.3 Clasificación de techos verdes	79
7.3.1 techo verde extensivo.....	79
7.3.2 Techo verde intensivo.....	80
7.4 Elementos de cubierta	82
7.4.1 Cercha.	82
7.4.2 Despiece.....	82
7.4.3 Techo Verde.....	83
7.5 Diseño de Correas y Cabios.....	84
7.5.1 Propiedades de la madera.....	84
7.5.2 Cargas.	85
7.5.3 Escuadría.....	86
8. Sistema de Recolección de Aguas Lluvias	87
8.1 Condiciones sanitarias del agua lluvia.....	89
8.1.1 Bacterias.....	89
8.1.2 pH.....	89

8.2 Componentes del sistema.....	90
8.2.1 Captación.	91
8.2.2 Recolección y conducción.	92
8.2.3 Interceptor y filtro.	93
8.2.4 Almacenamiento.	95
8.2.5 Distribución.....	95
8.3 Evaluación del sistema.....	97
8.3.1 Pluviometría.....	97
8.3.2 Oferta.	98
8.3.3 Demanda Instalada.....	98
8.3.4 Volumen del tanque.	100
8.4 Sistema de bombeo	101
8.4.1 Altura Total.....	101
8.4.2 Caudal de Bombeo.....	102
8.4.3 Perdidas primarias (hf).....	103
8.4.4 Perdidas Secundarias.	103
8.4.5 Selección de la bomba.	103
9. Sistema Fotovoltaico.....	105
9.1 Radiación Solar	105
9.1.1 Perdidas.....	107
9.2 Geometría Solar	108
9.2.1 Orientación e inclinación del receptor.	109
9.3 Componentes del Sistema Fotovoltaico.....	111
9.3.1 Generador Fotovoltaico.	111

9.3.2 Batería de Acumuladores.....	112
9.3.3 Regulador de carga.	114
9.3.4 Inversor de corriente.	115
9.4 Dimensionamiento del sistema	116
9.4.1 Cargas.	116
9.4.2 Tensión nominal del sistema.....	116
9.4.3 Calculo del Generador Fotovoltaico.	117
9.4.4 Dimensionado del sistema de acumulación.	120
9.4.5 Dimensionado del regulador de carga.....	121
9.4.6 Dimensionado del Inversor.	122
9.4.7 Dimensionado de los conductores.	123
10. Análisis de Costos.....	126
11. Conclusiones	129
Referencias Bibliográficas	132

Lista de Tablas

	Pag.
Tabla 1 <i>Factor α según la posición de la columna</i>	39
Tabla 2 <i>Avaluo de cargas muertas</i>	40
Tabla 3 <i>Peso propio de elementos de Hormigón Armado</i>	40
Tabla 4 <i>Valores sd y su Capacidad de Difusión</i>	55
Tabla 5 <i>Identificación de la Tierra por Inspección Táctil-Visual</i>	71
Tabla 6 <i>Tipo de suelo indicado por los tests expeditos</i>	72
Tabla 7 <i>Identificación de la tierra por medio de los tests de campo</i>	72
Tabla 8 <i>Propiedades Mecánicas Especie Sapan</i>	84
Tabla 9 <i>Esfuerzos Admisibles Madera Grupo ES2</i>	84
Tabla 10 <i>Clasificación de la Madera Según Esfuerzos Admisibles en kgcm2</i>	85
Tabla 11 <i>Cargas Muertas Sobre Estructura de Cubierta</i>	85
Tabla 12 <i>Diseño de Cabios y Correas</i>	86
Tabla 13 <i>Coeficiente de escorrentía en función del tipo de tejado</i>	92
Tabla 14 <i>Pluviometría Área Metropolitana de Bucaramanga</i>	98
Tabla 15 <i>Estimación demanda de agua en Vivienda Unifamiliar</i>	100
Tabla 16 <i>Calculo de Volumen Tanque de Almacenamiento</i>	101
Tabla 17 <i>Perdidas Secundarias expresadas en longitud equivalente de tubería</i>	103
Tabla 18 <i>Cargas Asociadas al Sistema Fotovoltaico</i>	116
Tabla 19 <i>Tensión Nominal del Sistema en Función de la Potencia</i>	117
Tabla 20 <i>Calculo de la Sección de Conductores</i>	125
Tabla 21 <i>Relación de Costos Proyecto de Vivienda Ecológica</i>	126
Tabla 22 <i>Costo Pared Tradicional</i>	128

Lista de Figuras

	Pag.
<i>Figura 1.</i> Torre de la Mezquita, Tarim, Yemen. Adaptado de Mehmood (2012).....	21
<i>Figura 2.</i> Orientación de la Vivienda. Adaptado de (Google Maps, 2018)	26
<i>Figura 3.</i> Diseño Arquitectónico Casa Guatiguara Primera Planta.....	27
<i>Figura 4.</i> Ampliación y Refuerzo de Columna	28
<i>Figura 5.</i> Rediseño Primera Planta.....	29
<i>Figura 6.</i> Diseño Arquitectónico Segunda Planta	30
<i>Figura 7.</i> Nomenclatura de las Caras y Aristas de un Ladrillo	31
<i>Figura 8.</i> Estructura de hormigón armado con relleno de mampostería	32
<i>Figura 9.</i> Soluciones para dinteles y vanos	33
<i>Figura 10.</i> Marco de Madera.....	34
<i>Figura 12.</i> Tímpano Estabilizado con Estructura de Hormigón Armado	34
<i>Figura 13.</i> Escalera en U Compensada	35
<i>Figura 13.</i> Mapa de Clasificación Zonas Sísmicas de Colombia.....	36
<i>Figura 14.</i> Tabla para Predimensionamiento de Losas y Vigas.....	38
<i>Figura 15.</i> Área Tributaria de Columna.....	39
<i>Figura 16.</i> Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño Como Fracción de g.	44
<i>Figura 17.</i> Perfil de Suelo S2	45
<i>Figura 18.</i> Modelo 3D Cypecad.....	46
<i>Figura 19.</i> Armado Transversal de Columna.....	47
<i>Figura 20.</i> Empalme a Centro y Alternado	47
<i>Figura 21.</i> Armado de Viga	48
<i>Figura 22.</i> Vista 3D Armado de Cimentación	49
<i>Figura 23.</i> Hallazgos Yacimiento San Cristóbal.....	50
<i>Figura 24.</i> Curva de Distribución Granulométrica de Tierra Arenosa.....	51
<i>Figura 25.</i> Estado del Suelo en Función de su Grado de Humedad.....	53
<i>Figura 26.</i> Coeficiente μ de Diferentes Barros y Revoques Según la Norma Alemana DIN 52615.	55

<i>Figura 27.</i> Ubicación Capa de Aislamiento Térmico. Izquierda, aislamiento por exterior. Derecha, aislamiento por interior	56
<i>Figura 28.</i> Coeficiente de Absorción de Agua w de Barros en Comparación con Materiales de Construcción Comunes	57
<i>Figura 29.</i> Resultados λ de Cálculo Según DIN 4108 (1998) y Otros Autores	58
<i>Figura 30.</i> Relación Entre el Limite de Retracción (LR) y las Variaciones del Volumen, de la Tierra y el Agua Evaporada, Durante el Proceso de Secado	60
<i>Figura 31.</i> Influencia del Contenido de Arena Sobre las Propiedades de dos Tipos de Tierra	62
<i>Figura 32.</i> Tests Táctil – visuales	64
<i>Figura 33.</i> Referencia Ensayo Caída de la Bola	66
<i>Figura 34.</i> Test Caída de Bola.....	66
<i>Figura 35.</i> Test del cordón	68
<i>Figura 36.</i> Test de la cinta.....	68
<i>Figura 37.</i> Test de Exudación	69
<i>Figura 38.</i> Conformación de las pastillas.....	70
<i>Figura 39.</i> Prueba Resistencia Seca	70
<i>Figura 40.</i> Elementos para la Conformación de Adobes	73
<i>Figura 41.</i> Consistencia de la mezcla de barro y paja.....	74
<i>Figura 42.</i> Dos muestras de Adobe	74
<i>Figura 43.</i> Techo Verde Productivo con Botellas. Adaptado de Forero Cortez (2011).....	76
<i>Figura 44.</i> Registros Promedio de la Temperatura Ambiente Interior Bajo Tres Tipos de Techo Verde y uno Testigo sin Techo Verde	76
<i>Figura 45.</i> Temperatura del Interior de tres Habitáculos con Diferente Tipo de Cubierta	77
<i>Figura 46.</i> Techo Verde Extensivo	81
<i>Figura 47.</i> Techo Verde Intensivo	81
<i>Figura 48.</i> Cercha de Madera Según la Luz a Cubrir	82
<i>Figura 49.</i> Conformación de Cubierta	83
<i>Figura 50.</i> Techo Verde con Botellas	83
<i>Figura 51.</i> Ciclo Hidrológico Simplificado con sus Componentes y Fases.....	87

<i>Figura 52.</i> Índice de Presión en Colombia.....	88
<i>Figura 53.</i> pH del Agua.....	90
<i>Figura 54.</i> Componentes Básicos de Sistema de Captación Pluvial en Techos.....	91
<i>Figura 55.</i> Canaletas para Conducción de Agua Lluvia	93
<i>Figura 56.</i> Interceptor de Primeras Aguas Lluvias	94
<i>Figura 57.</i> Filtro de Bajante	94
<i>Figura 58.</i> Accesorios y Componentes para un buen Sistema	95
<i>Figura 59.</i> Circuito Hidráulico Sistema Baipás Agua Potable – Agua Reciclada	96
<i>Figura 60.</i> Válvula Hidráulica Selectora “Or”	97
<i>Figura 61.</i> Factura de Servicio de Agua.....	99
<i>Figura 62.</i> Esquema Sistema de Bombeo	102
<i>Figura 63.</i> Curva de Rendimiento Bomba Barnes de 0,25 hp	102
<i>Figura 64.</i> Tabla de Perdidas por Fricción para 100 ft. de Tubería de PVC.....	104
<i>Figura 65.</i> Espectro Electromagnético de la Radiación Solar Extra-atmosférica y en la Superficie Terrestre	105
<i>Figura 66.</i> Tipos de Radiación sobre una Superficie	106
<i>Figura 67.</i> Variables Atmosféricas del Lugar	107
<i>Figura 68.</i> Esfera Celeste	109
<i>Figura 69.</i> Orientación del Generador	110
<i>Figura 70.</i> Dirección Radiación sobre Superficie Horizontal a 7° Latitud Norte	110
<i>Figura 71.</i> Sistema Fotovoltaico Aislado de la Red.....	111
<i>Figura 72.</i> Montaje de Panel Fotovoltaico sobre Cubierta de Lámina	112
<i>Figura 73.</i> Baterías Tecnología Gel para Sistemas Fotovoltaicos	114
<i>Figura 74.</i> Características Eléctricas de Modulo Fotovoltaico Monocristalino.....	118
<i>Figura 75.</i> Batería de Ciclo Profundo de 6V	121
<i>Figura 76.</i> Regulador de Carga PWM.....	121
<i>Figura 77.</i> Inversor de Corriente de Onda Sinusoidal.....	122
<i>Figura 78.</i> Trayectorias de Corriente Durante el Funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico	123

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA VIVIENDA ECOLÓGICA APLICANDO TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE*

AUTORES: ADRIAN CAMILO BUSTOS GELVEZ
MARLON ASMEDTH VILLAMIZAR LEAL**

PALABRAS CLAVE: ADOBE, CONSTRUCCION SOSTENIBLE, AGUA LLUVIA, TECHO VERDE, PANEL SOLAR.

DESCRIPCIÓN:

Existen muchas maneras de llevar a cabo una obra de construcción, una forma es utilizando materiales como la tierra que no tiene impacto ambiental. Si además se implementan sistemas como techo verde, captación de agua lluvia y generador fotovoltaico, se obtiene una vivienda autosustentable capaz de abastecer recursos hídricos, confort térmico y energía eléctrica. Este trabajo de investigación tiene como objetivo analizar los diferentes factores que influyen en el diseño de una vivienda sostenible, para determinar la viabilidad de la implementación de los diferentes sistemas.

El proyecto se realiza sobre una vivienda ya construida en la primera planta, posee una losa para construir un segundo piso en el cual se desea aplicar técnicas de construcción sostenible. La obra está hecha con técnicas tradicionales: estructura de hormigón armado y ladrillos de arcilla cocida. Se pudo verificar que la estructura no está en condiciones de soportar un segundo piso ya que las columnas no tienen el refuerzo mínimo requerido y deben reforzarse. Por medio del software Cypecad se diseña la estructura de hormigón armado, las paredes se conformarán en su mayor parte por adobes hechos a mano con alto contenido de paja, y la tierra se selecciona realizando pruebas de campo.

Implementar un sistema de recolección de agua lluvia junto con techo verde puede resultar contraproducente, pues debido a la retención de agua en el sustrato el agua captada se ve considerablemente disminuida. Un sistema fotovoltaico aislado puede cubrir toda la demanda de energía eléctrica de la vivienda si se invierte en la batería de acumuladores.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, PhD.

ABSTRACT

TITLE: FEASIBILITY ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION OF AN ECOLOGICAL HOUSE APPLYING SUSTAINABLE CONSTRUCTION TECHNIQUES*

AUTHORS: ADRIAN CAMILO BUSTOS GELVEZ
MARLON ASMEDTH VILLAMIZAR LEAL**

KEYWORDS: ADOBE, SUSTAINABLE CONSTRUCTION, WATER RAIN, GREEN ROOF, SOLAR PANEL.

DESCRIPTION:

There are many ways to carry out a construction work, one way is using materials such a land that has no environmental impact. If besides system such as green roof, rainwater catchment and photovoltaic generator are implemented, you get a sustainable housing capable of supplying water resources, thermal comfort and electric power. This research work aims to analyze the different factors that influence the design of a sustainable to determine the feasibility of the implementation of the different systems.

The project is carried out on a house already built on the first floor, has a slab to build a second floor in which you want to apply sustainable construction techniques. The work is made with traditional techniques: reinforced concrete structure and baked clay bricks. It was verified that the structure is not able to support a second floor since the columns do not have the minimum reinforcement required and must be reinforced. By means of the Cypecad software, the reinforced concrete structure is designed, the walls will be made up for the most part of hand-made adobes with high content of straw, and the earth is selected by field tests.

Implementing a rainwater collection system together with green roof can be counterproductive, because due to the water retention in the substrate the water collected is considerably diminished. An isolated photovoltaic system can cover all the electrical energy demand of the house if it is invested in the accumulator battery.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, PhD.

Introducción

La construcción moderna con materiales industrializados que hoy son símbolo de seguridad y resistencia, han reemplazado la construcción primaria que se llevaba a cabo con barro y otros materiales que han quedado relegados, fuera de los proyectos modernos, y se les ha asociado como símbolo de pobreza e inseguridad. Esto se da en Colombia principalmente por el terremoto que sacudió a Popayán en la Semana Santa de 1983, en el cual se vieron las falencias en la construcción y desde allí se comienza una nueva reglamentación en cuanto a las técnicas de construcción, elaborando el Código Colombiano de Construcción Sismorresistente de 1984 que normaliza la construcción, con el uso de técnicas y materiales de construcción más resistentes que puedan garantizar un menor grado de vulnerabilidad frente a los sismos. A pesar de esto, la construcción con tierra no se ha discontinuado totalmente, sino que cada día hay mayor interés en investigar más acerca del tema buscando dejar atrás aquella falsa percepción que se tiene acerca de ella.

Ejemplo de la construcción en barro es la torre de la mezquita en Tarim, Yemen (*Figura 1*) el cual tiene 38 metros de altura y está construido por adobes hechos a mano y “el factor de seguridad calculado por los ingenieros es de 2,5. Es decir, se puede construir más alto si quiere” (Marangoni, 2013). Lo cual indica es seguro construir con barro, solo que debe hacerse de la manera correcta. Y precisamente en este proyecto se desea indicar aquello más relevante sobre la construcción con barro, los aspectos que se deben tener en cuenta, que pruebas deben llevarse a cabo y cuál es la mejor forma de construir para evitar futuros daños y catástrofes.

Esta manera de construir es posible sin la necesidad de usar el cemento. A pesar de ello, la vivienda en estudio se halla construida en un primer piso y posee una estructura de concreto que

debe ser analizada para garantizar la seguridad de la edificación. Además, se desea complementar esta nueva vivienda equipándola con otros sistemas de carácter ecológico, como lo es el techo verde, la captación del agua lluvia y un generador fotovoltaico de corriente eléctrica.



Figura 1. Torre de la Mezquita, Tarim, Yemen. Adaptado de Mehmood (2012)

1. Descripción del Problema

Debido al cambio climático nos estamos exponiendo a temperaturas extremas que afectan nuestro confort porque “el clima en el planeta está cambiando a un ritmo más acelerado de lo esperado y nuestras actividades ligadas a la producción, extracción, asentamiento y consumo, son la principal causa de este aceleramiento en el cambio” (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2017). No obstante, las construcciones tradicionales no aíslan de manera

eficiente el clima exterior, ya que los materiales utilizados tienen alta conductividad y baja inercia térmica. También vemos como el agua y con ella la energía eléctrica empiezan a escasear y el gobierno hace la invitación a los ciudadanos para que se ahorre el agua, ya que es el elemento más importante en la vida del ser humano.

La explotación indiscriminada de los recursos naturales conlleva un alto impacto ambiental, arrojando gases de efecto invernadero a la atmósfera que son causa del calentamiento global. Esto influye en el clima y es causante de catástrofes, afectando tanto la vida animal como vegetal. Para la fabricación de los materiales tradicionales se necesita de una cantidad enorme de energía. Para el cemento, por ejemplo, se deben llevar a cabo procesos de recalentamiento y enfriamiento extremos en hornos, lo cual genera desechos contaminantes que van directamente a la atmósfera, asimismo los ladrillos cocidos deben ser horneados a altas temperaturas. Ya existen normas que rigen el uso de los materiales según su impacto ambiental, Leadership in Energy and Environmental Design (LEEDS) rige en territorio norteamericano y europeo con el fin de ajustar el uso de los materiales para evitar daños ambientales.

Sin embargo, el mayor problema existente que evita la construcción natural es la falta de educación en este tema, por eso se invita a seguir investigando en este tema que es muy apasionante para descubrir una forma diferente de vivir.

2. Justificación

Con este proyecto se pretende exponer una forma diferente de construir, a partir de materiales sencillos como el barro e implementando sistemas de captación de agua lluvia y paneles solares para la generación de electricidad. La diferencia la marca el hecho de aprovechar mejor los

recursos que nos brinda el ambiente. Para el confort de una casa por ejemplo se puede implementar un techo verde y paredes hechas a partir de tierra los cuales ofrecen condiciones más favorables que la construcción tradicional, en vez de instalar un sistema de aire acondicionado que consume además energía eléctrica que se debe pagar. El agua de lluvia puede proveer la demanda que no requiere agua potable, como el lavado de pisos, el riego del jardín y el tanque del inodoro.

Aquí se pretende analizar la viabilidad de construir una vivienda utilizando técnicas de construcción sostenible, con apoyo de la Ingeniería Mecánica, que dentro de sus áreas de investigación se pretende el uso eficiente de las energías para el cuidado del medio ambiente y la salud de los habitantes. Dentro de la misión de la Universidad esta brindar educación para solucionar problemas actuales y de impacto social. Con este proyecto se está contribuyendo a desarrollar esta misión para seguir trabajando por un mundo más sostenible y también más humano.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Contribuir con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de propender por la investigación en sostenibilidad, analizar la viabilidad de construir una vivienda con técnicas sostenibles.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio previo de resistencia a la estructura del primer piso, que garantice la nueva construcción.
- Diseñar la estructura de la vivienda siguiendo la constitución previa en concreto armado.
- Realizar las pruebas de campo necesarias a la tierra que se utilizará para la posterior construcción del abobe.
- Diseñar el techo verde intensivo utilizando botellas plásticas como recipientes de las plantas.
- Dimensionar el sistema fotovoltaico.
- Desarrollar el sistema de recolección de aguas lluvias.
- Realizar un análisis de costos para la implementación de los sistemas.

4. Proyecto Arquitectónico

4.1 Lugar y Clima

La vivienda objeto de este estudio, está ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander, en el barrio Brisas de Guatiguara 3ª etapa. Piedecuesta es un municipio del área metropolitana de Bucaramanga, se ubica a una latitud de 6,98 y longitud -73,05. Se encuentra sobre la cordillera oriental donde nace el río de oro y otros afluentes que brindan calidad y cantidad de agua a sus habitantes. Su extensión es de 493 km^2 a la altura de 1005 m sobre el nivel del mar. El clima de Bucaramanga es templado seco, la temperatura promedio es de 22,6°C, la máxima media oscila alrededor de 28°C y la temperatura mínima está entre los 18 y 19°C. La humedad relativa del aire es mayor a 80% en promedio y en épocas de lluvias supera el 84%. La velocidad promedio del viento es de 8 m/s.

4.1.1 Orientación. Este es un factor que tiene gran influencia respecto al consumo energético que puede ocasionar la vivienda en cuando a iluminación y acondicionamiento de aire. “lo ideal es que el sol llegue a la casa por la mañana durante el verano, para ello la orientación debe ser al este, y que invierno reciba la luz por la tarde” (canalHogar, 2015). En la *Figura 2* se puede observar que la vivienda tiene orientación Sureste.

4.2 Primera Planta

La vivienda en estudio de este proyecto tiene aproximadamente 55 m^2 , con 5,4 m de frente por 10,5 m de fondo, y una altura de 2,40 m. La construcción inicial es de un piso que consta de dos habitaciones, una sala-comedor, cocina, baño y un amplio patio (*Figura 3*). La cubierta es una losa de hormigón armado de 15 cm de espesor y tiene un pequeño voladizo de 50 cm. La mampostería es de ladrillos H-10, confinados por las columnas, están revocados y pintados. En el

patio se encuentra el lavadero y una habitación en obra negra, ambos cubiertos por láminas de zinc.



Figura 2. Orientación de la Vivienda. Adaptado de Google Maps

4.2.1 Estructura. Por medio de la Junta de Acción Comunal del barrio Brisas de Guatiguara III etapa, se pudo acceder a un plano estructural en la cual se hallan consignados datos sobre la calidad de los materiales utilizados para conformar la estructura: la resistencia a compresión del concreto reforzado $f'_c = 3.000 \text{ p.s.i} = 21 \text{ Mpa}$. El hierro de refuerzo es calibre $\Phi \geq 3/8''$, con una resistencia a la fluencia $f_y = 60.000 \text{ p.s.i} = 420 \text{ Mpa}$. El hierro de los estribos de las columnas es A-37 corrugado calibre $\Phi 1/4''$. Para cimentaciones sobre pila de concreto ciclópeo se tiene $f'_c = 2.500 \text{ p.s.i} = 17,5 \text{ Mpa}$. El diseño se realizó bajo la Norma Sismorresistente Colombiana NSR-98, ley 400 de 1997.

Por observación se hallan columnas de sección 12x20 cm confinando los muros. Son 9 columnas en total, 3 a lo ancho por 3 a lo largo de la vivienda, y se encuentran unidas arriba con vigas chatas del mismo espesor de la losa y abajo con viga de arrastre. El refuerzo de las columnas se puede apreciar sobre de la losa, y corresponde a 6 varillas de 3/8" para las columnas centrales y 4 de 1/2" para las columnas perimetrales. Estas últimas son compartidas con las casas vecinas,

ambas ya tienen construida una segunda planta y han utilizado dos de las cuatro varillas, por lo cual se dispone únicamente de dos varillas para conformar cada una de las 6 columnas perimetrales, y según La Norma Colombiana de Construcción Sismorresistente NSR-10 en C.10.9.2 una columna rectangular debe contener mínimo cuatro varillas longitudinales.

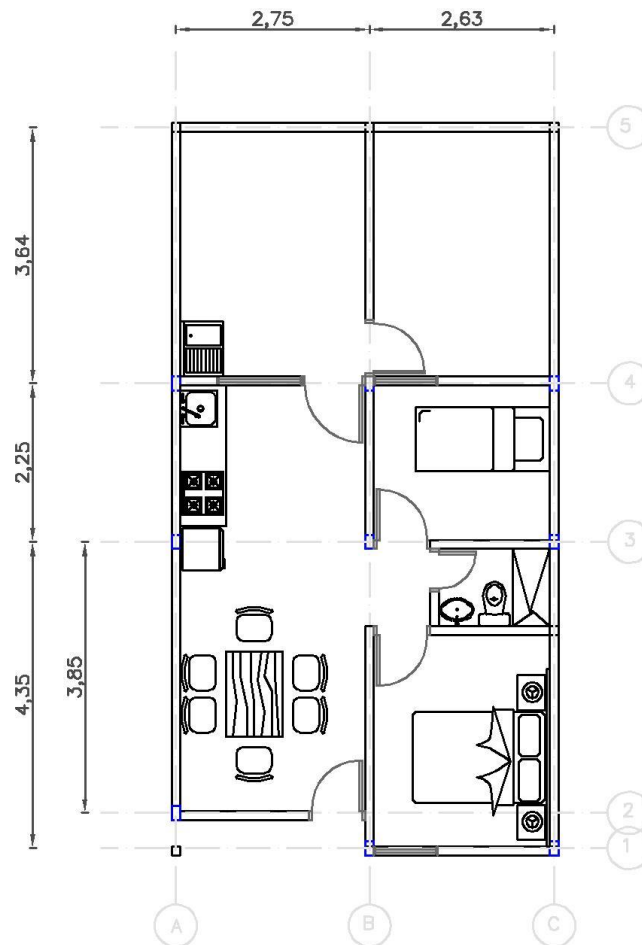


Figura 3. Diseño Arquitectónico Casa Guatiguara Primera Planta

4.2.2 Reforzamiento. Entonces se toma la decisión de reforzar las columnas ampliando su sección y adicionando varillas de refuerzo desde la cimentación. “Es una técnica que es complementaria a la columna existente y ayuda al núcleo de concreto existente a absorber y distribuir las cargas hacia el cimiento” (Riagosa Tuk, 2010). La NSR-10 en C.21.6.1.1 para

estructuras con grado de capacidad de disipación de energía especial (DES), el lado menor de la columna debe ser de 30 cm, por lo cual se adoptará una sección de 30 x 30 cm. En la *Figura 4* se muestra la forma de reforzar las columnas en funcionamiento utilizando estribos que eviten el pandeo lateral de las varillas de refuerzo longitudinal.

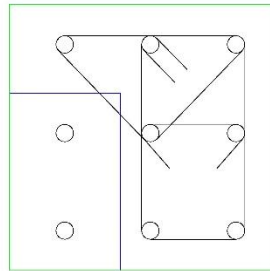


Figura 4. Ampliación y Refuerzo de Columna

4.2.3 Rediseño. En la *Figura 5* se observan los cambios de la primera planta: se traslada el baño, se instala el bloque de las escaleras para la entrada independiente de la segunda planta y debajo un baño de servicio, y se termina la losa de hormigón en el patio dejando únicamente un pequeño hueco para ventilación e iluminación natural. La estructura se completa con tres columnas más en el fondo y se refuerza con otras dos más en las escaleras, además de la ampliación de la sección de las ya existentes. Para la terminación del primer piso se emplean materiales tradicionales: ladrillo H-10, cemento, estuco y pintura.

4.3 Segunda Planta

La segunda planta tiene la misma configuración de la primera, con el fin de guardar la simetría. Únicamente se añade el espacio del voladizo, se prescinde del espacio requerido para ventilación y se destina un pequeño cuarto para ubicar los elementos del Sistema Fotovoltaico (S.F.V). Los muros se conforman mediante un sistema mixto de bahareque y adobe, con un espesor de 15 cm y 20 cm respectivamente. En la *Figura 6* se aprecia el diseño arquitectónico.

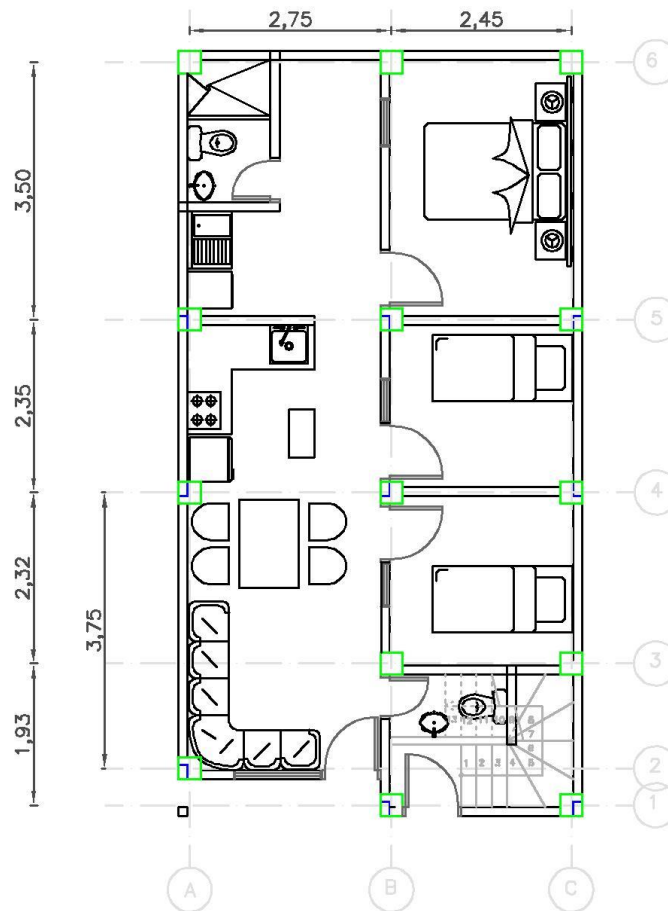


Figura 5. Rediseño Primera Planta

Para el diseño de la edificación se tiene en cuenta la simetría tanto en planta como en altura, aunque para Acero Matallana (2012) la simetría en planta resulta mas significativa. La simetría estructural se da cuando en una configuración, el centro de masa coincide con el centro de rigidez (Blanco, 2012). Los cambios bruscos de rigidez y masa entre niveles en una edificación son perjudiciales y generan concentradores de esfuerzos. Por eso las columnas deben estar alineadas sin cambios bruscos en su sección, los muros y los vanos estar alineados. Debe evitarse el efecto de la columna corta, que se da cuando a lo alto de la columna esta se confina en una parte y en

otra no. La parte confinada absorbe mucha más fuerza lateral y la parte no confinada se convierte en una zona muy vulnerable a fallar.

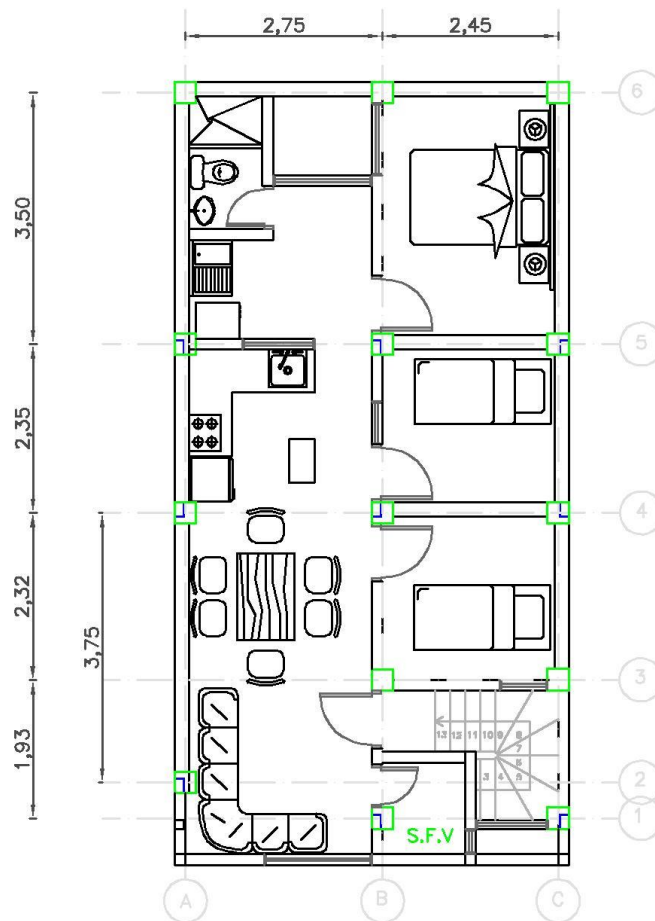


Figura 6. Diseño Arquitectónico Segunda Planta

4.3.1 Muros. Los muros deben ser lo más livianos posibles, pues la magnitud de la fuerza de impacto en un evento sísmico depende del peso de la edificación. “A mayor peso mayor riesgo y a mayor rigidez menor riesgo” (Bonari, 2011). Por eso se utiliza la paja porque además de disminuir su peso, se obtiene aislamiento térmico y se controla la retracción.

En Colombia no hay ninguna norma que rijan la construcción con adobe. En Perú, sin embargo, existe la Norma Técnica de Construcción NTC-E.0.80, la cual establece un espesor para

los muros de adobe en función de su sistema de refuerzo. Para refuerzo con estructura de hormigón armado, la NTC-E.80 en el capítulo 6.4.3 afirma lo siguiente: “la utilización de columnas de concreto armado como confinamiento de muros de adobe debe utilizarse en casos en que el espesor del muro no exceda los 25 cm”. y más abajo dice que “en casos especiales se podrá considerar espesores de muro de 20 – 25 cm”. Por lo tanto, los muros tendrán un espesor de 20 cm, comprendido por adobes de módulo 30 x 15 x 7 cm puestos en soga (*Figura 7*), con una densidad de 945 kg/m^3 , y un revoque de 2,5 cm de espesor a cada lado de la pared, con densidad de 1.900 kg/m^3

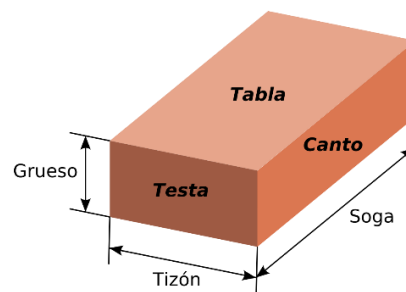


Figura 7. Nomenclatura de las Caras y Aristas de un Ladrillo. Adaptado de Perea (2014)

La NTC-E.080 advierte además la necesidad de arriostrar el muro a las columnas para conseguir una adecuada transmisión de esfuerzos entre el muro y la columna. En este caso se ha de disponer el muro como se muestra en la *Figura 8*. Para esto se construye primero el muro y luego se funde la columna, obteniéndose así una traba entre el muro y la columna. La unión entre adobes se realiza con material de composición similar a la del adobe, con un espesor entre 1,5 y 2 cm, y debe contener la cantidad de arcilla suficiente para obtener buena adherencia en la junta y resistencia a la flexión, pero evitando los efectos nocivos de la retracción.

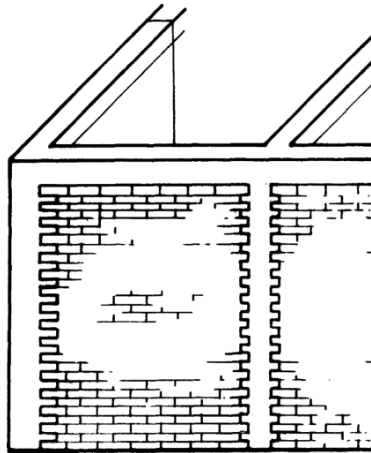


Figura 8. Estructura de hormigón armado con relleno de mampostería. Adaptado de Minke (2005)

4.3.2 Vanos. Los vanos de las puertas y ventanas debilitan las paredes de adobe. En un evento sísmico pueden crearse grietas diagonales desde las esquinas y sobre los dinteles grietas horizontales. Por ello los dinteles requieren estar empotrados por lo menos 40 cm en la mampostería de adobes y de ser posible conformados por una sola viga a la altura del encadenado superior, y el antepecho debajo de la ventana no se ejecute con mampostería sino con un elemento flexible de planchas de madera o bahareque (*Figura 9 izquierda*). Además, las dimensiones de los vanos deben seguir las reglas que se observan a la derecha en la *Figura 9 derecha*: la distancia (a) entre la esquina de la pared y el vano de la puerta o ventana debe ser un tercio de la altura de la pared y como máximo un metro. La abertura del vano (b) debe ser la menor distancia entre un tercio de la longitud horizontal de la pared y la mitad de la altura de la pared. Su longitud máxima no debe superar 120 cm. (Minke, Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra, 2005).

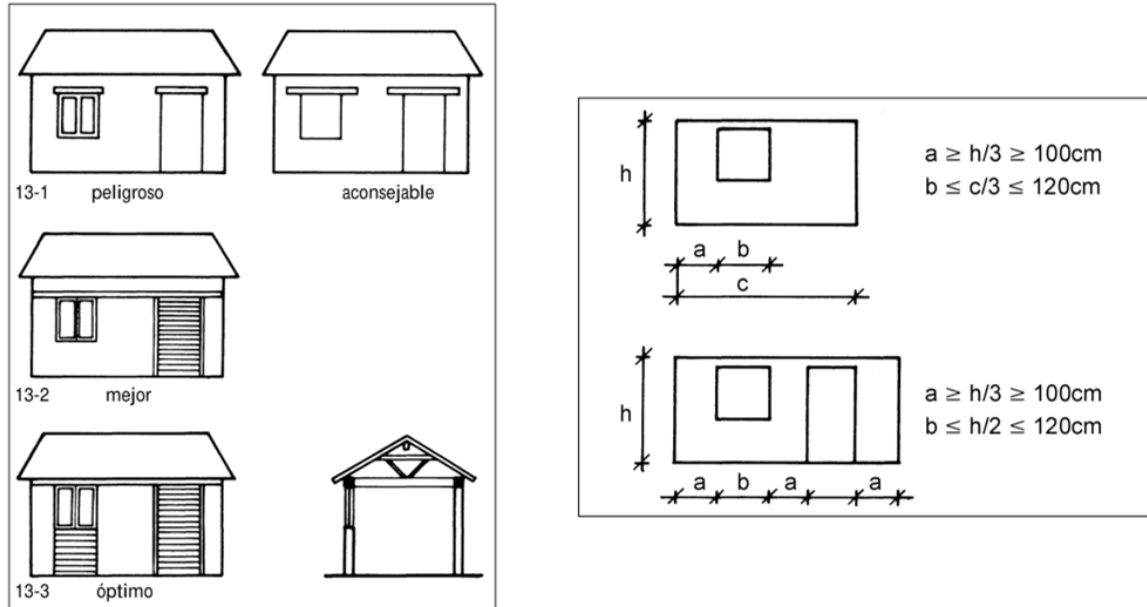


Figura 9. Soluciones para dinteles y vanos. Adaptado de Minke (2005)

4.3.3 Sistema Mixto. El diseño arquitectónico para este proyecto se complica si se siguen las reglas de la *Figura 9* derecha para la ejecución de los muros con adobe. Por lo cual se determina para aquellas paredes donde se ubican vanos para puertas y ventanas, así como para aquellas paredes que no pueden confinarse con las columnas, construir utilizando un sistema mixto de madera, barro y paja. Se construye un marco de madera como el de la *Figura 10*, el cual es arriostrado por medio de pernos roscados a las vigas del piso y del encadenado superior, se clavan listones de una pulgada a 45° cada 15 cm aproximadamente por ambas caras del marco, luego se rellenan con barro amasado con paja y finalmente se revoca.

4.3.4 Tímpanos. Los tímpanos son los huecos que quedan arriba de la viga collar cuando la cubierta es a dos aguas. En la *Figura 12* se puede ver la forma de ejecutarse, utilizando una viga inclinada de concreto reforzado que confina la pared de adobes y a su vez conforma el cabreado de la cubierta, es decir su viga principal de apoyo.



Figura 10. Marco de Madera. Adaptado de Howard (2013)

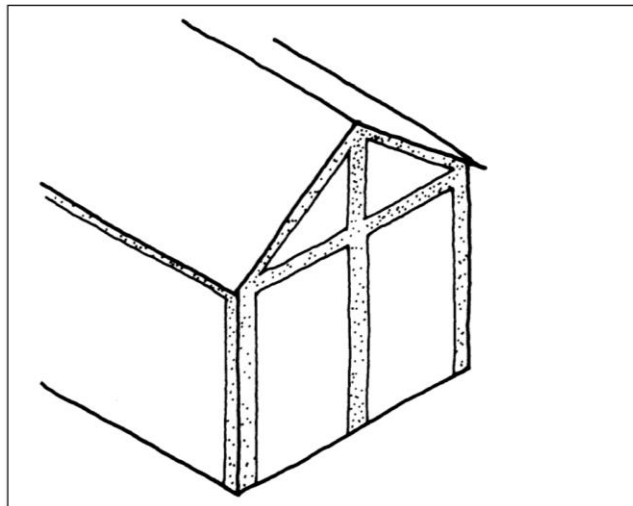


Figura 11. Tímpano Estabilizado con Estructura de Hormigón Armado. Adaptado de Minke, Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra (2005)

4.3.5 Escaleras. Se realiza en concreto reforzado en forma de U, con recrecido en forma de abanico (*Figura 13*), la huella es de 21 cm y el peralte de 18,20 cm, con lo cual se alcanza la altura de 2,55 m que corresponde a la altura libre de piso (2,4 m) más el espesor de la losa (0,15 m) utilizando 14 peldaños.



Figura 12. Escalera en U Compensada

5. Proyecto Estructural

Colombia está localizada dentro de las zonas con más actividad sísmica de la tierra. Se encuentra rodeado por el pacífico por el cinturón de fuego, y en su territorio convergen la placa de Nazca, la placa sudamericana y la Caribe, donde se localizan zonas de alto riesgo. Allí se encuentran los departamentos de Nariño, Cauca, el Choco, el Eje Cafetero, Santander y Norte de Santander (*Figura 13*). Bucaramanga, por tanto, se ubica en zona de alto riesgo sísmico.

5.1 Grado de capacidad de disipación de energía.

La NSR-10 en A.3.1.3 establece tres grados de capacidad de disipación de energía mínimos: disipación especial (DES), disipación moderada (DMO) y disipación mínima (DMI), los cuales se asignan de acuerdo con el sistema estructural, tipo de material estructural y las zonas de amenaza sísmica. Para sistema estructural de pórtico en concreto reforzado y zona de amenaza sísmica alta,

y columnas articuladas entre sí, resistente a momentos, cargas verticales y fuerzas horizontales. La estructura debe ser rígida para evitar excesivos desplazamientos laterales (deriva). Las columnas deben ser más rígidas que las vigas porque tienen influencia en la estabilidad de todos los niveles de la edificación.

En este proyecto la estructura de la edificación se conformará por 14 columnas apoyadas en una cimentación de zapata aislada y viga de atado. El entrepiso se conforma por una losa de concreto reforzado de 15 cm de espesor, apoyado en villas chatas del mismo espesor. Para la segunda planta se tienen dos vigas: la viga de encadenado horizontal a la altura de 2,40 m desde la losa, y una viga inclinada sobre la cual se apoya la cubierta de techo.

5.2.1 Losa. La losa existente es de 15 cm de espesor. Para verificar el espesor de la losa se utiliza la tabla C.9.5(a) de la NSR-10 (*Figura 14*). Allí se da la formula a utilizar según las condiciones de apoyo de la viga. La losa que falta aún por fundir tiene un extremo continuo, y se utiliza $h = l / 24$ donde l es la luz que cubre la viga, que en este caso es de 3,5 m. Por lo tanto, $h = 14,6 \text{ cm}$, y se utiliza el mismo espesor de losa de 15 cm.

5.2.2 Vigas. Para las vigas collar o vigas de encadenado superior, se usa la misma tabla C.9.5(a) (*Figura 14*). la viga critica es aquella que está centrada y cuya luz corresponde a $l = 3,5 \text{ m}$ que, aunque no es la más larga, tiene un solo extremo continuo, y se toma el espesor $h = l / 18,5$. Dando por resultado $18,9 \text{ cm}$, y se redondea valor a $h = 20 \text{ cm}$. El espesor de la viga corresponde de 1,75 a 2 veces la base de la viga (b). Pero por cuestiones arquitectónicas y teniendo en cuenta los eventos sísmicos, se le asigna a b el valor correspondiente al ancho del muro, y asimismo el espesor de la viga se aumenta. Entonces $b = 20 \text{ cm}$ y $h = 30$.

TABLA C.9.5(a) — Alturas o espesores mínimos de vigas no preesforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones

	Espesor mínimo, h			
	Simplemente apoyados	Con un Extremo continuo	Ambos Extremos continuos	En voladizo
Elementos	Elementos que NO soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes.			
Losas macizas en una dirección	$\frac{\ell}{20}$	$\frac{\ell}{24}$	$\frac{\ell}{28}$	$\frac{\ell}{10}$
Vigas o losas nervadas en una dirección	$\frac{\ell}{16}$	$\frac{\ell}{18.5}$	$\frac{\ell}{21}$	$\frac{\ell}{8}$

NOTAS:

Los valores dados en esta tabla se deben usar directamente en elementos de concreto de peso normal y refuerzo grado 420 MPa. Para otras condiciones, los valores deben modificarse como sigue:

(a) Para concreto liviano estructural con densidad w_c dentro del rango de 1 440 a 1 840 kg/m³, los valores de la tabla deben multiplicarse por $(1,65 - 0,0003w_c)$, pero no menos de 1.09.

(b) Para f_y distinto de 420 MPa, los valores de esta tabla deben multiplicarse por $(0,4 + f_y / 700)$.

Figura 14. Tabla para Predimensionamiento de Losas y Vigas. Adaptado de NSR-10

5.2.3 Columnas. La columna es un elemento que se somete principalmente a compresión, aunque también se diseñan para flexión, así que la combinación de ambos se denomina flexocompresión. Las dimensiones de la columna se rigen por la resistencia, rigidez y estabilidad. Según Arnal y Epelboim (1985) el área de la columna de concreto reforzado se calcula de acuerdo con la *Ecuación 1*, donde A_c es el área de la sección de la columna, P_u es la carga axial de compresión mayorada, f'_c la resistencia a la compresión, α es un factor según la posición de la columna indicado en la Tabla 1, y Φ es un factor de minorización de resistencia. $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y para columnas con estribos $\Phi = 0,65$.

$$A_c = \frac{P_u}{\alpha * \Phi * f'_c} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Tabla 1
Factor α según la posición de la columna

Tipo de Columna	α
Esquina	0,20
Borde	0,25
Central	0,28

Nota. Adaptado de Arnal y Epelboim (1985)

5.2.3.1 Áreas tributarias. Es el área que influye sobre cada elemento, determinando la magnitud de la carga que debe soportar. En la *Figura 15* se observa el área tributaria que corresponde a la columna B5, ya que esta se considera como la más crítica.

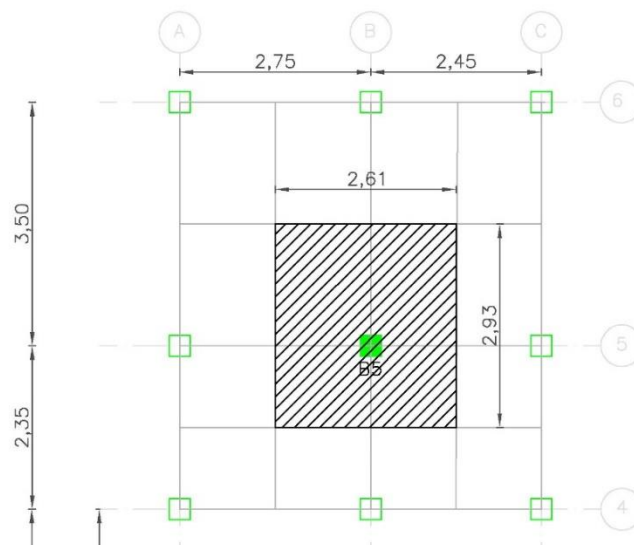


Figura 15. Área Tributaria de Columna

5.2.3.2 Cargas muertas. Se refieren a aquellas que se mantienen fijas en su posición y magnitud durante la vida útil de la edificación, como el peso propio de la misma, los muros, entrepisos, cubiertas, revestimientos, solados, etc. En la Tabla 2 se listan las cargas por unidad de superficie que provienen del peso muerto de la edificación, luego se multiplican por el área tributaria, dando como resultado 3.014 kg.

Tabla 2
Avaluo de cargas muertas

Componente	Carga (kgf/m ²)
Cubierta de techo verde	77
Muros	142
Revoque	95
Piso de baldosa cerámica ^a	80
TOTAL	394

Nota. ^a Adaptado de NSR-10, Tabla B.3.4.1-3

Las cargas debidas al peso propio de los elementos de hormigón armado sobre la columna B5 se describen en la Tabla 3. Dicho peso se obtiene del producto del volumen influyente de cada elemento con el peso específico del material, que para el hormigón armado este es de 2400 kg/m^3 .

Tabla 3
Peso propio de elementos de Hormigón Armado

Elemento	Longitud [m]	Base [m]	Altura [m]	Volumen [m ³]	Peso sobre la columna B5 [Kg]
Viga de amarre	2,93+2,61	0,20	0,30	0,3324	798
Viga de cabreado	2,93	0,20	0,30	0,1758	422
Losa	2,93	2,61	0,15	1,1471	2.754
Columna	6	0,2	0,4	0,5400	1.296
Total					5.270

5.2.3.3 Cargas vivas. Son aquellas que varían tanto en posición como en magnitud, tales como personas, muebles, equipos, entre otros. Para uso residencial la NSR-10 establece el valor de 180 kg/m^2 , y para cubiertas con inclinación menor o igual a 15° , 50 kg/m^2 . Afectando estos valores por el área tributaria resultan en 1.377 kg y 383 kg respectivamente.

5.2.3.4 Combinaciones de carga. Se deben afectar los valores de las cargas utilizando las combinaciones de las Ecuaciones 2 y 3, donde D representa la carga muerta y L la carga viva.

$$1,4 D \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$1,2D + 1,6L \quad (\text{Ecuación 3})$$

Reemplazando los valores de las cargas en las ecuaciones 2 y 3 se tiene:

$$1,4 (3.014 + 5.270)kg = 11.598 kg$$

$$1,2(3.014 + 5.270)kg + 1,6(1.377 + 383) = 12.757 kg$$

Por lo tanto, $P_u = 12.757 kg$, y de acuerdo con la *Ecuación 1*, $A_c = 333,8 cm^2$. Sin embargo, la NSR-10 establece para zona de alto riesgo sísmico un área mínima de $900 cm^2$. Por ello la sección debe ser de $30 \times 30 cm$.

5.3 Métodos de diseño

En la actualidad se utilizan dos métodos principales de diseño estructural: método por esfuerzos de trabajo admisible y método de la resistencia. Para estructuras de concreto reforzado se viene utilizando el método por resistencia.

5.3.1 Método por esfuerzos de trabajo. Consiste en diseñar una estructura para trabajar a algún porcentaje apropiado establecido de su capacidad total, utilizando la teoría clásica del comportamiento elástico de los materiales. La seguridad se mide al comparar dos límites: un aceptable para el esfuerzo máximo y un nivel tolerable para el alcance de la deformación. Estos límites se calculan en respuesta a las cargas de servicio, es decir a las cargas producidas por las condiciones de uso normal.

5.3.2 Método de la resistencia o LRFD. Método plástico que consiste en diseñar una estructura para fallar, considerando una condición de carga superior a la que debería experimentar durante su uso. Las fuerzas de diseño son afectadas por coeficientes de reducción y factores de carga, de modo que se cumpla la *Ecuación 4*: Resistencia de diseño \geq Resistencia requerida:

$$\Phi S_n \geq U \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde Φ es un coeficiente de reducción de resistencia, que depende del modo de aplicación de la carga, ya sea flexión, carga axial, cortante o torsión. La resistencia requerida U se calcula a partir de las combinaciones de carga mayoradas establecidas en el Título B de la NSR-10.

5.4 Parámetros de diseño con Cypecad

El software Cypecad puede utilizarse gratuitamente con una licencia de evaluación temporal (10 días). La versión utilizada es la 2018.i, la cual se usará con el fin de diseñar los elementos de la estructura: vigas y pilares. Su uso exige la introducción de valores que dependen de algunos conceptos que se describen a continuación.

5.4.1 Grupos de uso. Se clasifican en cuatro y definen el coeficiente de importancia I , el cual “modifica el espectro, y con ello las fuerzas de diseño, de acuerdo con el grupo de uso a que este asignada la edificación” (NSR-10, A.2.5.2). Al grupo IV pertenecen las edificaciones indispensables como clínicas, hospitales, aeropuertos, refugios para emergencias, entre otros, que deben funcionar durante y después de un sismo. Al grupo III corresponden las edificaciones de atención a la comunidad: estaciones de bomberos, defensa civil, policía, guarderías, colegios, universidades, entre otros, los cuales son indispensables para atender la emergencia luego de un temblor. En el grupo II están las estructuras de ocupación especial: edificaciones en donde se pueden reunir más de 200 personas en un mismo salón, graderías al aire libre donde pueda haber más de 200 personas a la vez, edificios gubernamentales, almacenes y centros comerciales. Finalmente corresponden al grupo I las estructuras de ocupación normal, aquellas que no pertenecen a los grupos antes mencionados. En este grupo se encuentra la edificación que se estudia en este proyecto, que es una vivienda de uso residencial, con un coeficiente de importancia $I = 1,00$.

Los elementos no estructurales como los acabados, instalaciones y estanterías deben responder ante la ocurrencia de un sismo de acuerdo con su desempeño mínimo en función del grupo de uso. El desempeño mínimo según lo define la NSR-10 en A.9.2.1 se clasifica en tres categorías: superior, bueno y bajo. Para el grupo de uso I se requiere un desempeño bajo, esto significa que ante la ocurrencia del sismo de diseño se pueden presentar daños graves, inclusive no reparables, pero sin desprendimiento o colapso.

5.4.2 Espectro de aceleraciones. Los eventos sísmicos se producen por el movimiento relativo entre placas tectónicas. Los movimientos generan fuerzas producto de la aceleración de la onda sísmica y la masa de la estructura. Dicha aceleración se da en dos sentidos: horizontal y vertical. “Los edificios son afectados mayormente por la aceleración horizontal creada por el movimiento de la tierra en el plano horizontal” (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). Las fuerzas verticales no son tenidas en cuenta en la mayoría de los análisis estructurales.

Para el diseño sismorresistente de la estructura de hormigón armado según el método de análisis dinámico y para el cálculo de derivas (desplazamientos relativos entre niveles contiguos), se utiliza el espectro elástico de aceleraciones (\mathbf{S}_a) (Figura 16), que corresponde a la aceleración del suelo durante el evento sísmico, expresada como fracción de la gravedad. Dicho espectro se interpreta como una función aleatoria compuesta por una secuencia no periódica de pulsos, donde su área refleja la efectividad en producir vibraciones estructurales, y su amplitud indica la severidad del movimiento del suelo (Linares Monsalve & Sanchez Gonzalez, 2005).

La aceleración pico efectiva (\mathbf{A}_a) y velocidad pico efectiva (\mathbf{A}_v) que definen los movimientos sísmicos de diseño para Bucaramanga debido a su riesgo sísmico alto, corresponden a los valores: $\mathbf{A}_a = 0,25$ y $\mathbf{A}_v = 0,25$ (NSR-10, Tabla A.2.3-2).

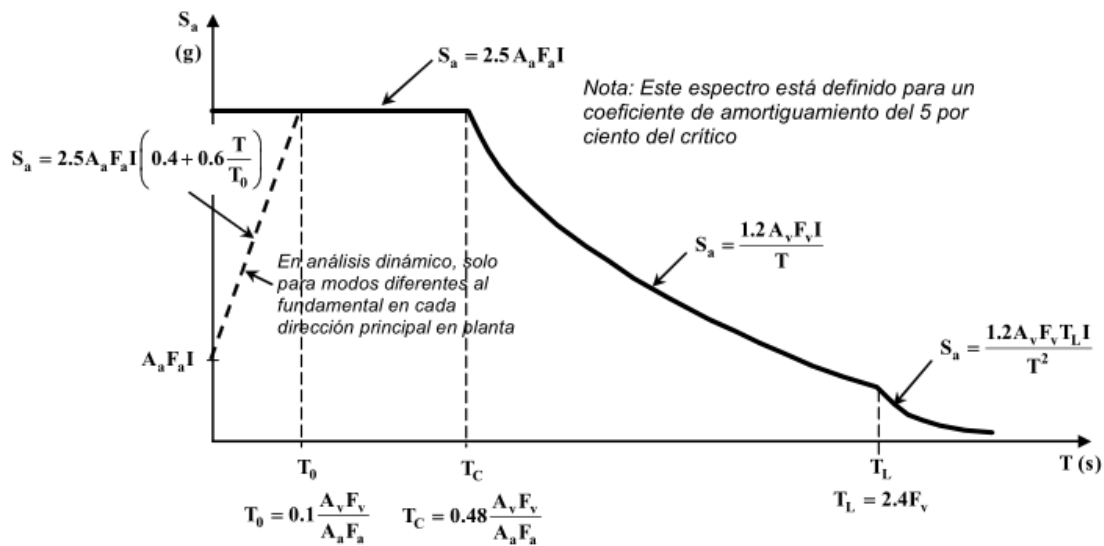


Figura 16. Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño Como Fracción de g. Adaptado de NSR-10, Figura A.2.6-1

5.4.3 Fuerzas sísmicas. Las fuerzas sísmicas (F_S) se obtienen a través del análisis por medio del espectro de diseño, y para el diseño estructural se utilizan las fuerzas sísmicas reducidas (E), las cuales se relacionan en la Ecuacion 5.

$$E = \frac{F_S}{R} \quad (\text{Ecuacion 5})$$

$$R = \Phi_a \Phi_p \Phi_r R_0 \quad (\text{Ecuacion 6})$$

Donde R es el coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño y R_0 es el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico, el cual tiene el valor de $R_0 = 7,0$ para estructuras con capacidad de disipación de energía especial (DES). Los valores Φ_a, Φ_p, Φ_r son coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía causados por irregularidades en altura (Φ_a), en planta (Φ_p), y por ausencia de redundancia en el sistema de resistencia sísmica (Φ_r). La edificación se considera regular tanto en planta como en altura por lo tanto $\Phi_a =, \Phi_p = 1,0$. La ausencia de redundancia tiene que ver con el número de ejes de columnas

que posee la edificación. Cuando haya más de 4 ejes en ambos sentidos x e y, entonces se puede considerar $\Phi_r = 1,0$. En el sentido x, se tienen 3 ejes y en el sentido y se tienen más de 4. Así pues, para el eje x $\Phi_{rx} = 0,9$ y para el eje y $\Phi_{ry} = 1,0$.

5.4.4 Caracterización del suelo. El suelo debe ser capacitado para resistir las cargas que se le impongan por parte de la edificación, y su nivel freático (corriente de agua subterránea) debe ser conocido, pues tiene gran repercusión en la estabilidad del edificio (Heredia Montes, 2012).

Dentro del Cypecad se debe especificar el perfil del suelo, el cual se identifica con la velocidad media cortante \bar{v}_s en m/s . Dentro del plano estructural del proyecto inicial se halla consignado el perfil de suelo como tipo S2, y una capacidad portante del terreno $\sigma_t = 30 Tn/m^2$. En la *Figura 17* se aprecia la descripción del suelo correspondiente al perfil S2, según la NSR-98.

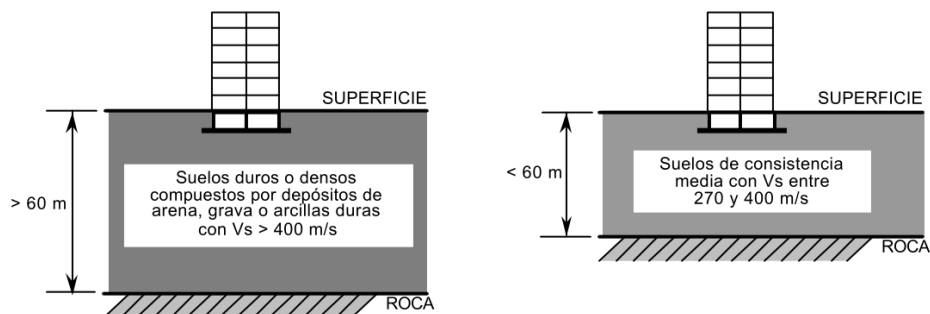


Figura 17. Perfil de Suelo S2. Adaptado de NSR-98, Figura A.2-3(b)

5.5 Resultados de Modelamiento

Primero se debe suministrar los datos del proyecto, definir los materiales y las normas que aplican para el diseño, en este caso se fija la NSR-10. En la *Figura 18* se aprecia el modelo en 3D de la estructura, desde la cimentación hasta la placa para tanques. Luego de crear el modelo, se corre el programa para verificar el diseño de cada uno de los elementos según los parámetros asignados, como las cargas que actúan sobre la estructura, incluyendo las de sismo, y la geometría de la

edificación, entre otros. El programa se encarga de comprobar las dimensiones de los elementos y asigna el refuerzo de acero a cada uno de ellos.

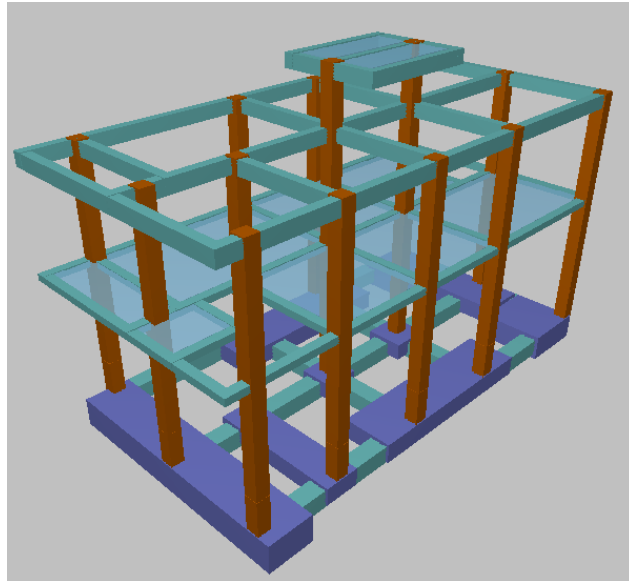


Figura 18. Modelo 3D Cypecad

5.5.1 Armado de columnas. Las dimensiones de las columnas 30 x 30 cumplieron los requisitos que la norma frente a las solicitaciones sísmicas y demás cargas. En la *Figura 19* se observa la disposición de los estribos y refuerzo longitudinal. Las varillas longitudinales son $\Phi 1/2"$, y los estribos $\Phi 3/8"$. La cuantía de acero es del 1.17%, y según la NSR-10 este valor debe ser mayor que el 1% y menor que el 4%, pues un contenido mayor que este no es viable económicamente. Siempre se procura que este valor se encuentre entre el 1% y 2% que son soluciones económicamente aceptables y cumplen con las condiciones de carga y de diseño (Ingeniería Colombiana, 2016). El espesor del recubrimiento según la norma es de 4 cm, y la separación entre estribos es de 6 cm.

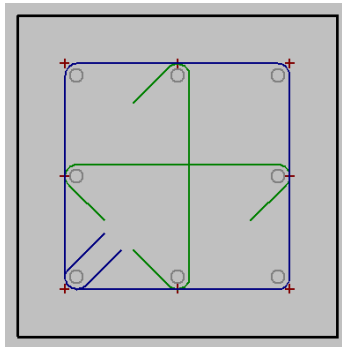


Figura 19. Armado Transversal de Columna

Los traslapes de las varillas deben hacerse en una zona que favorezca la estabilidad del elemento. En la *Figura 20* se observa un empalme ubicado en la parte central y alternado, es decir las varillas se empalman a alturas diferentes, que es lo ideal. La longitud de traslapo depende del diámetro de la varilla. Para $\Phi 1/2''$ esta longitud debe ser de 60 cm.

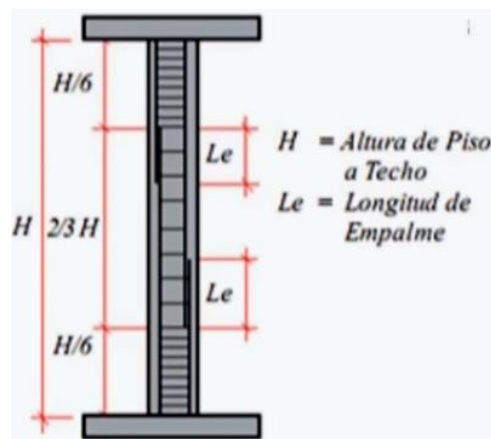


Figura 20. Empalme a Centro y Alternado

5.5.2 Armado de vigas. Las dimensiones de las vigas 20 x 30 cumplen asimismo con la NSR-10 y sus solicitaciones. En la *Figura 21* se puede apreciar el armado de la viga que pasa por el eje 1 en el plano arquitectónico. La armadura longitudinal consiste en 4 varillas de $\Phi 1/2''$, y

estribos de $\Phi 3/8"$ con una separación de 7 cm y 13 cm de acuerdo con la *Figura 22*. La longitud de traslapo para las varillas superiores de la viga debe ser de 80 cm y para las inferiores de 60 cm.

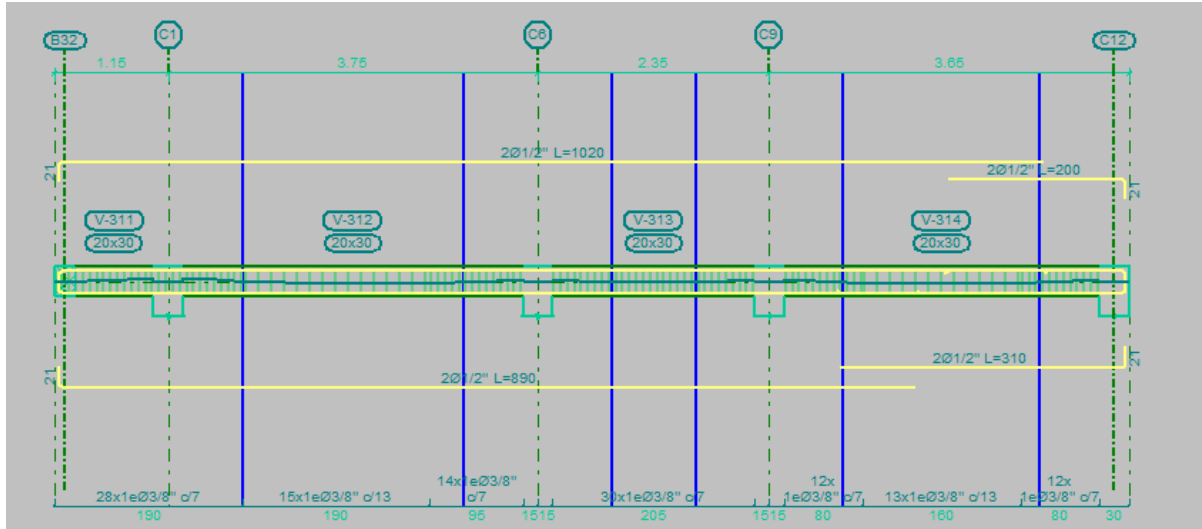


Figura 21. Armado de Viga

5.5.3 Cimentación. En la *Figura 22* se aprecia una imagen tridimensional generada por Cypecad de la cimentación. Esta se calculó a una profundidad de 80 cm, con zapatas aisladas para algunas columnas y zapatas compartidas para otros. El espesor de la cimentación va desde 40 cm hasta 65 cm. El armado se lleva a cabo con varillas calibre $\Phi 5/8"$, las vigas de atado son de sección 40 x 40 cm con refuerzo longitudinal de $\Phi 5/8"$ y estribos de $\Phi 3/8"$ separados cada 20 cm.

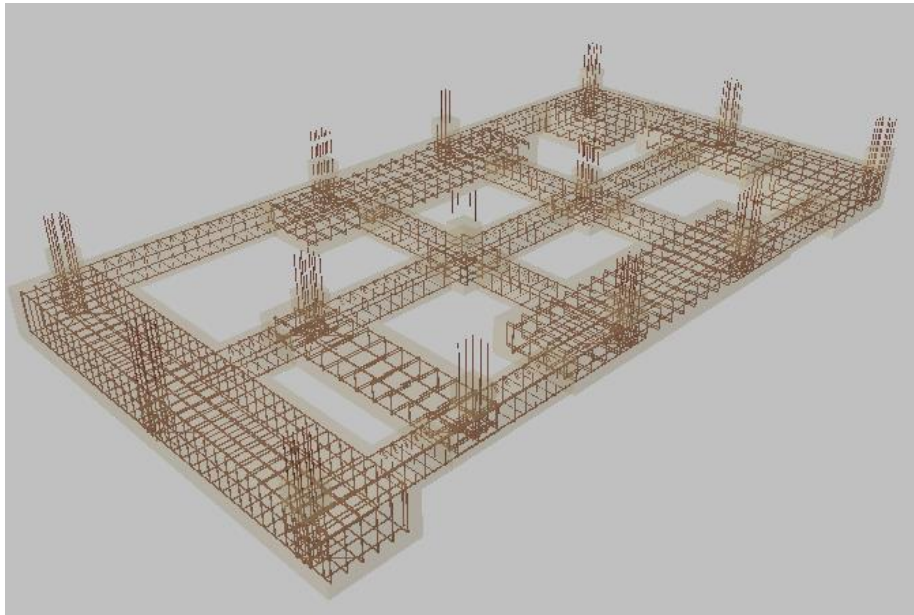


Figura 22. Vista 3D Armado de Cimentación

6. Construcción con Tierra

“No es propio de habitantes de este planeta vivir cada vez más inundados de cemento, asfalto, vidrio y metales, privados del contacto físico con la naturaleza” (Francisco, 2014). La tierra es un elemento natural que posee propiedades fisicomecánicas que la hacen apta para ser utilizada como material de construcción. Sin embargo, es importante conocer sus propiedades para tratarla adecuadamente y aplicar la técnica de construcción adecuada.

6.1 Generalidades

6.1.1 Historia. “Las técnicas de construcción con barro datan de hace más de 9000 años..., la gran Muralla China se construyó hace 4000 años inicialmente casi toda con tierra apisonada” (Minke, Manual de construcción en tierra, 2005). El fin de estas construcciones no era más que la de

proteger la vida humana y regular los vínculos recíprocos entre los hombres (Freud, 1927). En la época de la colonia las técnicas con barro fueron el adobe, la tapia pisada y el bahareque. El adobe hace presencia en la construcción desde el Calcolítico, “sin precisar si se trata de una tradición importada de otras áreas del Mediterráneo o pueda decirse que conoció un desarrollo autónomo en la península Ibérica” (Vela Cossío, 2005), el adobe es el elemento característico de la arquitectura del barro ibérica (Sánchez, 1997). Fatás Fernández & Catalán Garzarán (2005) evidencian en el yacimiento de San Cristóbal de Mazaleón las primeras construcciones con adobes (*Figura 23*), en la cual se hallan adobes de diferentes módulos combinados en una misma construcción: 36x22x9 cm, 46x17x17, 40x18x14, 46x18x11 y 27,5x13x13. Entre los elementos hallados se encuentran fragmentos de revestimiento de barro con improntas de madera en su cara interna o elementos moldurados. Los adobes se dispondrían sobre un zócalo de piedra que los aislaría de la humedad del suelo, uniéndose entre sí con mortero de arcilla o tierra, y su disposición se realizaría a la soga.



Figura 23. Hallazgos Yacimiento San Cristóbal. Adaptado de Fatás Fernández & Catalán Garzarán (2005)

6.1.2 Composición. La tierra es un material que se compone de arcilla, limo y arena, y en algunos casos contiene grava. Cada uno de estos elementos se identifica principalmente por el tamaño de grano. Las partículas de arena tienen un diámetro entre 0,06 y 2 mm, el limo entre 0,002 y 0,006 mm y las partículas de arcilla son menores a 0,002 mm (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). La función de la arcilla es fundamental, ya que actúa como el aglomerante encargado de pegar las partículas mayores en la tierra, de forma similar como lo hace el cemento en el hormigón. La arena y la grava son agregados sin fuerza aglutinante y conforman una estructura que funciona como el esqueleto del material, evitando durante el secado el fenómeno de la retracción.

La composición granulométrica se puede representar por medio de un diagrama denominado curva de distribución granulométrica como la que se muestra en la *Figura 24*, en la cual se puede apreciar el porcentaje de cada componente de acuerdo con el tamaño de sus partículas: 16% arcilla, 24% limo, 56% arena y 4% grava. Esta distribución granulométrica según Minke (2005) tiene ventajas importantes frente a los efectos de expansión y retracción del barro durante el secado.

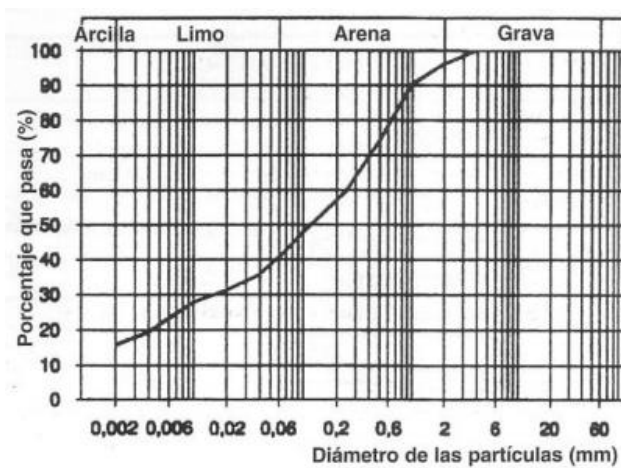


Figura 24. Curva de Distribución Granulométrica de Tierra Arenosa. Adaptado de Minke (2005)

6.1.3 Preparación. Los adobes son elementos hechos a partir de tierra cruda que se mezcla con agua y si se requiere, con otros materiales de carácter orgánico o mineral con el fin de mejorar sus propiedades. El adobe se seca al sol, sin necesidad de cocer en horno, ni comprimir con fuerza estática, requiere para su elaboración una formaleta en la cual se deposita el barro en estado plástico para darle la forma. Los suelos apropiados para la construcción están ubicados generalmente en el subsuelo, que es debajo de la capa que contiene materia orgánica. En la selección de la tierra se debe tener en cuenta su composición granulométrica, plasticidad y retracción (Neves, Faria, Rotondaro, Cevallos, & Hoffmann, 2009).

Para alcanzar las características mecánicas satisfactorias del barro una vez seco, es preciso que la mezcla permanezca en estado saturado entre 48 y 72 horas (Barrios L, 1986), y antes del llenado de los moldes se realice un intenso amasado favoreciendo la atracción electroquímica entre los diferentes minerales arcillosos que los fuerza a adoptar una estructura más compacta y ordenada, aumentando así la cohesión, y al secar una mayor resistencia a compresión.

6.1.3 Consistencia. Se refiere al estado en que puede encontrarse la mezcla según el grado de humedad que contiene. El barro puede tener cuatro estados de consistencia: líquido, plástico, sólido con retracción y sólido sin retracción (*Figura 25*). El índice de plasticidad (IP) se define por la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP). El límite de retracción (LR) se estudia en el apartado 3.3.1.

Para Barrios L, (1986) resulto que la cantidad optima de agua de amasado del suelo se encuentra en el limite liquido mas un tercio del indice de plasticidad, aunque señala que dicho optimo depende de las propiedades de la tierra y de la tecnologia empleada.

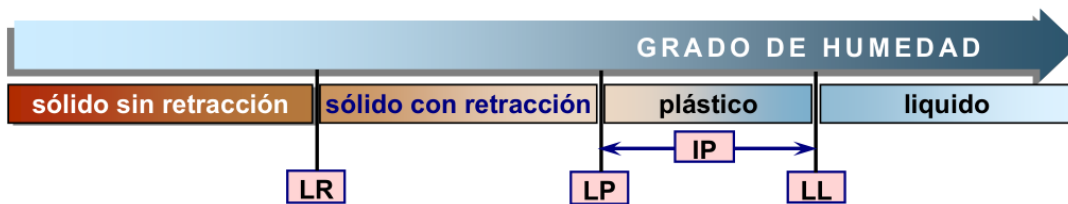


Figura 25. Estado del Suelo en Función de su Grado de Humedad. Adaptado de Neves, Faria, Rotondaro, Cevallos y Hoffmann (2009)

6.2 Ventajas de la construcción con tierra.

El barro es un material que ofrece muchas ventajas en la construcción: alto aislamiento acústico y protección frente a ondas electromagnéticas de alta frecuencia, es resistente al fuego, aun si contiene paja la DIN 4102 (1977) no lo considera como material combustible si su densidad no es menor de 1700 kg/m^3 .

6.2.1 Regular la humedad. La tierra en su estado crudo regula la humedad debido a la porosidad que posee, pudiendo absorber y desorber el agua contenida en el aire (higroscopicidad) y equilibrar su contenido entre un 50 y 70%. Rango en el cual se reduce el contenido de polvo fino en el aire, se activan los mecanismos de protección de la piel contra microbios, se disminuye la vida de virus y bacterias y se disminuyen los malos olores del ambiente. Si la humedad relativa permanece menor que el 40% por un largo periodo de tiempo puede reseca las mucosas del epitelio de la tráquea, que son las encargadas de absorber el polvo, virus y bacterias, y como consecuencia estos cuerpos alcanzan los pulmones provocando una disminución de la resistencia a los resfríos y a enfermedades relacionadas. Por el contrario, si la humedad es superior al 70% entonces la sangre disminuye la absorción del oxígeno, se tiene una sensación respiratoria desagradable y se pueden presentar dolencias reumáticas (Grandjean, 1972) y (Beckert, 1986). En Bucaramanga, por ejemplo, la humedad relativa permanece cerca al 80%.

El intercambio de aire húmedo a baja temperatura del exterior (0°C y 60% HR) con un clima cálido interior (20°C) conduce a descender drásticamente el contenido de humedad del aire (menos del 20%), lo cual puede ajustarse si los muros desorben humedad. Experimentos muestran que la primera capa de 1,5 cm de un muro de adobes es capaz de absorber aproximadamente 300 g de agua por m^2 de la superficie del muro en 48 horas si la humedad del ambiente incrementa súbitamente de 50 a 80%. En cambio, la madera de pino de un mismo espesor absorbe solamente 100 g/m^2 aproximadamente y el ladrillo cocido solo 6-30 g/m^2 (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). “En el ambiente interior de un edificio, los primeros 2-3cm superficiales son los que influyen inmediatamente en la humedad atmosférica de los espacios” (Caballero, 2017).

6.2.2 Difusión de vapor. Se trata de la capacidad que posee un material de migrar el vapor a través de su estructura interna, hecho que se potencializa por la diferencia de presión de vapor entre el exterior e interior de una edificación. Si la temperatura interior es más alta que la exterior, se genera una presión de vapor alta en el interior que ocasiona la migración de este hacia el exterior, dependiendo de la resistencia que ofrezca la pared a la difusión del vapor.

Cada material posee una resistencia propia a la difusión de vapor que se define por el coeficiente de resistencia a la difusión del vapor μ . En la figura 14 se observan algunos valores para diferentes barro y revoques. “El producto de μ por el espesor del elemento de construcción s , da la resistencia específica de la difusión de vapor s_d ” (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). La tierra es un material que tiene una capacidad de difusión óptima, según lo indica la Tabla 4 y la *Figura 26*.

Evitar la difusión de vapor a través de una pared puede resultar perjudicial, reduciendo la capacidad de aislamiento térmico y provocando el crecimiento de moho (Minke , Manual de

construcción en tierra, 2005). Ya que “la humedad se transporta fácilmente por capilaridad, y si no aseguramos la eliminación de ésta, el vapor de agua quedará entre las capas de materiales y condensará” (Caballero, 2017). Es así, que una capa de aislamiento térmico debe ubicarse en lo posible al exterior y no al interior de la pared (*Figura 27*), con el fin de mantener el punto de condensación lejos del interior. Y la resistencia s_d debe ser mayor en el interior que en el exterior (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005).

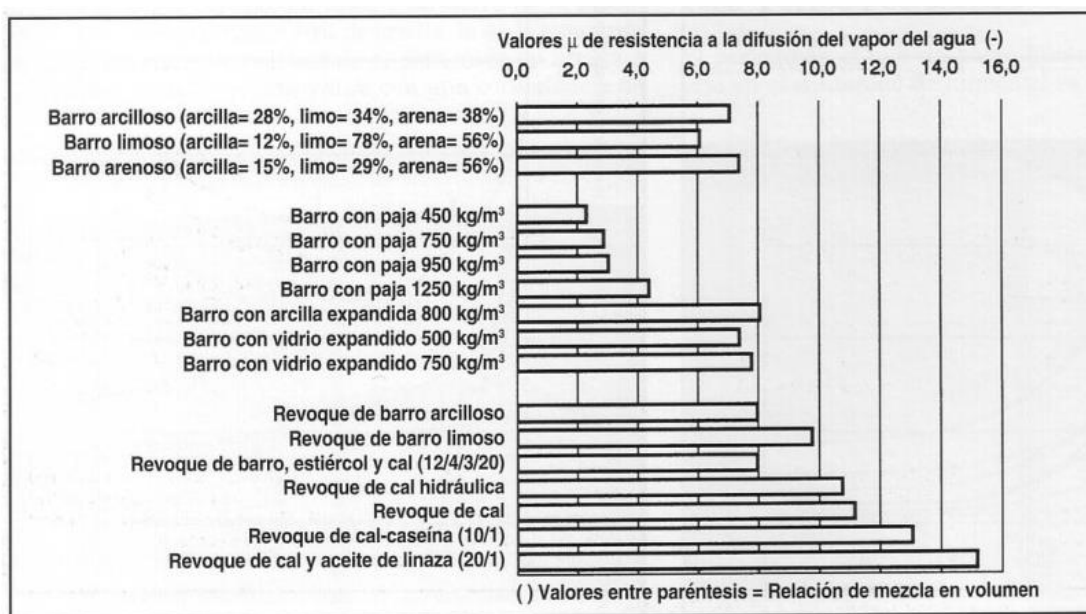


Figura 26. Coeficiente μ de Diferentes Barros y Revoques Según la Norma Alemana DIN 52615. Adaptado de Minke , Manual de construcción en tierra (2005)

Tabla 4

Valores s_d y su Capacidad de Difusión

Valor de s_d ^a	Capacidad de difusión
< 4	Optima
4-7	Satisfactoria
7-15	Mala
15-25	Muy mala
> 25	Barrera impermeable de vapor

Nota. a Unidades en metros. Adaptado de Caballero (2017)

El tratamiento de las superficies influye directamente sobre la resistencia a la difusión de vapor, ya que pinturas pueden reducir notablemente la difusión de vapor de los muros. La DIN 18550 parte 3 señala que la resistencia s_d de revoques externos debe ser menor o igual a 2.0 m.

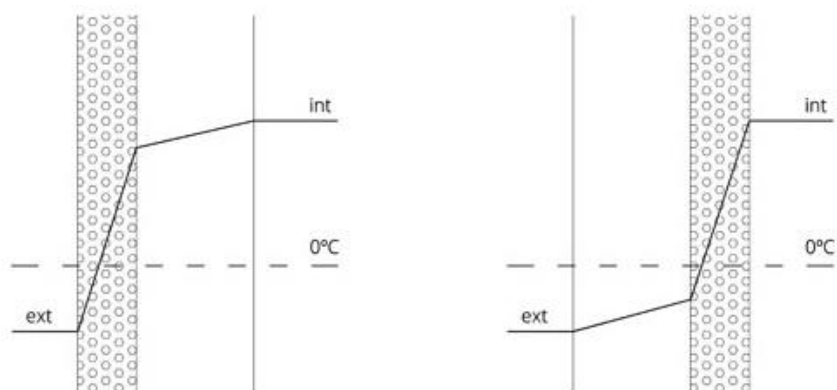


Figura 27. Ubicación Capa de Aislamiento Térmico. Izquierda, aislamiento por exterior. Derecha, aislamiento por interior. Adaptado de Caballero (2017)

6.2.3 Influencia térmica. La capacidad de aislamiento térmico de un muro depende del volumen de aire alojado en los poros y de su humedad. Así pues, entre más ligero el material mayor es su aislamiento térmico y entre más húmedo menor es su efecto aislante (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). El barro alivianado con paja disminuye la densidad de los muros. Por otra parte, la tierra absorbe menos agua que otros materiales (*Figura 28*), ya que tiene un coeficiente de absorción de agua $w[kg/m^2]$ pequeño, el cual se define como la cantidad de agua absorbida en kg por unidad de superficie.

Asimismo, el aislamiento térmico tiene que ver con la conductividad térmica del material $\lambda[W/mK]$, ya que este define la cantidad de calor que penetra en un muro de 1m de espesor a una diferencia de temperatura de 1°C. En la *Figura 29* se muestran valores de λ según la norma alemana DIN 4108 (1998) y otros autores. Por otra parte, el barro posee una capacidad interesante

de almacenar calor, lo cual crea un largo retraso en la penetración del mismo, obteniendo una variación mínima en la temperatura interior. Este efecto se produce debido a su masa térmica, determinada por el producto de su densidad, espesor del muro y calor específico del material. Entonces, una pared delgada, de espesor menor a los 45 cm, no provoca la suficiente masa térmica para lograr este efecto (Heathcote, 2011).

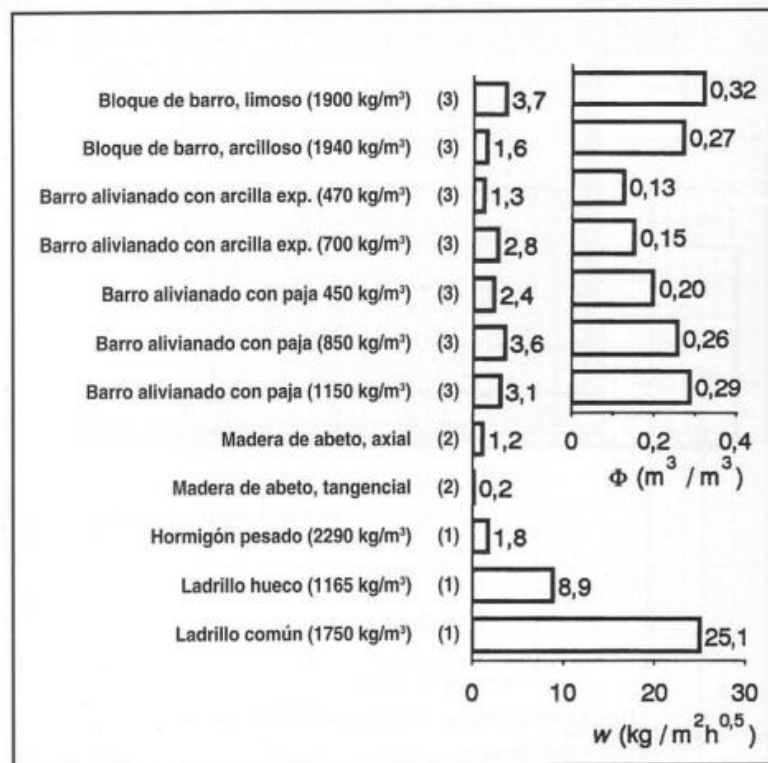


Figura 28. Coeficiente de Absorción de Agua w de Barros en Comparación con Materiales de Construcción Comunes. Adaptado de Minke, Manual de construcción en tierra (2005)

6.2.4 Disminuye la contaminación ambiental. Por varios motivos: para su preparación no se necesita de grandes cantidades de energía comparado con otros materiales de uso común y puede ser extraído del mismo sitio donde se ejecuta la obra. “Para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita solo el 1% de la energía requerida para la preparación, transporte y

elaboración de hormigón armado o ladrillos cocidos” (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). El barro, además, puede ser reutilizado porque nunca será un escombros que contamine el medio ambiente. Materiales con bajas emisiones ayudan a la reducción de la contaminación, teniendo en cuenta que “la construcción de edificios y obras civiles consume el 60% de la materia prima que se extrae de la litosfera” (Zabala Bribián, Valero Capilla, & Aranda Usón, 2011).

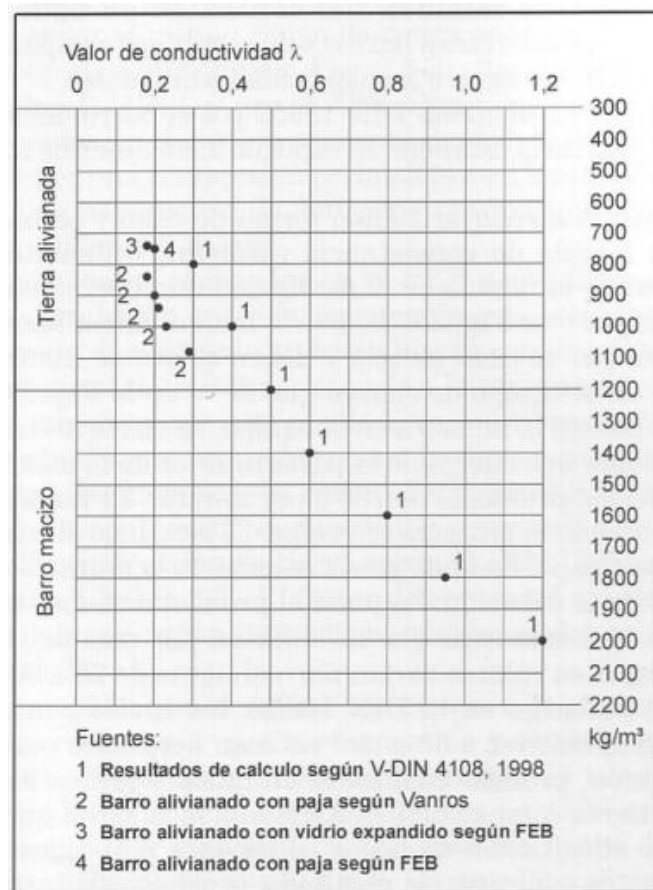


Figura 29. Resultados λ de Cálculo Según DIN 4108 (1998) y Otros Autores. Adaptado de Minke, Manual de construcción en tierra (2005)

6.2.5 Salud. Trabajar con barro es saludable, no hay riesgo abrasivo para las manos y tampoco es tóxico para tener que tomar precauciones en su uso y manipulación, no hay riesgo por

alergias, y antes bien es un material que mantiene un ambiente confortable con menos reuma y mejor calidad del aire.

6.3 Limitaciones del barro

Las construcciones con barro no son muy apetecidas por muchas personas y hay una serie de prejuicios en contra de la tierra, pero en realidad no conocen la verdad acerca de este material. Se considera que en las paredes de tierra pueden habitar bichos como el mal de Chagas, cosa que no es cierta si no se permiten poros o grietas donde puedan alojarse dichos insectos, lo cual se soluciona con un buen repellado y consolidación de la pared, que además permite la limpieza de la misma.

6.3.1 Permeabilidad. Debido a su gran porosidad los elementos hechos con barro crudo son permeables, lo cual hace necesario que sea protegido frente al agua lluvia. Un alero que cubra los muros puede solucionar de forma sencilla este inconveniente, también un zócalo o sobrecimiento impermeable que evite el transporte de la humedad desde el suelo por capilaridad. De igual forma se puede utilizar un revoque que proteja las paredes de los efectos del agua. La cal, la muñiga de vaca, la orina, cuajada descremada y otros agentes estabilizantes como el aceite de linaza o el silicato de sodio, en una mezcla con barro arcilloso conducen a mejorar notablemente las condiciones de permeabilidad de una pared. Una receta sencilla consiste en: una parte de cal hidráulica, cuatro partes de estiércol remojado y reposado por tres días y ocho partes de barro arenoso. El revoque se pule luego de 10 minutos con un paño fieltro para que las partículas de arcilla salgan a la superficie y la arena no se desprenda, luego se puede aplicar una pintura natural a base de cal o arcilla, pero debe evitarse las pinturas de látex porque sellan completamente los poros y evitan la difusión de vapor.

Minke (2005) por su parte, demostro que una tierra limosa estabilizada con arena gruesa (1-2 mm) y con un contenido de arcilla del 30% para la conformacion de adobes, presenta una infima erosion en comparacion con otras muestras.

6.3.1 Retracción. En la mezcla del barro con el agua se activan las fuerzas aglutinantes de la arcilla, la cual se va expandiendo a medida que absorbe agua. En el proceso de secado el agua se evapora dejando poros en el lugar que antes ocupaba la arcilla, ya que esta se contrae obteniéndose así un elemento sólido y resistente. Este proceso requiere de gran cuidado, que evite las retracciones en el elemento y ocasione fisuras excesivas que puedan dañar el material. Por lo que debe controlarse primero la cantidad de arcilla y luego la cantidad de agua, de modo que no se exceda el límite de retracción (LR) (Figura 30), “determinado por el grado de humedad a partir del cual el volumen del suelo permanece constante cuando se procesa la evaporación del agua” (Neves et al., 2009).

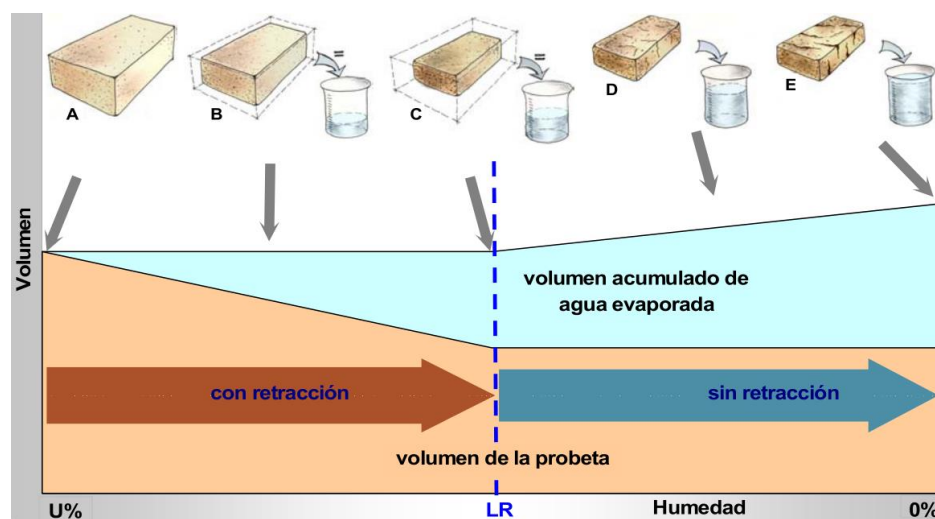


Figura 30. Relación Entre el Limite de Retracción (LR) y las Variaciones del Volumen, de la Tierra y el Agua Evaporada, Durante el Proceso de Secado. Adaptado de Neves et al. (2009).

“La magnitud de la expansión y la retracción depende del tipo y cantidad de arcilla (la arcilla montmorillonita tiene un efecto mayor que la caolinita o la illita) y también de la distribución granulométrica del limo y la arena” (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). Asimismo, la velocidad de la evaporación influye en la retracción de los elementos, pues un secado rápido y abrupto conduce a la aparición de fisuras por retracción. Es así como en los primeros días de secado es importante proteger los adobes de la exposición directa al sol y al viento, cubriéndolos adecuadamente con hojas o manteniéndolos en un lugar adecuado. A una temperatura de 20°C y humedad relativa del 81% el periodo de secado duro unos 30 días, mientras que a la misma temperatura y con una humedad relativa de 44%, el proceso duro solo 14 días (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). Reducir las dimensiones de los elementos y aumentar el tiempo de secado es un método simple para evitar la retracción.

6.3.2 Resistencia. Es evidente que el barro tiene menor resistencia que el concreto y otros materiales de construcción, aunque posee una resistencia que es suficiente para conformar una edificación sismorresistente. Utilizando medios de refuerzo y estabilización de los elementos de tierra, siguiendo los parámetros de diseño que brindan una buena respuesta sísmica, se puede garantizar la seguridad. La DIN 18954 establece que la resistencia permisible a la compresión en elementos de construcción de tierra debe estar de 3 a 5 kgf/cm^2 . Adobes fabricados a mano tienen una resistencia promedio de 30 kgf/cm^2 , con lo cual se mantiene un factor de seguridad aproximado de 7 (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005).

6.4 Estabilización

El adobe para construcción no debe presentar grietas ocasionadas por el efecto de retracción, producto de un excesivo contenido de arcilla. Por eso existen dos formas de tratar este fenómeno: agregando arena, o agregando paja o en su defecto aserrín de madera.

6.4.1 Estabilización con arena. Barrios (1986) tomo dos muestras de tierra extraídas de lugares distintos, el primero de la zona de colina, ubicada al norte de la ciudad de Santiago, y el segundo de la localidad de Til-Til; quinta región, zona eminentemente adobera. En la *Figura 31* se puede observar la relación que hay entre la resistencia a la compresión (\bar{C}), flexocompresión (\bar{F}), retracción lineal media (RET.LM) y velocidad capilar (V.CAP), de acuerdo con el contenido de arena.

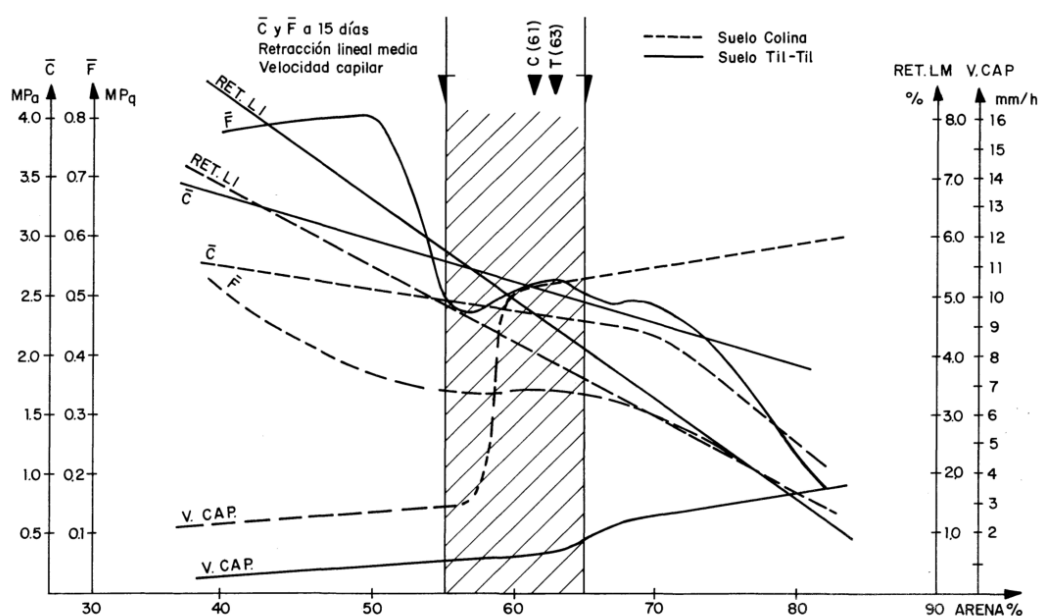


Figura 31. Influencia del Contenido de Arena Sobre las Propiedades de dos Tipos de Tierra. Adaptado de Barrios (1986)

La conclusión de este estudio es que debe aprovecharse el rango donde la curva de flexotracción permanece más o menos constante para establecer el contenido óptimo de arena, este es entre el 55 y 65%. La proporción entre el limo y la arcilla debería ser aproximadamente 1:1 y la sumatoria de ambos estar entre el 35 y 45%. También se observa que el suelo Til-Til presenta variables de mejor calidad, y esto se debe a que el suelo Colina tiene mayor contenido de arcilla requiriendo mayor cantidad de agua para su preparación, y como consecuencia hay una sobresaturación que genera enlaces débiles por falta de trabazón y microfisuras por retracción.

6.4.2 Estabilización con paja. La adición de paja a la mezcla disminuye la densidad y aumenta el aislamiento térmico, ofrece flexibilidad y resistencia a la tracción, y una buena respuesta ante eventos sísmicos. La densidad podría llegar hasta unos 700 kg/m^3 , ya que valores por debajo conformarían muros muy débiles y los tallos de la paja al no quedar bien cubiertos con el barro podrían ser blanco de los insectos (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005). Asimismo, el espesor de los muros no debería superar los 25 cm para evitar la putrefacción, y además el ambiente debe ser seco y ventilado. La paja debe cortarse a una longitud menor o igual al espesor del elemento constructivo.

“De las fibras vegetales la ideal es el codirón y de la paja de cereal es el centeno” (Marangoni, 2013). Para revoque de barro con paja, la paja de cebada ha resultado ser la más adecuada porque es más suave que otras pajas (Minke , Manual de construcción en tierra, 2005)

6.5 Ensayos de campo

Con el fin de juzgar las características de la tierra, se llevan a cabo una serie de ensayos de campo muy sencillos que dan resultados muy buenos, permitiendo conocer el tipo de tierra, para tratarla según la técnica a emplear. Los test que se van a realizar son propuestos por Neves et al. (2009).

Antes de realizar los ensayos, se deben coleccionar porciones de tierra en varios puntos del lugar en donde se pretende extraer la tierra para construcción, totalizando aproximadamente 30 kg. Se toma una porción de la muestra y se hace una forma de cono para luego dividirla en cuatro partes iguales, se juntan dos partes de las esquinas opuestas y se descartan las otras dos, repitiendo el proceso hasta obtener la cantidad necesaria para el test.

6.5.1 Tests Táctil-Visuales. Se examina la apariencia de la tierra con el propósito de revelar algunas características de la tierra. La *Figura 32* se observa el resultado de las pruebas táctil – visuales, hechas a la tierra de muestra. Para la prueba de separación se tomaron 50 g de tierra pulverizada previamente con un martillo, luego se separó la arena, la cual obtuvo un peso de 10 g. Asimismo se nota que la tierra tiene alta capacidad aglutinante, ya que resulta difícil quitarla de las manos cuando se halla en estado húmedo. El brillo también evidenció la presencia de arcilla en la muestra.



Figura 32. Tests Táctil – visuales

6.5.1.1 Separación. Se toma una pequeña muestra de tierra y se esparce con las manos sobre una superficie plana, luego se separan las partículas de mayor tamaño que puedan distinguirse a simple vista, las cuales corresponden a arena y grava, y el restante corresponde a limo y arcilla. Si la cantidad de limo y arcilla es mayor, la tierra se clasifica como limosa o arcillosa, de lo contrario es arenosa. Si la tierra es arenosa, se toma una parte de la muestra entera, es decir, aquella antes de la separación, se humedece con poca agua y se aprieta formando una bola que luego se deja secar al sol. Si la tierra se desintegra al secar, entonces no es apropiada para ser utilizada en construcción y debe ser estabilizada con otros materiales aglomerantes.

6.5.1.2 Color. Los colores claros y brillantes son característicos de suelos inorgánicos, los colores café oscuro, verde oliva o negro caracterizan los suelos orgánicos.

6.5.1.3 Brillo. El brillo es una característica que revela la presencia de arcilla en el suelo. Se toma un poco de material y se amasa con agua hasta formar una bola del tamaño de la mano, seguidamente se corta con un cuchillo por la mitad y se observa: si las superficies son brillantes la tierra es arcillosa, si presentan poco brillo la tierra es limosa y si son opacas la tierra es arenosa.

6.5.1.4 Tacto. Se toma una porción de tierra seca y se restriega entre los dedos con el fin de identificar los tipos de partículas presentes según su textura. La arena raspa y el limo cubre los dedos con partículas suaves como si fuera talco. La presencia de arcilla se evidencia cuando se trata de formar una bola con una porción de tierra húmeda, entre más arcilla haya presente, más fácil será formar la bola.

6.5.2 Test de caída de bola. En este test se evalúa la cohesión de la tierra y con ello la presencia de arcilla. Se toma una porción de tierra y se humedece con la mínima cantidad de agua para formar una bola con diámetro aproximado de 4 cm, se deja caer desde una altura de 1,5 m y

se observa su respuesta frente al impacto. Tierras arcillosas permanecen juntas y las tierras arenosas se disgregan esparciéndose. Según la *Figura 33* Minke (2005) dice que la muestra óptima es la que aparece como tercera de izquierda a derecha, pues tiene una capacidad aglutinante relativamente pobre, pero suficiente para la conformación de adobes.



Figura 33. Referencia Ensayo Caída de la Bola. Adaptado de Minke (2005)

En la *Figura 34* se observa el resultado de la prueba, en la cual se evidencia una tierra arcillosa, pues se nota su alta capacidad aglutinante, se parece más a la primera muestra que aparece de izquierda a derecha en la *Figura 33*.



Figura 34. Test Caída de Bola

6.5.3 Test del vidrio. Este test se fundamenta en la sedimentación, diferenciando los constituyentes de la tierra. Se introduce una muestra de barro seca y desmenuzada en un frasco de vidrio cilíndrico, liso y transparente, hasta cubrir un tercio de su altura. Luego se agrega agua hasta cubrir las dos terceras partes de la altura del frasco, se agrega un poco de sal que ayuda a separar las partículas, se tapa el frasco y se agita con fuerza para que la tierra se disperse en el agua, se deja reposar por una hora y luego se vuelve a agitar. Se deja en reposo sobre una superficie horizontal y se observa como las partículas de mayor tamaño se asientan en el fondo y las finas encima. Por último, se mide la altura que corresponde a cada componente según la estratificación que se pueda notar a simple vista, estimando la cantidad de cada componente.

Sobre esta prueba se tuvo inconvenientes para reconocer las diferentes capas, ya que no se hicieron evidentes. Aunque para Minke (2005) esta prueba no es significativa porque experimentos mostraron que el error de asumir que cada capa corresponde a la proporción de arcilla, limo, arena y grava, puede ser de 1700%.

6.5.4 Test del cordón. En este test se evalúa la resistencia de la tierra en un determinado estado de humedad. Se toma una porción de tierra seca y se adiciona agua hasta que se pueda formar sobre una superficie lisa y plana un cordón de 3 mm de diámetro sin que llegue a romperse. Con esta mezcla se forma una bola que se aprieta entre los dedos pulgar e índice (*Figura 35*), se pueden presentar tres tipos de respuesta: 1) la bola se deshace requiriendo bastante fuerza, entonces el cordón es duro e indica que el contenido de arcilla es alto con alta plasticidad y debe rebajarse añadiendo arena. 2) La bola se fisura y desmorona fácilmente, el cordón es suave y la tierra es arcillo-limosa, arenosa o areno-arcillosa con una plasticidad mediana. 3) No es posible

formar la bola, el cordón es muy frágil y la tierra contiene bastante limo o arena y poca arcilla, su plasticidad es baja.



Figura 35. Test del cordón

6.5.5 Test de la cinta. Este test relaciona la plasticidad con el tipo de tierra. Con la misma consistencia del ensayo anterior se moldea un cilindro del tamaño de un cigarrillo, se amasa para formar una cinta de 3 a 6 mm de espesor y del mayor largo posible (*Figura 36*).



Figura 36. Test de la cinta

Si es posible formar una cinta entre 25 a 30 cm sin dificultad, entonces la tierra es arcillosa y posee alta plasticidad. Si se logra formar una cinta entre 5 a 10 cm con dificultad, la tierra es

arcillo-limosa, arenosa o areno-arcillosa, con una plasticidad mediana. Si no es posible formar la cinta, entonces la tierra contiene bastante limo o arena y poca arcilla, no tiene plasticidad.

6.5.6 Test de Exudación. Evalúa la plasticidad de la tierra en función de su capacidad de retener agua. Se toma una porción de tierra bastante húmeda y se pone sobre la palma de la mano, se golpea con la otra mano de modo que el agua salga a la superficie dándole un aspecto liso y brillante. Se distinguen tres tipos de reacciones: 1) rápida, cuando se consigue aflorar el agua a la superficie con 5 a 10 golpes y la presión de los dedos hace desaparecer el agua inmediatamente, una presión más fuerte aplasta la torta, entonces la tierra posee poca plasticidad y se refiere a tierra arenosa o limosa, arena fina inorgánica o limo grueso inorgánico. 2) Lenta, si con 20 a 30 golpes el agua aparece y desaparece lentamente, la presión de los dedos hace que la torta se deforme como una masa de caucho, este tipo de tierra corresponde a limo ligeramente plástico o limo-arcilloso. 3) Muy lenta, si no hay cambio notable alguno con más de 30 golpes, la tierra tiene una alta plasticidad y se refiere a arcilla. En la *Figura 37* se observa el resultado de la prueba de exudación luego de 35 golpes en la cual se obtuvo una pequeña reacción.

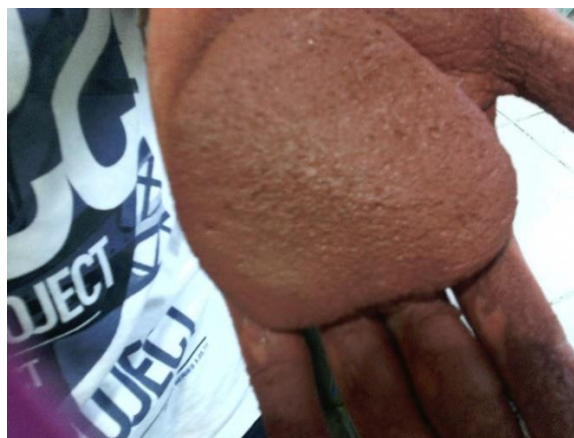


Figura 37. Test de Exudación

6.5.7 Test de resistencia seca. Con este test se identifica el tipo de tierra en función de su resistencia. Se moldea el barro en forma de pastillas de 1 cm de espesor y de 2 a 3 cm de diámetro (*Figura 38*), se dejan secar al sol por dos o más días y luego se intentan romper de dos modos: 1) poniendo la pastilla entre el pulgar y el índice apretando la pastilla axialmente. 2) se utilizan las dos manos para flexionar la pastilla con los dedos pulgar e índice. En la *Figura 39* se muestran las dos formas de ensayar las muestras.



Figura 38. Conformación de las pastillas



Figura 39. Prueba Resistencia Seca

Para la tierra arcillosa no es posible aplastar la pastilla utilizando el método primero, solo se logra romper por flexión, su resistencia es grande. Tierra arcillo-limosa, arcillo-arenosa o arena arcillosa puede romperse mediante fuerza axial utilizando el primer método, su resistencia es mediana. Por último, un suelo arenoso o limoso con poca arcilla puede disgregarse fácilmente por fuerza axial, y tiene poca resistencia.

6.6 Evaluación de Resultados

Para evaluar los resultados de las pruebas se utilizan las Tablas 5 y 6, y en la Tabla 7 se muestran los resultados de los test.

Tabla 5
Identificación de la Tierra por Inspección Táctil-Visual

Clasificación	Textura y Apariencia del suelo
Arena	Textura granular. Se puede visualizar el tamaño de los granos
Tierra arenosa	Textura granular. Mantiene las características de la arena, aunque puede notarse su cohesión por la presencia de arcilla y limo
Tierra limosa	Textura fina. Contiene un poco de arena fina y arcilla. En estado seco tiene apariencia compacta, pero pulveriza con facilidad, en estado húmedo se torna pegajosa, pero se despega al frotarse las manos.
Tierra arcillosa	Textura fina. En estado seco se fractura en pedazos resistentes, en estado húmedo es pegajosa y se hace necesario el uso de agua para despegarla de las manos.
Tierra orgánica	Textura esponjosa. Se caracteriza por un olor a moho que se acentúa al humedecerse o calentarse.

Nota. Adaptado de Neves et al. (2009)

Tabla 6

Tipo de suelo indicado por los tests expeditos

Test del cordón	Test de la cinta	Test de exudación	Test de la resistencia seca	Tipo de tierra
Cordón frágil o resistencia nula	Cinta corta o no se consigue hacer la cinta	Reacción rápida a lenta, pero jamás muy lenta	Poca a nula, generalmente nula	Arenosa; areno-limosa; areno-arcillosa; limo-arcillosa
Cordón frágil o blando	Cinta corta	Reacción lenta a muy lenta	Poca a mediana	Limosa
Cordón Blando	Cinta corta a larga	Reacción muy lenta o sin reacción	Mediana a grande	Arcillosa con grava, arcillo-arenosa y arcillo-limosa
Cordón duro	Cinta larga	Sin reacción	Grande	Arcillosa

Nota. Adaptado de CEPED (1984)

Tabla 7

Identificación de la tierra por medio de los tests de campo

Nombre de la muestra		Tesis
Localización		Piedecuesta, Santander
Fecha de colecta		4 de febrero de 2018
Fecha de ejecución		5 al 9 de febrero de 2018
Observaciones		Se pulverizaron los terrones con martillo
Teste		Interpretación
Táctil-visual	Tamaño de partículas	20% arena, 80% limo y arcilla (% en peso)
	Color	Rojo oscuro
	Brillo	Superficies brillantes
	Tacto/textura	Pegajosa, textura fina
Identificación de la tierra por inspección táctil-visual		Tierra arcillosa
Caída de bola		Alta cohesión
Vidrio - % de arena, limo y arcilla		N/A
Cordón		Blando
Cinta		Corta a larga (15 cm)
Exudación		Reacción muy lenta (35 a 40 golpes)
Resistencia seca		Resistencia grande (se rompe solo por flexión)
Identificación según tabla 3		Arcillosa con grava, arcillo-arenosa y arcillo-limosa La tierra posee alta plasticidad y resistencia con presencia de arena gruesa. se califica como tierra arcillo-arenosa y debe estabilizarse para controlar la retracción.
Conclusión		

Nota. Adaptado de Neves et al. (2009)

6.7 Muestras de adobes

Antes de construir los adobes se deben realizar algunos de prueba para medir su densidad y observar su comportamiento frente a la retracción. A partir de las pruebas hechas a la tierra se determina la necesidad de estabilizar la mezcla, ya que la tierra demostró tener un alto contenido de arcilla. Además, se desea alivianar la construcción con elementos de baja densidad, por eso se decide utilizar una mezcla de barro y paja para construir los adobes.

6.7.1 Preparación de la mezcla. La tierra debe estar libre de piedras, y los terrones ser disueltos en agua o pulverizados. La paja debe estar completamente seca y cortada a la menor dimension del adobe, que en este caso son 7 cm (*Figura 40*). Primero se prepara la mezcla de la tierra con el agua, agitando y removiendo el material hasta obtener una consistencia casi liquida. Se deja reposar por dos días junto con la paja, teniendo en cuenta que la mezcla de barro cubra totalmente los trozos de paja como se muestra en la *Figura 41*. La cantidad de paja a agregar depende de la densidad que se quiera obtener y también de la calidad de la mezcla, entre más arcilla contenga, mayor será la cantidad de paja que puede agregarse.



Figura 40. Elementos para la Conformación de Adobes

Para este proyecto se desea obtener la menor densidad posible, pero garantizando la resistencia suficiente y la conservación de la paja. Por eso se evita densidades menores a 700 kg/m^3 . Se realizan 2 tipos de mezclas de proporciones diferentes, medidas en volumen. La primera consta de 5 partes de paja por una de barro en estado cremoso (*Figura 41 derecha*), y la otra de 7 partes de paja por una de barro.



Figura 41. Consistencia de la mezcla de barro y paja. Adaptado de Okambuva casas de paja (2015)

En la *Figura 42* se pueden ver las dos muestras de adobes, a la izquierda se presenta la correspondiente a la primera mezcla, con la cual se obtuvo una densidad de 945 kg/m^3 . Con la otra mezcla se obtuvo una densidad de 550 kg/m^3 , lo cual es inferior a la recomendada.



Figura 42. Dos muestras de Adobes

7. Techo Verde

Los techos verdes consisten en cubiertas enverdeadas por pastos, jardín o huertos. Son conocidos en muchas partes del mundo y ofrecen muchas ventajas en comparación con los techos tradicionales. En este proyecto se diseña un techo verde productivo utilizando botellas de plástico recicladas, puestas sobre un techo de chapa metálica. Este sistema de techo verde tiene además la ventaja de producir frutos comestibles y verduras que aportan de alguna manera a la economía del beneficiario.

7.1 Antecedentes

7.1.1 Techo verde productivo, Bogotá. Forero Cortez (2011) llevo cabo un proyecto de investigación en la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. El proyecto se hace sobre viviendas de interés prioritario ubicadas en Altos de Cazucá en Soacha, Cundinamarca, y consiste en el ensayo de tres tipos de techo verde utilizando recipientes de botellas plásticas en las cuales se plantan hortalizas de diferente especie sobre cada tipo de cubierta (*Figura 43*). Se diseñan tres tratamientos, en el primero (t1) se planta lechuga crespita y rábano, aprovechando que las sustancias alelopáticas del rábano combaten las plagas que atacan la lechuga. En el segundo (t2), se planta cebolla larga, cilantro y lechuga lisa, y en el tercero (t3) se planta espinaca y perejil. para el riego de las plantas se dispone de depósito de 15 litros ubicado en la cumbrera del techo que se abastece de agua lluvia y la distribuye por el sistema de tuberías de PVC de ½”.

Se cuantifico el carbono capturado por los diferentes techos verdes y se halló que el tratamiento numero dos (t2) es el más eficiente, con una captura anual de 38,6 kg de CO₂, en segundo lugar, el tratamiento uno (t1) con 32,2 kg, y por último el tratamiento tres (t3) con 15,5 kg. Asimismo, se halló que la temperatura ambiente al interior de la vivienda disminuyo en 3°C

aproximadamente respecto a una vivienda testigo sin cubierta verde, con un mejor desempeño del tratamiento uno (t1) producto de la mayor superficie de hoja y mayor acumulación de agua en las hojas de las especies plantadas (*Figura 44*).



Figura 43. Techo Verde Productivo con Botellas. Adaptado de Forero Cortez (2011)

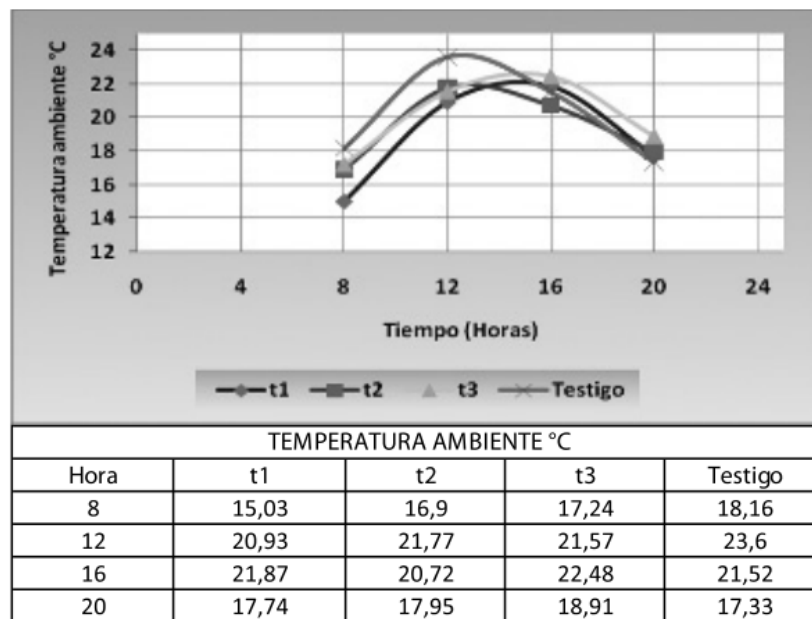


Figura 44. Registros Promedio de la Temperatura Ambiente Interior Bajo Tres Tipos de Techo Verde y uno Testigo sin Techo Verde. Adaptado de Forero Cortez (2011)

7.1.2 Beneficio térmico de techo verde, UIS. Reyes y Sánchez (2013) llevaron a cabo un proyecto de investigación que demuestra el beneficio térmico que se consigue mediante el uso de techo verde extensivo, respecto a otros convencionales. A través de mediciones experimentales utilizando el equipo apropiado, se observó el comportamiento de la temperatura interior de un recinto debajo de techo verde, placa de concreto y teja termoacústica (*Figura 45*). La temperatura interior bajo techo verde el 9 de abril de 2013 a la 1 p.m., es 5°C menor que la de la teja termoacústica y 3°C menor que la obtenida debajo de la placa de concreto.

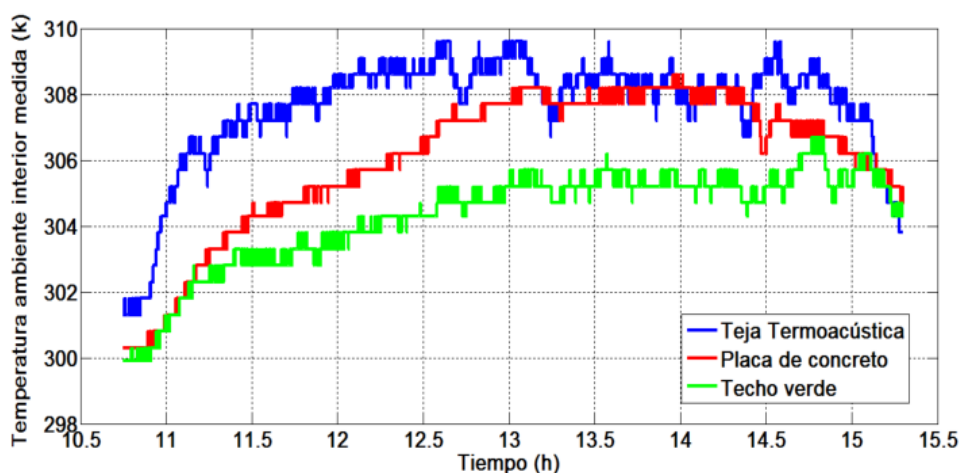


Figura 45. Temperatura del Interior de tres Habitáculos con Diferente Tipo de Cubierta. Adaptado de Reyes y Sánchez (2013)

7.2 Ventajas de los techos verdes

Los techos verdes brindan varios beneficios que han sido demostrados: producen un efecto de aislamiento térmico y acústico importante sobre una edificación, reduce el efecto de isla de calor de las grandes urbes, retiene el agua lluvia, mantiene ecosistemas, produce aromas y vista agradables y un efecto psicológico importante sobre las personas. A largo plazo resulta más económico que un techo convencional porque requiere de menos reparaciones.

7.2.1. Efecto isla de calor. El efecto de isla de calor y los remolinos de polvo se deben al aumento de la temperatura del aire, producto de un déficit en la proporción de vegetación presente en zonas urbanas. Dicho déficit es consecuencia del sellado de las superficies naturales para ser utilizadas en la construcción, rompiendo el recorrido natural del agua, evitando su infiltración, y en cambio fluye sobre la superficie terrestre arrastrando la capa vegetal y provocando avalanchas e inundaciones, las raíces de las plantas se ven privadas del recurso hídrico y los arroyos disminuyen su caudal (Placitelli, 2010).

7.2.2 Equilibrio de CO₂. El incremento en las emisiones de anhídrido carbónico (CO₂) se debe además de la quema de combustibles fósiles, por la disminución de la capacidad fotosintética del carbono inorgánico (CO₂) que se transforma en carbono hidratado (CH₄O) (Figueruelo y Mijangos, 2006). Cuando el CO₂ producido excede la capacidad de consumo de las plantas, este se queda atrapado en la atmósfera permaneciendo por varios siglos o millones de años y como consecuencia se produce un aumento en la temperatura global. (Environmental Protection Agency, 2011). El proceso de fotosíntesis de la vegetación requiere de 6 moléculas de CO₂ y 6 moléculas de H₂O para producir una molécula de C₆H₁₂O₆ (Glucosa) y 6 moléculas de O₂, equilibrando de cierto modo el CO₂ producido con el O₂ consumido por las plantas.

7.2.3 Regulación de la temperatura. Los techos verdes ayudan a conservar un clima interior confortable, actuando positivamente tanto en climas calurosos como en climas muy fríos. En climas cálidos se produce un efecto de enfriamiento debido a la capacidad de absorción de energía que poseen las plantas por medio de la evaporación del agua almacenada en sus tallos, el proceso de fotosíntesis y la reflexión de la radiación solar. Para evaporar un litro de agua se consumen cerca de 2,2 MJ (530 kcal) de energía, y en el proceso de la fotosíntesis son consumidos 2,83kJ de energía (Minke, 2014). El espesor del sustrato, la superficie de hoja, así como la especie

plantada, son factores determinantes en el aislamiento térmico, ya que el sustrato como las plantas poseen la capacidad de almacenar agua que sirve como medio para la absorción de calor.

Por otra parte, en climas fríos se puede mantener la temperatura interior a través de la condensación de la humedad en las plantas, ya que este proceso conduce a una recuperación de calor. Además, se evita el enfriamiento por convección, porque la vegetación impide que el viento toque la superficie de la cubierta.

7.2.4 Capacidad de retención del agua. Los techos verdes contribuyen también a la retención y almacenamiento de agua, lo cual es una ventaja para aliviar el caudal en las redes de los sistemas de alcantarillado, ayudando a prevenir inundaciones. Dependiendo del espesor y porosidad de sustrato, así como de la inclinación del techo, un techo verde es capaz de retener hasta el 70% del agua lluvia, parte de ella es evacuada luego de unas horas y otra parte es evaporada.

7.2.5 Mejora la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Un techo verde ayuda a mejorar la eficiencia de un panel solar, brindando un ambiente fresco que evite el recalentamiento de las células fotovoltaicas. El sistema que integra paneles solares con techo verde se denomina GRIPV.

7.3 Clasificación de techos verdes

Según la forma de enjardinar, los techos verdes se pueden clasificar como extensivos e intensivos.

7.3.1 techo verde extensivo. Consiste en una vegetación densa compuesta de variadas especies silvestres que resisten las adversidades del tiempo con los mínimos cuidados, evitando la necesidad de ser fertilizado o regado, y con un espesor de sustrato entre 3 a 15 cm que requiere de los mínimos nutrientes. El peso de este tipo de cubierta puede llegar hasta los 160 kg/m^2 (Minke, 2014).

7.3.1.1 superficie de hoja. Se define como el área que abarca las hojas de las plantas dentro de un área determinada. La superficie de hoja tiene una gran influencia sobre las características positivas del techo verde como la limpieza del aire, la formación de rocío y el efecto de aislamiento térmico. Un pasto cortado tiene una superficie de hoja entre 6 y 9 m^2 por m^2 , en cambio uno bien formado puede contener entre 50 y 100 m^2 por m^2 de terreno (Minke, 2005). Los pastos silvestres tienen un mejor desempeño en este sentido, ya que su superficie de hoja es mayor.

7.3.1.2 Inclinación. La inclinación de la cubierta es importante para permitir la evacuación del agua. Sin embargo, una fuerte inclinación pone en riesgo la estabilidad del sustrato pudiendo deslizarse, y su capacidad de almacenaje de agua es menor. Es recomendable una pendiente entre 3° y 20°, que equivale al 5% y 36% respectivamente. Por otra parte, los techos inclinados hacia el sol están más expuestos a la radiación y pueden secarse con mayor facilidad.

7.3.1.3 Capas. En la *Figura 46* se puede observar las capas que constituyen un techo verde extensivo simple con inclinaciones entre los 3 y 20°. Es importante sellar la superficie ante la acción del agua y de las raíces con una geomembrana de PVC o un polietileno de alta densidad, y protegerla de posibles perforaciones. La capa del sustrato debe contener en su primera capa, materiales porosos para drenar y almacenar el agua.

7.3.2 Techo verde intensivo. Está constituido por plantas ornamentales y de jardín que requieren mayor cuidado y mantenimiento, con el fin de embellecer una terraza. Se diseña con el objetivo de ser transitada y por ello la pendiente es mínima. Se debe disponer de una capa especial para drenaje y separarla del sustrato por medio de otra capa que sirva de filtro. El espesor del sustrato es superior a los 30 cm, por lo cual se eleva considerablemente el peso de la cubierta, requiriendo mejores condiciones estructurales. El efecto ecológico es menor que en los techos

verdes extensivos, pues la superficie de hoja es bastante menor. En la *Figura 47* se observan las capas que constituyen un techo verde extensivo.

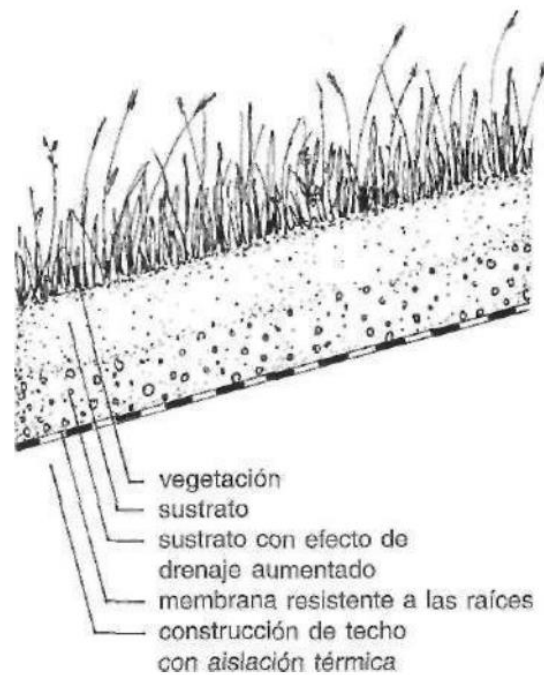


Figura 46. Techo Verde Extensivo. Adaptado de Minke (2005)

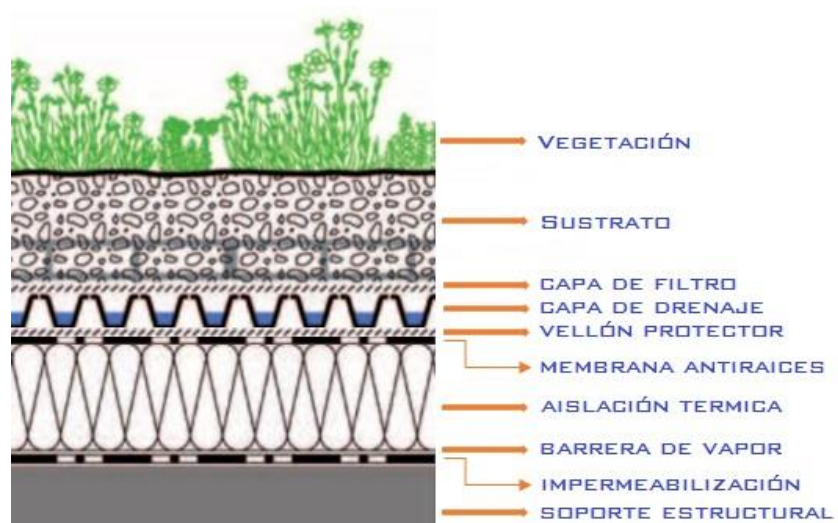


Figura 47. Techo Verde Intensivo. Adaptado de Zinco

7.4 Elementos de cubierta

La cubierta se compone de unos elementos que se ordenan con el fin de cubrir un espacio, separándolo de las condiciones exteriores del ambiente. Básicamente son: “material de cubierta, cabreada (también llamada cercha, armadura o reticulado) y el entramado (conformado por correas, cabios, listones o clavadores)” (Lefevre, 2016).

7.4.1 Cercha. La cercha más elemental está formada por un tirante y dos pares, y entre mayor sea la luz por cubrir más elementos deben añadirse a la cercha (*Figura 48*). En este caso la cercha se conforma en hormigón armado.

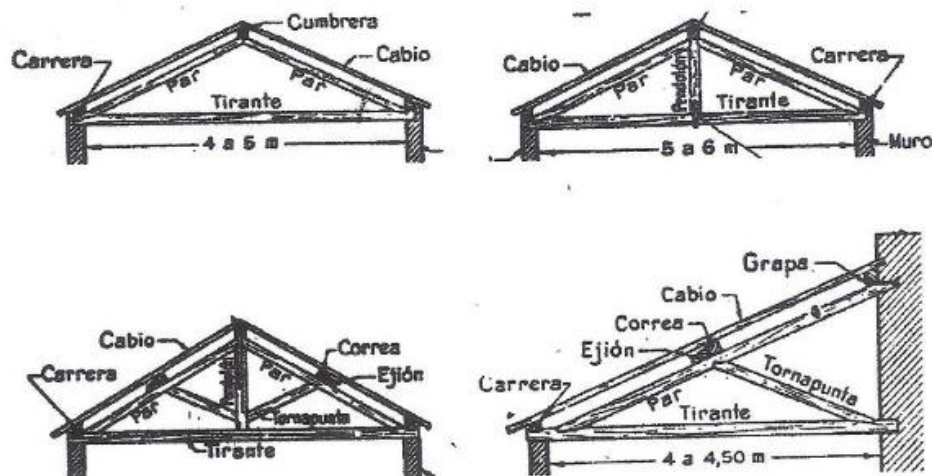


Figura 48. Cercha de Madera Según la Luz a Cubrir. Adaptado de Lefevre, R. (2016). Estructuración de cubiertas de madera y accesorios. Argentina.

7.4.2 Despiece. La cubierta tiene una pendiente mínima del 15%. Las correas se arriostran a la viga de hormigón armado y sobre estas se apoyan los cabios. En la *Figura 49* se aprecia el despiece de los componentes de la cubierta. Sobre los cabios va un machihembrado de madera, encima una barrera de vapor y luego unos listones llamados escurrideros (abajo) y clavadores (arriba) de sección 2x1 pulgadas. Entre ellos se disponen dos capas de aislamiento térmico de poliestireno expandido (EPS), y encima la lámina galvanizada.

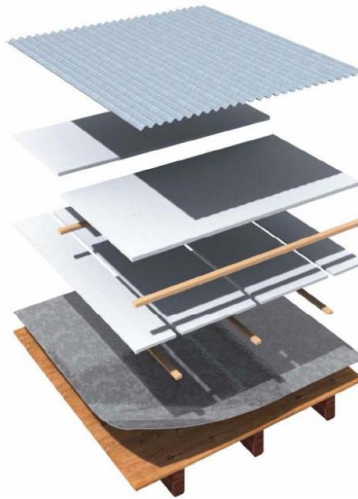


Figura 49. Conformación de Cubierta. Adaptado de Adicem. (s.f.). obtenido de http://adicem.com.ar/eps_aislamiento_termico_de_cubiertas.pdf

7.4.3 Techo Verde. El techo verde se instala sobre la cubierta de lámina galvanizada, el cual consta de botellas plásticas de 3 litros, las cuales se llenan con sustrato y se plantan las especies productivas: cebolla larga, cilantro y lechuga lisa. Se eligen estas especies por ser las más demandadas en la comunidad, y también porque son más eficientes en la captura de CO_2 . Además, brindan una muy buena aislación de la temperatura exterior. Las botellas sostienen sobre la cubierta por medio de los tubos de PVC destinados para el riego, como se observa en la *Figura 50*.



Figura 50. Techo Verde con Botellas. Adaptado de Forero Cortez (2011)

7.5 Diseño de Correas y Cabios

La NSR-10, G.9.5.1 establece para el diseño de elementos de madera el método de esfuerzos admisibles. Las vigas son elementos sometidos a flexión, su diseño está regido por las deflexiones admisibles, y se chequea por flexión, cortante y aplastamiento. La deflexión máxima permitida es $l/300$ (NSR-10), donde l corresponde a la luz libre entre los soportes del elemento sometido a flexión.

7.5.1 Propiedades de la madera. La especie que se elige para las correas y cabios es el Sapan (*Clathrotropis Brachypetala*), clasificado según la NSR-10 como madera tipo “ES2” con un contenido de humedad C.H = 12%. En la Tabla 8 se observan las propiedades mecánicas del Sapan y en la Tabla 9 los esfuerzos admisibles para la madera del grupo ES2, donde DB es la densidad básica, en g/cm^3 . $E_{0,5}$ el Módulo de elasticidad promedio longitudinal, en MPa. F_b el esfuerzo admisible a flexión, en MPa. F_c el esfuerzo admisible en compresión paralela, en MPa. F_p el esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra, en MPa. F_v el esfuerzo admisible a cortante paralelo a la fibra, en MPa. Y F_t el esfuerzo admisible a tensión paralela a la fibra, en MPa.

Tabla 8
Propiedades Mecánicas Especie Sapan

DB	$E_{0,5}$	F_b	F_c	F_p	F_v	F_t
0,820	24 600	33,3	26,8	4,5	2,2	25,0

Nota. Adaptado de NSR-10, Tabla G-B.2

Tabla 9
Esfuerzos Admisibles Madera Grupo ES2

F_b	F_c	F_p	F_v	F_t
28,5	22,0	4,3	2,0	20,0

Nota. Adaptado de NSR-10, Tabla G.2.2-1

Por otra parte, el manual de diseño para maderas del grupo andino, libro referente para el diseño de estructuras con madera, hace una clasificación de la misma en tres grupos, como se muestra en la Tabla 10. La especie sapan se clasifica dentro del grupo A.

Tabla 10

Clasificación de la Madera Según Esfuerzos Admisibles en kg/cm^2

GRUPO	F_b	F_c	F_p	F_v	F_t
A	210	145	40	15	145
B	150	110	28	12	105
C	100	80	15	8	75

Nota. Adaptado de Proyectos andinos de desarrollo tecnológico en el área de los recursos forestales tropicales, PADT-REFORT (1984)

7.5.2 Cargas. Cada botella llena con el sustrato saturado de agua y la planta pesa entre 1,6 y 2,7 kg, y en $12m^2$ caben 96 botellas (Forero Cortez, 2011). Entonces, por cada metro cuadrado hay 8 botellas, que pesan aproximadamente 2,7 kg cada una. Por lo tanto, la carga por unidad de área debida al techo verde es de $21,6 kgf/m^2$. En la Tabla 11 se listan las cargas muertas que aporta la cubierta las cuales deben soportar los cabios. La carga viva para cubiertas con 15° o menos de inclinación, es de $50 kgf/m^2$ (NSR-10, Tabla B.4.2.1-2).

Tabla 11

Cargas Muertas Sobre Estructura de Cubierta

Componente	Carga (kgf/m^2)
Panel fotovoltaico	15
Plantas en botellas plásticas	21,6
Lámina galvanizada ^a	9,49
Aislante térmico ^b	3,5
Machihembrado ^c	9
TOTAL	58,59

Nota: ^a calibre 18 (Jacom, s.f.), ^b 2 capas de 35mmc/u (NSR-10, Tabla B.3.4.1-4), ^c espesor 1,5 cm (NSR-10, Tabla G-G-3)

7.5.3 Escuadría. Para hallar las dimensiones de los elementos se debe definir la separación entre ellos, la cual depende de las cargas que estos deben soportar y el tipo de madera. Adicem propone una separación entre cabios de 70 cm para una escuadría de 2x5 pulgadas. En la *Figura 48* inferior izquierda se observa que para luces mayores a 6 m se incluyen las correas con una separación aproximada de 1,5 m. Así, para una distribución uniforme de los elementos y verificando su escuadría en función de la carga por medio de una hoja de cálculo excel, se llega a la conclusión de calcular las correas para ponerlas cada 2,5 m con el fin de alinearlas con las paredes y los cabios cada 70 cm.

Las cargas por unidad de longitud sobre cada elemento se determinan por medio del concepto de las áreas tributarias, con el cual se asigna el valor de la carga en función del área influencia. Esto se logra al multiplicar la carga por unidad de área por la separación entre los elementos, que es el mismo ancho de influencia. En la Tabla 12 se observan valores necesarios para obtener las dimensiones para los cabios y para las correas. Se utiliza el criterio de escuadría óptima según Suarez Rubi, (s.f), donde la relación, altura (h) entre la base (b) de la viga de madera es de 1,73.

Tabla 12
Diseño de Cabios y Correas

Elemento	Ancho influencia [m]	Carga Muerta [kg/m ²]	Carga Muerta [kg/m]	Carga Viva [kg/m ²]	Carga viva [kg/m]	Peso propio [kg/m ²]	Escuadría (bxh) [cm]
Cabio	0,7	58,6	41,0	50	35	11	7 x 10
Correa	2,5	69,6	174	50	125	6,6	10 x 15

Nota. El cálculo se hizo mediante una hoja de Excel adaptada de Civilgeek (2014)

8. Sistema de Recolección de Aguas Lluvias

El agua es el elemento más importante para la supervivencia del ser humano, cubre el 71% de la corteza terrestre y circula constantemente en un ciclo de evaporación, precipitación y deslizamiento hacia el mar (*Figura 51*). Sin embargo, el 97% corresponde a agua salada de mar, y solo el 2,7% es agua dulce, que son aproximadamente 38 millones de Km^3 . De estos 38, 29 se encuentran en estado sólido en los casquetes polares, 5 millones corresponden a ríos, lagos y humedales, y 4 millones a aguas subterráneas.

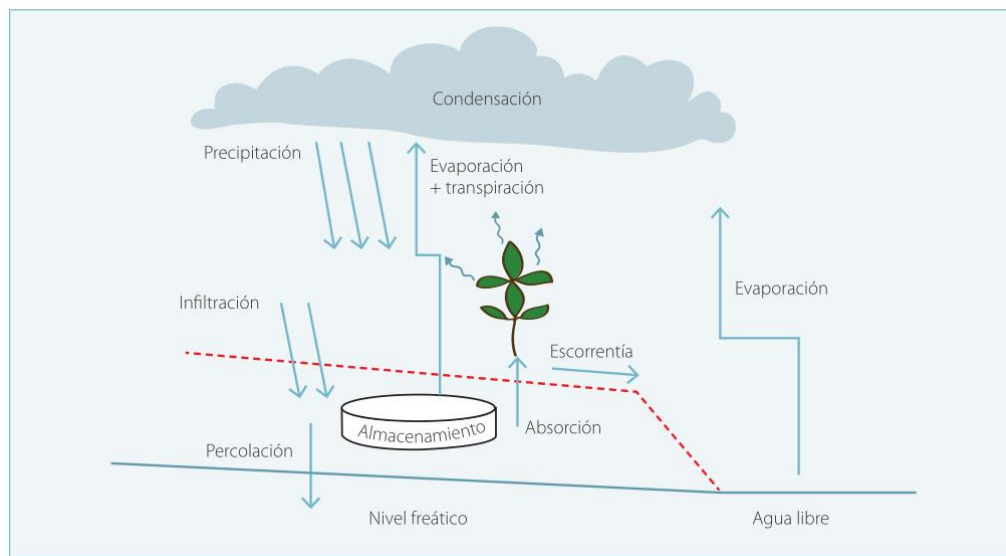


Figura 51. Ciclo Hidrológico Simplificado con sus Componentes y Fases. Adaptado de Food and Agriculture Organization, (FAO, 2013)

Colombia es un país muy rico en agua, pero por lo mismo no hay consciencia sobre el uso racional de esta. El índice de calidad del agua para el 2013 presento categoría mala en varias corrientes de las zonas hidrográficas del alto, medio y bajo Magdalena, Cauca y Meta, debido al vertimiento de agentes contaminantes sobre las corrientes superficiales de agua, provenientes

principalmente del sector doméstico, sacrificio de ganado, beneficio de café, industria y minería (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2015).

Para medir la disponibilidad del agua sobre las distintas regiones del mundo se ha desarrollado un factor denominado índice de escasez, el cual relaciona la oferta y la demanda del recurso hídrico. El IDEAM ajustó dicho índice y lo denominó Índice de presión. En la *Figura 52* se muestra el mapa de las regiones de Colombia con relación a dicho índice.

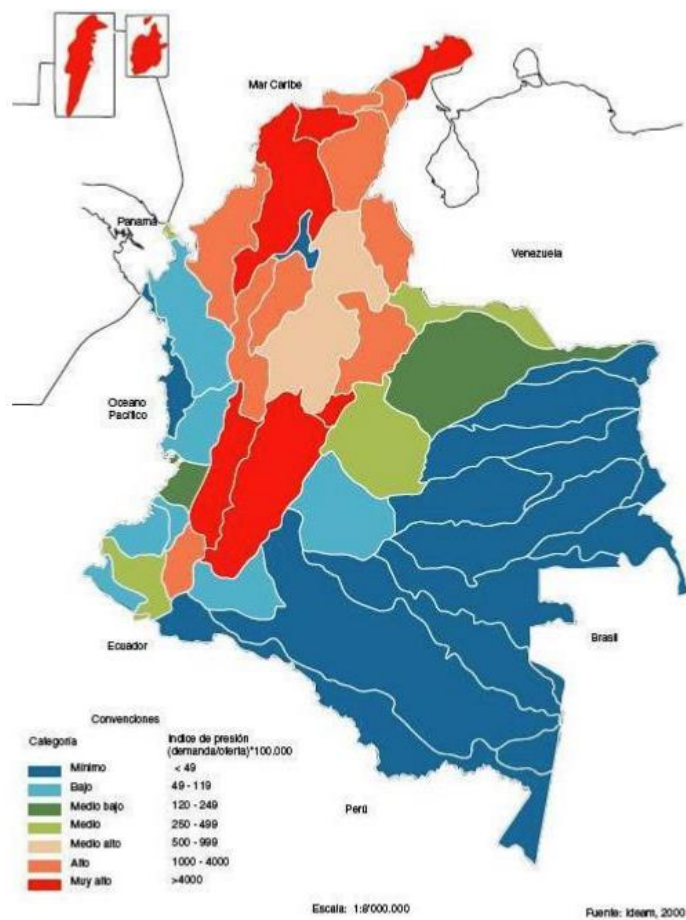


Figura 52. Índice de Presión en Colombia. Adaptado de IDEAM (2000)

Si se continua con el actual ritmo de explotación y contaminación de las cuencas, para el año 2025 el 66% de la población colombiana podría estar en riesgo de desabastecimiento de agua

potable. Por ello es necesario emprender nuevas técnicas de abastecimiento, y sacar provecho del agua lluvia que es un recurso al que todos tenemos acceso, dependiendo de la pluviometría de la zona, así se aliviaría la presión sobre las cuencas, y en épocas de invierno la sobrecarga en los sistemas de alcantarillado, además del ahorro económico en la factura del servicio público.

8.1 Condiciones sanitarias del agua lluvia

El agua lluvia es una fuente limpia, ya que es destilada por el sol y las nubes. Sin embargo, su calidad puede ser menor cerca de fábricas o de áreas de muy alto tráfico que emitan productos tóxicos a la atmosfera (Mejía Piña & Salamea Cobos, 2011). Asimismo, el agua se contamina cuando hace contacto con la cubierta, ya que esta se encuentra expuesta al polvo y heces de animales. Tales motivos hacen que el agua lluvia sea destinada generalmente a operaciones de limpieza y riego, pues de requerirse para consumo humano debe llevarse a cabo un proceso de filtrado y descontaminación que garantice la potabilidad del agua desde el punto de vista bacteriológico, ya que existe un grupo de enfermedades hídricas que son causadas por microorganismos fecales.

8.1.1 Bacterias. El agua para consumo humano debe estar libre de bacterias del grupo coliforme y *Streptococcus faecalis*, cuya presencia es indicativo de contaminación fecal y por ende de la posible presencia de cepas microbianas patógenas responsables de enfermedades como las fiebres tifoideas, fiebres paratifoideas, disentería, cólera, etc. Para prevenir dichas enfermedades es recomendable que antes de utilizar el agua lluvia para consumo se realice un análisis microbiológico que garantice la calidad del recurso hídrico.

8.1.2 pH. Es la medida de acidez o alcalinidad de una solución. Su sigla significa “Potencial de Hidrogeno” e indica la concentración de iones de Hidronio (H_3O^+) presentes en determinadas sustancias. Típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo acidas las

disoluciones con pH menores a 7 y alcalinas las mayores a 7 (*Figura 53*). El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (donde el disolvente es el agua). El pH óptimo del agua debe estar entre 6,5 y 8,5. Es decir entre neutra y ligeramente alcalina, siendo 9 el valor máximo aceptado. Las aguas con pH menor a 6,5 son corrosivas debido al anhídrido carbónico, ácidos o sales acidas que tienen en la disolución.

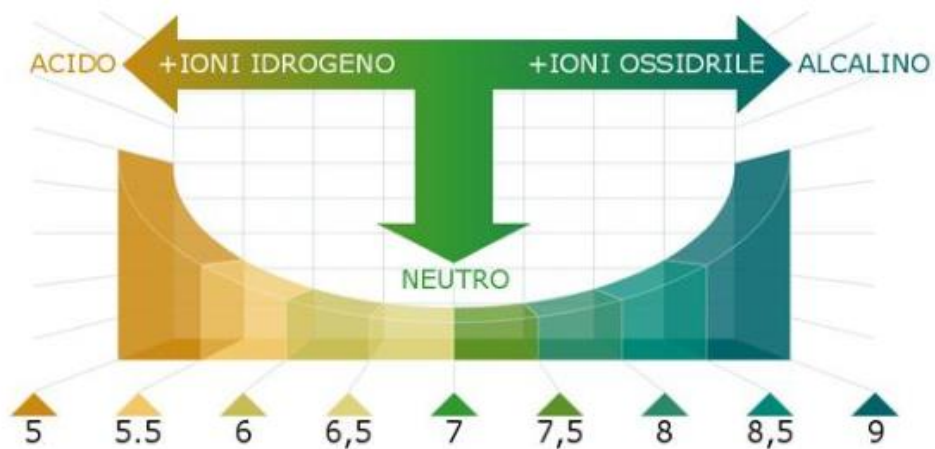


Figura 53. pH del Agua. Adaptado de Mejía y Salamea (2011)

8.2 Componentes del sistema

Un sistema de captación pluvial en techos (SCAPT) se compone básicamente de cuatro elementos (*Figura 54*): área de captación, sistema de recolección y conducción, interceptor y filtro, y almacenamiento (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la Salud, 2004). Aunque para este proyecto se adiciona un elemento más que es el sistema de distribución y de bombeo.

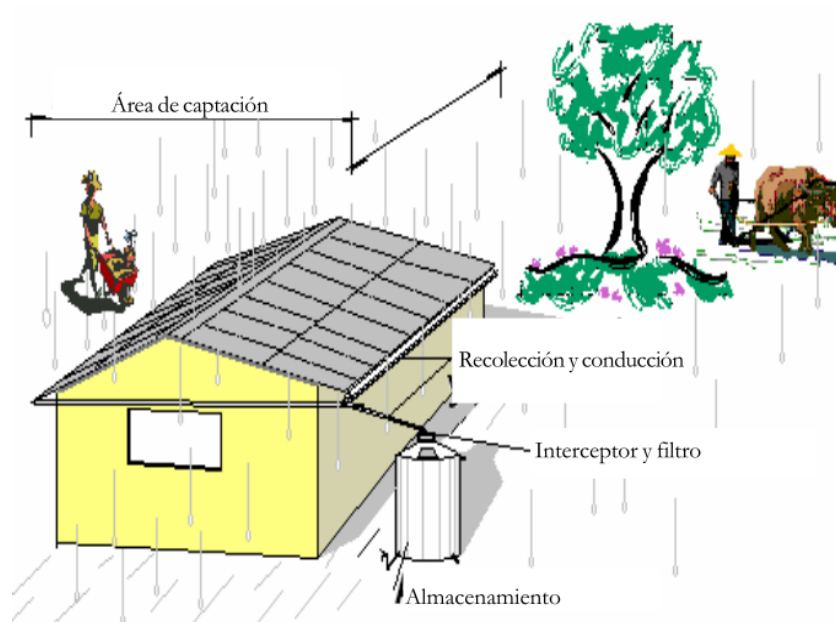


Figura 54. Componentes Básicos de Sistema de Captación Pluvial en Techos. Adaptado de Caballero Aquino (2006)

8.2.1 Captación. El área de captación es el área del techo proyectado horizontalmente, el cual debe tener una pendiente que facilite el escurrimiento para la recolección. Para cubiertas de zinc y tejas de fibrocemento la pendiente esta entre 20 y 27%, para teja de barro entre 30% y 60% y para techos en paja o palma entre 50% y 80%. (Mejia Piña & Salamea Cobos, 2011). En ningún caso la pendiente no debe ser menor del 5% y la superficie debe facilitar el escurrimiento e interactuar de manera favorable con el agua lluvia. Los techos de cemento o de teja, que contienen asfalto, amianto o que estén pintados no son recomendables para captar agua para consumo humano, ya que pueden lixiviar materiales tóxicos en el agua lluvia (Abdulla & Al-Shareef, 2006). La lámina galvanizada se desempeña adecuadamente, pues es de fácil escurrimiento y posee un efecto esterilizante debido al calentamiento del metal por el sol (Caballero Aquino, 2006).

8.2.1.1 Coeficiente de esorrentía (C_e). Su valor se encuentra entre 0 y 1, dependiendo del tipo de cubierta. Tiene en cuenta las pérdidas producto de salpicaduras, vientos y evaporación del

agua. Este proyecto se realiza con techo verde, el cual posee un coeficiente bastante menor que otro tipo de cubiertas, pues el agua infiltrada en el sustrato disminuye el caudal de agua a colectar. Sin embargo, el techo verde en botellas tiene ventaja en este sentido respecto a un techo verde extensivo normal, el cual cubre totalmente la superficie de la cubierta con sustrato, y entonces retiene mayor cantidad de agua. Por lo tanto, para este techo se puede tomar el valor de $C_e = 0,5$. En la Tabla 13 se relacionan algunos coeficientes de escorrentía para diferentes materiales y tipos de cubierta.

Tabla 13
Coefficiente de escorrentía en función del tipo de tejado

Material	Coefficiente de escorrentía C_e
Calamina metálica	0,9
Tejas de arcilla	0,8 – 0,9
Madera	0,8 – 0,9
Paja	0,6 – 0,7
Tejado verde	0,3 – 0,5

Nota. Adaptado de CEPIS, 2004 y Aqua España

8.2.2 Recolección y conducción. Conformado por canaletas adosadas a los aleros del techo con el objetivo de recolectar el agua y conducirla hasta el depósito de almacenamiento. El ancho de la canaleta depende del área de captación y la intensidad de las precipitaciones. Para un techo de 60 m^2 se ha comprobado que una canaleta cuadrada con sección de 18,9 cm es suficiente, y bajantes de conducción de PVC sanitario de 2 pulgadas (Caballero Aquino, 2006). SODIMAC (2012) por su parte, recomienda para una vivienda de 65 m^2 de area de captacion, una canaleta de 25 cm de ancho con una pendiente minima del 1%, ganchos sostenedores minimo cada 50 cm para evitar que se desprenda la canaleta, y ademas cada 10 m de canaleta debe situarse un bajante.

El material de las canaletas debe ser liviano, resistente al agua y fácil de unir entre sí para evitar fugas, puede ser de PVC, metal o bambú. En la *Figura 55* se observan algunos tipos de

canaleta. Se recomienda aquella que posee una malla con el fin de evitar materiales groseros que puedan obstruir el paso y contaminar el agua de lluvia. La canaleta de bambú por otra parte debe sellarse y protegerse adecuadamente para evitar su prematura desintegración.



Figura 55. Canaletas para Conducción de Agua Lluvia. Adaptado de Salazar Aguilar (2014), Socodima y Metalpanel.

8.2.3 Interceptor y filtro. El interceptor es un recipiente encargado de recibir las primeras aguas lluvias que son las que lavan el techo y por lo tanto contienen gran cantidad de contaminantes. El volumen de dicho deposito según CEPIS (2006) es de aproximadamente un litro por cada metro cuadrado de superficie de captación. En la *Figura 56* se observan dos formas de instalar el interceptor: a la izquierda se encuentra un interceptor común, el cual utiliza una bola de jebe que por el principio de flotación sella la entrada al interceptor para dar paso al agua lluvia hacia el deposito principal de almacenamiento. A la derecha, un depósito compartido con un filtro de grava, arena y carbón activado, el cual mejora la condición fisicoquímica del agua, pues el carbón da un buen color, olor y sabor al agua.

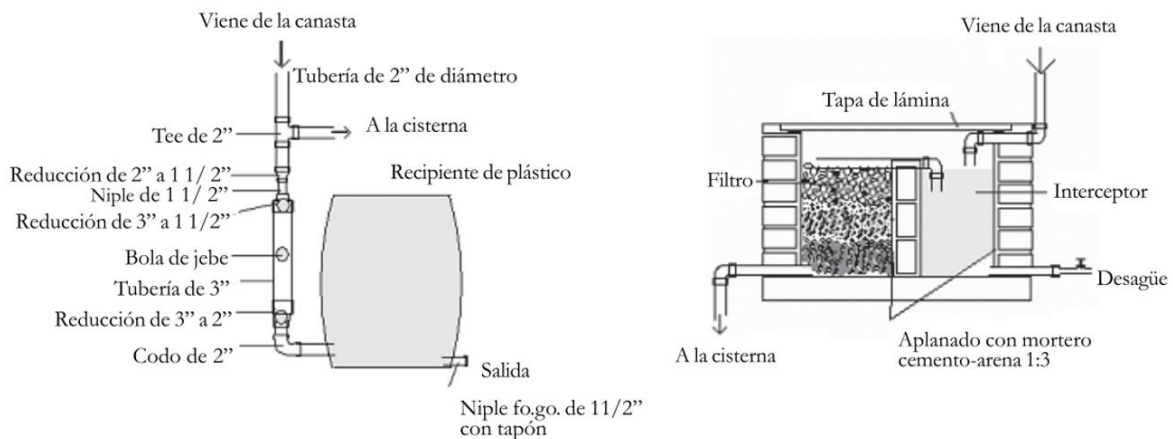


Figura 56. Interceptor de Primeras Aguas Lluvias. Adaptado de Caballero Aquino (2006)

Para reciclar el agua de lluvia sobre techo verde debe disponerse de un filtro que continuamente este deteniendo material de sustrato, pues un interceptor actúa únicamente al inicio de la precipitación hasta que se llene. Por tal motivo, un filtro resulta ser más conveniente. La solución de la *Figura 56* derecha requiere de un gran espacio, lo cual no lo hace viable para este proyecto. En la *Figura 57* se aprecia un filtro de bajante separador de hojas, el cual resulta conveniente para implementarlo en el sistema.



Figura 57. Filtro de Bajante. Adaptado de easy (2011-2018). *Filtro bajante separador de hojas gris.* Obtenido de easy.com: <http://www.easy.com.co/p/filtro-bajante-separador-de-hojas-gris/>

8.2.4 Almacenamiento. El centro del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias es el depósito de almacenamiento. Este debe dimensionarse en función de la pluviometría de la zona, la demanda y el área de captación. El depósito de almacenamiento debe ser de un material adecuado, que mantenga el agua en las mejores condiciones posibles, protegida de los roedores y a una temperatura de 12°C (SA-I-TA, 2017). Asimismo, el material más aconsejable es el polietileno, por ser duradero, económico y de mayor higiene. En la *Figura 58* se puede observar un depósito subterráneo con sus componentes para una buena operación. El deflector de agua evita las turbulencias y la aspiración flotante recoge el agua más limpia para ser succionada por la motobomba.



Figura 58. Accesorios y Componentes para un buen Sistema. Adaptado de Caballero Aquino, (2006)

8.2.5 Distribución. La distribución del agua lluvia hacia los servicios se lleva a cabo utilizando primero una motobomba que el eleva el fluido hasta un tanque que se ubica en la parte más alta de la construcción. Allí se dispone un sistema de control como el que se muestra en la

Figura 59 con el fin de garantizar la continuidad del servicio por medio de un baipás con la red de agua potable proveniente del acueducto.

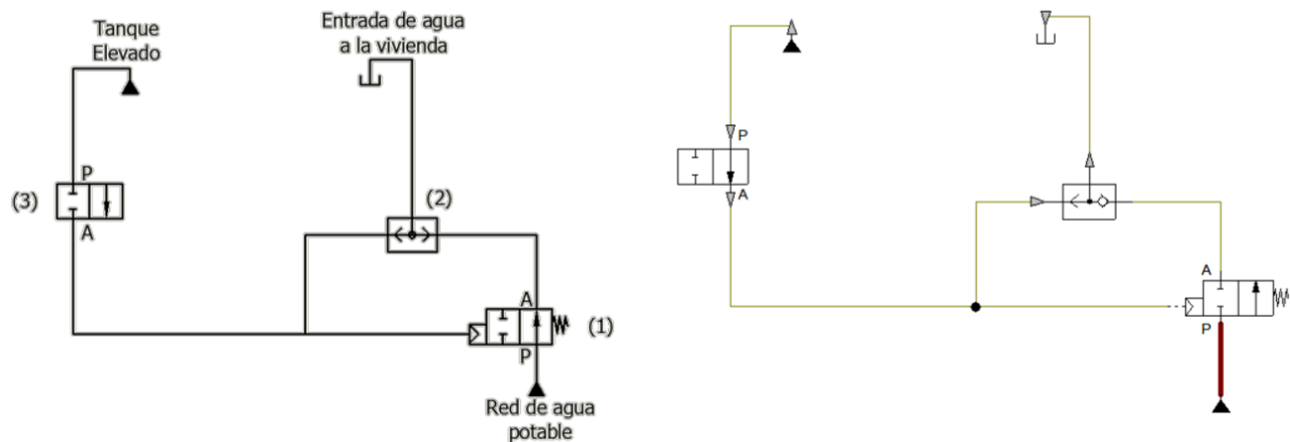


Figura 59. Circuito Hidráulico Sistema Baipás Agua Potable – Agua Reciclada. Adaptado de Mejía Piña & Salamea Cobos (2011)

Este sistema de control de Mejía Piña & Salamea Cobos (2011) está compuesto por una válvula direccional pilotada (1) de dos posiciones y retorno por muelle, el cual permite seleccionar la fuente de abastecimiento, ya sea el agua de acueducto cuando no haya agua lluvia en el tanque (Figura 59 izquierda), o el agua lluvia cuando si hay (Figura 59 derecha). La idea es que se use siempre el agua de lluvia y por eso se debe estudiar los elementos a conectar a este sistema. Cuando en el tanque elevado no hay agua lluvia, entonces la válvula (1) permite el paso del agua potable de la red de acueducto, y la válvula (2) que es una válvula selectora “Or” (Figura 60) cierra la línea del agua lluvia que viene del tanque levado y dirige el agua potable hacia los servicios conectados. De lo contrario, cuando si hay agua lluvia en el tanque, se crea una presión de pilotaje, cambiando la posición de la válvula (1) (Figura 59 derecha), y esta vez la válvula (2) cierra el paso de la red de agua potable para que la línea del agua lluvia quede abierta hacia los servicios conectados. La válvula (3) “representa la presencia de agua o no en el depósito elevado, cuando

está cerrada significa que no hay presencia de agua en el tanque y cuando está abierta si hay” (Mejia Piña & Salamea Cobos, 2011).

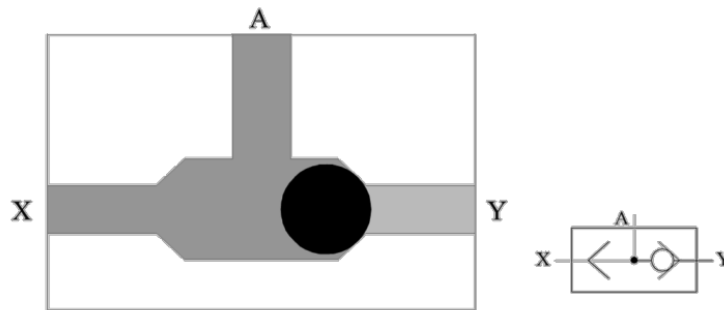


Figura 60. Válvula Hidráulica Selectora “Or”. Adaptado de Mejia Piña & Salamea Cobos (2011)

8.3 Evaluación del sistema

Para implementar este sistema se debe evaluar su factibilidad en cuanto a la oferta y la demanda del agua lluvia. En la oferta influyen: la pluviometría de la zona, el área de captación y el tipo de techo. La demanda por su parte depende del número de personas beneficiadas y de los servicios instalados. Con estos parámetros se calcula el volumen del tanque de almacenamiento

8.3.1 Pluviometría. Es el estudio y tratamiento de los datos de precipitación que se obtienen de los pluviómetros ubicados estratégicamente en las diferentes regiones del país. En la página del IDEAM se encuentran los datos de precipitación mensual representados en gráficos, con los cuales se construye la Tabla 14. Allí se encuentran los valores de las precipitaciones entre los años 2010 a 2017, y se halla el promedio para cada uno de los meses (P_{pi}). Los datos recolectados provienen de la estación de Lebrija y de la UIS, siendo los representativos para el área metropolitana de Bucaramanga. Las medidas se expresan en milímetros de agua, que equivale

al agua que se acumularía en una superficie horizontal impermeable de un metro cuadrado durante el tiempo de la precipitación.

Tabla 14
Pluviometría Área Metropolitana de Bucaramanga

Mes	Precipitación (mm agua)									
	Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	P_{pi}
Enero		4	28	65	63	33	40	50	175	57,3
Febrero		40	87	12	180	150	113	45	10	79,6
Marzo		37	70	100	185	43	98	75	220	103,5
Abril		54	170	172	33	70	---	80	220	114,1
Mayo		190	170	38	213	90	---	140	100	134,4
Junio		120	88	63	37	60	---	73	120	80,1
Julio		120	68	105	40	89	---	135	75	90,3
Agosto		130	138	87	172	98	---	48	35	101,1
Septiembre		200	25	38	62	77	---	43	75	74,3
Octubre		145	380	270	123	225	15	105	155	181,0
Noviembre		243	90	165	125	125	70	135	125	134,8
Diciembre		300	110	140	28	40	5	10	72	88,1
		Pluviometría anual								1.238,6

Nota. Adaptado de IDEAM

8.3.2 Oferta. Depende del coeficiente de escorrentía, el área de captación y la pluviometría de la región. Para techo verde el coeficiente de escorrentía se estimó en 0,5 teniendo en cuenta que la superficie cubierta por sustrato es bastante menor en comparación con un techo verde extensivo normal. El área de captación es de $57 m^2$ aproximadamente. La oferta de agua lluvia se determina usando la *Ecuación 7*, donde A es la oferta de agua medida en litros (L), P_a es la pluviometría anual en la zona en L/m^2 , C_e es el coeficiente de escorrentía y A_c es el área de captación en m^2 . Para un año se obtiene una oferta de 35.300 L.

$$A = P_a * C_e * A_c \quad \text{Ecuación 7}$$

8.3.3 Demanda Instalada. La demanda de agua depende de la cantidad de personas beneficiadas y los aparatos instalados, se calcula mediante la *Ecuación 8*, donde D es la demanda

medida en litros (L), n es el número de personas beneficiadas, c es el consumo diario por persona al día, y p el periodo considerado, medido en días.

$$D = n * c * p \quad \text{Ecuación 8}$$

El consumo diario se obtiene de la factura del servicio público de agua (*Figura 61*) con la cual se tiene un consumo mensual promedio de $12,43 \text{ m}^3$ para tres personas que habitan la vivienda, lo cual corresponde a 136,2 litros por persona al día. Según la *Ecuación 8* se obtiene una demanda anual de 149.139 L, lo cual es muy superior a la oferta de 35.300 L. Esto indica que no se pueden conectar todos los aparatos de la vivienda. Además, el agua lluvia sin tratamiento alguno no se debe destinar al consumo humano.

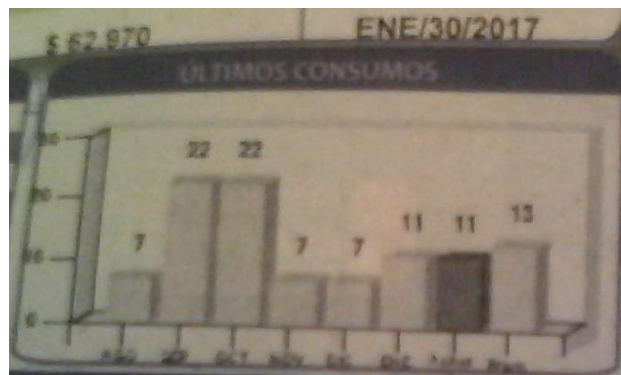


Figura 61. Factura de Servicio de Agua

Aqua España estima el consumo de agua para cada aparato sanitario según se indica en la Tabla 15. Entonces, para una cisterna de WC se tiene un consumo diario de 24 litros por persona, que para un año y con tres habitantes se obtiene una demanda de 26.280 L, lo cual tiene que ser menor que la oferta de 35.300 L para que el sistema sea viable. Se debe aprovechar el superávit de 9.020 L que equivalen a 24,7 L/día, los cuales se destinan para el sistema de riego por goteo del techo verde.

Tabla 15
Estimación demanda de agua en Vivienda Unifamiliar

Suministros	Base de calculo
Cisterna de WC	3 usos diarios de 8 L/persona
Lavadora	3 usos/semana de 32 L/persona
Limpieza	1 uso diario de 3 L/persona
Riego Jardín	3 L/m ² /día en 30 días sequía

Nota. Adaptado de AQUA España (s.f.,)

8.3.4 Volumen del tanque. El volumen del tanque principal de almacenamiento se calcula a partir de la diferencia entre la oferta y la demanda mensual acumulada, A_i y D_i respectivamente, halladas a través de las *Ecuaciones 7* y *8*. Para calcular la demanda mensual se debe determinar el valor máximo de c , lo cual se logra al reemplazar D por A en la *Ecuación 8* y considerando una reserva de 1.000 L.

$$c = \frac{A}{n * p} = \frac{35.300 L - 1.000 L}{3 personas * 365 dias} = 31,32 \frac{L}{persona * dia}$$

Con la dotación hallada, se determina una demanda diaria $D = 94 L/dia$, y en la Tabla 16 se calcula el volumen del tanque siguiendo el método de CEPIS (2003), el cual corresponde al valor de la mayor diferencia entre la oferta acumulada y la demanda acumulada mes a mes, empezando con el mes de mayor precipitación promedio mensual (P_{pi}).

El volumen del tanque corresponde por tanto a 3.268 L, cuyo valor comercial es de 3.500 L, y el tanque elevado de 250 L que tiene reserva para un poco más de dos días.

Una forma de analizar el resultado obtenido es revisando el periodo de tiempo entre lluvias o días de sequía, en el cual el tanque puede satisfacer la demanda. Aqua España estima este periodo entre 30 a 45 días, dependiendo de la climatología. Por medio de la *Ecuación 9* se determina el periodo entre lluvias (E), donde V_t es el volumen del tanque en litros y D es la demanda anual del agua de lluvia. Para este proyecto dicho valor corresponde a 37 días.

$$V_t = \frac{D * E}{365 \text{ días}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Tabla 16
Calculo de Volumen Tanque de Almacenamiento

Mes	P_{pi} (L/m ²)	Oferta A_i (L)		Demanda D_i (L)		Diferencia (L)
		Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado	
Octubre	181,0	5.159	5.159	2.913	2.913	2.245
Noviembre	134,8	3.842	9.000	2.819	5.732	3.268
Diciembre	88,1	2.511	11.511	2.913	8.646	2.866
Enero	57,3	1.633	13.144	2.913	11.559	1.586
Febrero	79,6	2.269	15.413	2.631	14.190	1.223
Marzo	103,5	2.950	18.363	2.913	17.103	1.259
Abril	114,1	3.252	21.614	2.819	19.922	1.692
Mayo	134,4	3.830	25.445	2.913	22.835	2.609
Junio	80,1	2.283	27.728	2.819	25.655	2.073
Julio	90,3	2.574	30.301	2.913	28.568	1.733
Agosto	101,1	2.881	33.183	2.913	31.481	1.702
Septiembre	74,3	2.118	35.300	2.819	34.300	1.000

8.4 Sistema de bombeo

Un equipo de bombeo consiste en dos elementos, una bomba y su accionador el cual puede ser un motor eléctrico, motor de combustión interna, etc. El accionador entrega energía mecánica y la bomba la convierte en energía cinética que un fluido adquiere en forma de presión, de posición y velocidad (Comisión Nacional del Agua, 2007). Para seleccionar la bomba, teniendo en cuenta que se trata de una operación sencilla de simplemente transportar agua de un sitio a otro, se debe tener en cuenta dos factores: La altura total y el caudal.

8.4.1 Altura Total. Se compone de la sumatoria de dos alturas, la altura de succión y la altura de descarga (*Figura 62*). La altura de succión corresponde a la distancia vertical que existe entre la superficie del agua hasta el punto de instalación de la bomba, y la altura de descarga a la distancia vertical entre dicho punto y el punto extremo donde descargará la tubería. A esta

distancia vertical denominada altura estática, se le debe adicionar las perdidas debidas a la fricción en la tubería y a la de los accesorios.

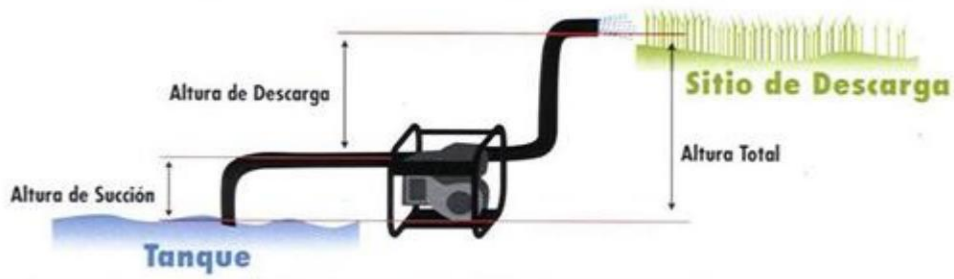


Figura 62. Esquema Sistema de Bombeo. Adaptado de Mejia Piña & Salamea Cobos (2011)

8.4.2 Caudal de Bombeo. Es la cantidad de agua que sale por la tubería de descarga en un tiempo determinado. Este valor se obtiene de la curva de rendimiento de la bomba (Figura 63) para una altura total (h_T) determinada.

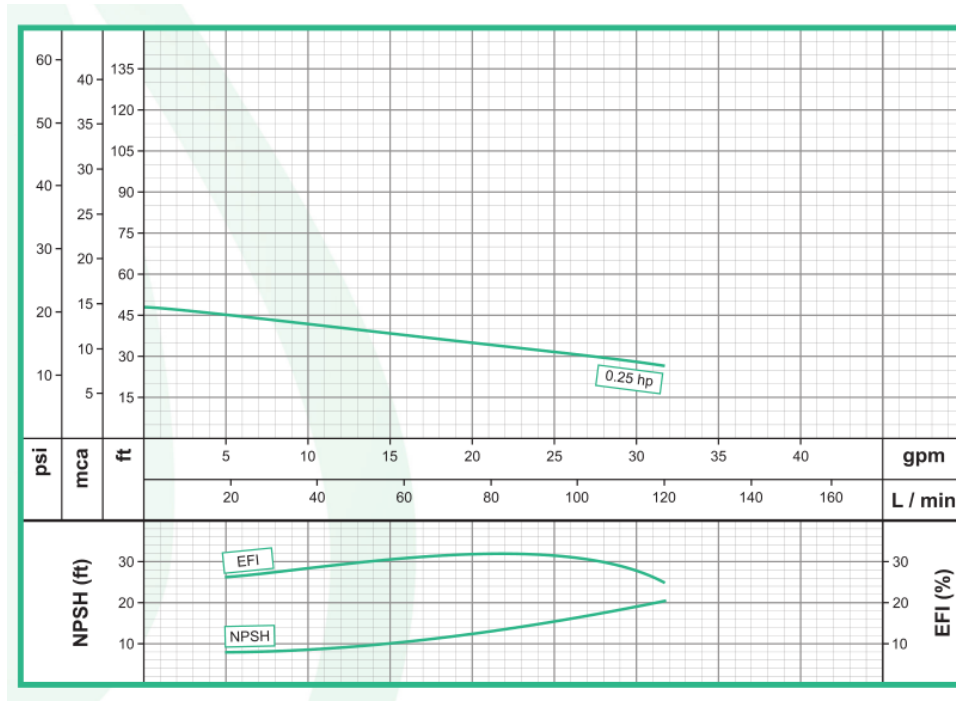


Figura 63. Curva de Rendimiento Bomba Barnes de 0,25 hp. Adaptado de Barnes.com

8.4.3 Perdidas primarias (h_f). Debidas a la fricción del fluido a lo largo de la tubería, dependen del caudal (Q) el diámetro (d) y la longitud (l) de la tubería, de acuerdo con la ecuación de Darcy-Weisbach (*Ecuación 10*). Donde f es el factor de fricción de Darcy, el cual depende de la rugosidad de la tubería y el número de Reynolds, y g es la aceleración de la gravedad.

$$h_f = \frac{8flQ^2}{\pi g d^5} \quad \text{Ecuación 10}$$

8.4.4 Perdidas Secundarias. Se presentan debido a los accesorios de la tubería. Se pueden sumar junto con las primeras a través del concepto de longitud equivalente, donde a cada accesorio le es asignado una longitud que equivale al tramo de tubería recta en la cual se presentarían las mismas pérdidas que en el accesorio. En la Tabla 17 se listan los accesorios presentes en la instalación de la línea de la bomba en este proyecto, y su respectiva longitud equivalente (L_e) en metros, obtenidos a partir de un monograma del libro de Mataix.

Tabla 17
Perdidas Secundarias expresadas en longitud equivalente de tubería

Cantidad	Accesorio	L_e c/u [m]	L_e total [m]
5	Codo 90° Φ ½"	1,22	6,1
1	Válvula de pie Φ 1"	2,5	2,5
1	Válvula de retención Φ ½"	1,22	1,22
	Total		9,82

Nota. Adaptado de Mataix (1986)

8.4.5 Selección de la bomba. Conocida la longitud equivalente de los accesorios sumada a la longitud de la tubería, los requerimientos de caudal y el diámetro de la tubería, se determinan las pérdidas totales utilizando la tabla que se muestra en la *Figura 64*. Sumando dichas pérdidas y la altura estática se halla la altura total de la bomba. Este valor se lleva a la curva de la bomba (*Figura 63*) para comprobar el caudal con el que se partió para hallar las pérdidas. Si estos valores

no coinciden entonces se debe cambiar el valor del caudal y realizar nuevamente el procedimiento hasta conseguir el punto de operación, o si no seleccionar otra curva de rendimiento de la bomba.

GPM	GPH	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	8"	10"
		ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.	ft.
1	60	4.25	1.38	.356	.11									
2	120	15.13	4.83	1.21	.38	.10								
3	180	31.97	9.96	2.51	.77	.21	.10							
4	240	54.97	17.07	4.21	1.30	.35	.16							
5	300	84.41	25.76	6.33	1.92	.51	.24							
6	360		36.34	8.83	2.69	.71	.33	.10						
8	480		63.71	15.18	4.58	1.19	.55	.17						
10	600		97.52	25.98	6.88	1.78	.83	.25	.11					
15	900			49.68	14.63	3.75	1.74	.52	.22					
20	1,200			86.94	25.07	6.39	2.94	.86	.36	.13				
25	1,500				38.41	9.71	4.44	1.29	.54	.19				
30	1,800					13.62	6.26	1.81	.75	.26				
35	2,100					18.17	8.37	2.42	1.00	.35	.09			
40	2,400					23.55	10.70	3.11	1.28	.44	.12			
45	2,700					29.44	13.46	3.84	1.54	.55	.15			
50	3,000						16.45	4.67	1.93	.66	.17			
60	3,600						23.48	6.60	2.71	.93	.25			
70	4,200							8.83	3.66	1.24	.33			
80	4,800							11.43	4.67	1.58	.41			
90	5,400							14.26	5.82	1.98	.52			
100	6,000								7.11	2.42	.63	.08		
125	7,500								10.83	3.80	.95	.13		
150	9,000									5.15	1.33	.18		
175	10,500									6.90	1.78	.23		
200	12,000									8.90	2.27	.30		
250	15,000										3.36	.45	.12	
300	18,000										4.85	.63	.17	
350	21,000										6.53	.84	.22	
400	24,000											1.08	.28	
500	30,000											1.66	.42	.14
550	33,000											1.98	.50	.16

Figura 64. Tabla de Perdidas por Fricción para 100 ft. de Tubería de PVC. Adaptado de Goulds Pumps (s.f). *Friction Loss, Technical Data*. ITT Industries.

La instalación posee una altura estática correspondiente a 7,5 m. La línea de succión se lleva cabo en tubería PVC de una pulgada (Φ 1") y la de descarga en PVC de media pulgada (Φ 1/2"). La longitud total de la tubería es de 13 m, y sumando la longitud equivalente de las pérdidas secundarias se obtienen 23 m aproximadamente. Luego de varias iteraciones se determina el punto de operación de la bomba con altura total $h_T = 45 \text{ ft}$ y caudal $Q = 5 \text{ gpm}$ para la curva de la bomba de 0,25 hp mostrada en la Figura 63. Con dicho caudal se consigue en la línea de descarga una velocidad del fluido $v = 1,93 \text{ m/s}$, el cual está dentro del rango recomendado por la Comisión Nacional del Agua (2007) de 1,5 a 2,5 m/s.

9. Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico se compone de una serie de elementos cuyo fin es transformar la energía solar en electricidad. La energía solar es una fuente de energía renovable que no se agota y no ocasiona contaminación a la atmosfera. Por ello es una alternativa atractiva para mitigar el impacto ambiental, además de un crecimiento económico, ya que en todo el mundo es sabido que se está presentando un calentamiento global, causado principalmente por las altas emisiones de gases efecto invernadero producto de procesos industriales en la transformación de los recursos naturales.

9.1 Radiación Solar

En el núcleo del sol se producen reacciones nucleares de fusión, las cuales generan energía denominada radiación solar. La radiación solar se transmite en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias, y alcanzan la atmosfera terrestre en forma de un espectro electromagnético (*Figura 65*) con longitudes de onda que van desde $0,15 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$. El espectro visible está comprendido entre las longitudes de onda que van desde $0,4 \mu\text{m}$ hasta los $0,78 \mu\text{m}$. La radiación ultravioleta (UV) está por debajo de este rango y la infrarroja (IR) por encima.

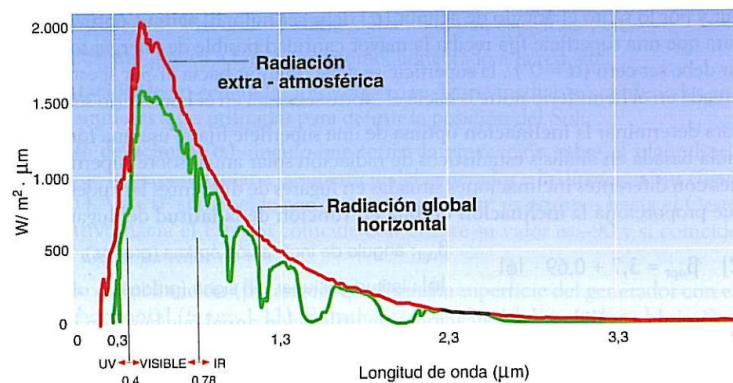


Figura 65. Espectro Electromagnético de la Radiación Solar Extra-atmosférica y en la Superficie Terrestre. Adaptado de Castejon Oliva & Santamaria Herranz (s.f)

La radiación solar sufre alteraciones hasta llegar a la superficie captadora, ocasionadas por diferentes factores como las nubes y los cambios estacionales. Por eso, la radiación solar sobre un receptor se clasifica en tres componentes: directa, difusa y reflejada (*Figura 66*). La radiación directa la forman los rayos recibidos directamente del sol. La radiación difusa procede de toda la bóveda celeste excluyendo el disco solar, la forman los rayos dispersados por la atmosfera en dirección al receptor. La radiación reflejada es aquella que no llega en forma directa al receptor, sino que se refleja en todo aquello que pueda encontrarse alrededor del receptor como montañas, lagos, edificios, etc. La suma de todas las radiaciones mencionadas conforma la radiación global, que es la radiación total que llega al receptor.

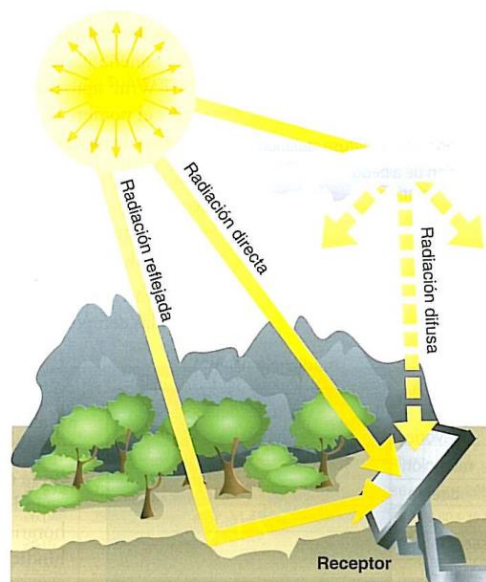


Figura 66. Tipos de Radiación sobre una Superficie. Adaptado de Castejon Oliva & Santamaria Herranz (s.f)

Para definir los parámetros nominales de los módulos fotovoltaicos se define un valor para la radiación solar extra-atmosférica. Es decir, que al exterior de la atmosfera terrestre solo llega una parte de la radiación que emite el sol. Este valor de irradiancia se denomina constante solar y equivale a: $B_0 = 1000 \text{ W/m}^2$.

De acuerdo con la ubicación geográfica y con el clima del lugar donde se instale el generador fotovoltaico, se tiene un valor específico de la radiación. En la *Figura 67* se muestra una tabla que relaciona variables atmosféricas ofrecidas por una página de la Nasa en la cual se incluye el valor de la radiación solar diaria para el lugar donde se ubica la vivienda (latitud: 6.999396 y longitud: -73.061137), para el cual se obtiene un valor de la media mensual de irradiación global diaria: $G_{dm} = 4,98 \text{ Kwh/m}^2/\text{dia}$, correspondiente al mes de diciembre donde se da la menor radiación.

Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	20.6	70.3%	5.33	87.8	1.8	21.9	0	337
February	21.7	65.2%	5.39	87.7	1.7	23.6	0	335
March	21.7	70.6%	5.36	87.7	1.6	23.6	0	367
April	21.4	77.1%	5.17	87.7	1.5	23.0	0	347
May	21.0	79.6%	5.25	87.8	1.5	22.1	0	347
June	20.9	75.6%	5.39	87.8	1.7	21.8	0	332
July	20.9	69.6%	5.72	87.8	1.7	22.0	0	345
August	21.3	67.3%	5.72	87.8	1.5	22.4	0	356
September	21.1	72.2%	5.63	87.8	1.4	22.3	0	338
October	20.4	80.5%	5.12	87.8	1.4	21.6	0	328
November	20.2	82.0%	4.99	87.7	1.4	21.2	0	312
December	20.1	78.2%	4.98	87.7	1.7	21.0	0	322
Annual	21.0	74.0%	5.34	87.8	1.6	22.2	0	4066
Measured at (m)					10.0	0.0		

Figura 67. Variables Atmosféricas del Lugar. Adaptado de Kusterer (2008)

9.1.1 Perdidas. En el proceso de transformación de la energía se presentan pérdidas debido a muchos factores, tales como la temperatura, diferencia de intensidad y tensión nominal entre módulos de un mismo generador, no operar en el punto de máxima eficiencia debido a las variaciones de la radiación, efecto Joule en los conductores, sombramientos, pérdidas en los

diferentes aparatos que componen el sistema. Las pérdidas por temperatura se estiman en 4% por cada 10°C después de los 25°C (Castejon Oliva & Santamaria Herranz).

Está demostrado que los techos verdes moderan el efecto de calor sobre el panel fotovoltaico si este se ubica a una altura entre 50 y 75 cm (Hernández Cristancho, Quintero Sanguino, & Torres Romero, 2016). Aumentando desde el 1,29% hasta el 3,3% de la eficiencia de la generación (Rojas Zambrano & Florez Gomez, 2016). Además, si se implementara un sistema de riego por chorros sobre el panel en las horas de mayor radiación (9 am – 4 pm) con un caudal entre 3,5 a 4 litros por minuto cada 30 minutos, se obtendría una ganancia adicional de 33 *Wh/dia*.

9.2 Geometría Solar

Los rayos del sol que chocan con el receptor llegan con una dirección que depende de los movimientos de la tierra respecto al sol, de la inclinación de la tierra y de la posición geográfica en la que se encuentre el receptor. El eje de la tierra se encuentra inclinado un ángulo de 23,45° respecto al plano de su órbita alrededor del sol, provocando los cambios estacionales y las diferentes duraciones de las noches y los días. A este ángulo se le denomina declinación, el cual varía a lo largo de la órbita de la tierra alrededor del sol, que como se ve en la *Figura 68* alcanza su valor máximo positivo el 21 de junio en el solsticio de verano y el máximo negativo el 21 de diciembre en el solsticio de invierno. El valor de cero se presenta en los equinoccios de primavera y de otoño el 21 de marzo y el 22 de septiembre respectivamente.

El ángulo de declinación (δ) a lo largo del año se puede determinar de acuerdo con la *Ecuación 11*, donde δ_n corresponde al día del año, 1 para el primero de enero y 365 para el 31 de diciembre.

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left(360 * \frac{284 + \delta_n}{365} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

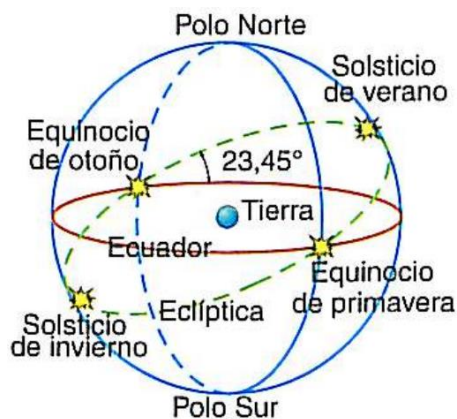


Figura 68. Esfera Celeste. Adaptado de Castejon Oliva & Santamaria Herranz (s.f)

9.2.1 Orientación e inclinación del receptor. Para que el receptor capte la mayor cantidad de energía posible, debe orientarse perpendicularmente a los rayos del sol. Para ello se puede implementar un sistema de seguimiento solar. Sin embargo, puede resultar costoso y por eso no se tendrá en cuenta en este proyecto. Así que el receptor o panel se orientara de acuerdo con dos parámetros que son: el ángulo de acimut (α) y el ángulo de inclinación (β) (Figura 69). El ángulo de acimut es el que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del generador y la dirección sur, y el ángulo de inclinación es aquel que forma la superficie del generador con el plano horizontal.

El ángulo acimut (α) se define de acuerdo con la ubicación terrestre en la cual se instale el receptor. Para latitudes norte arriba del valor máximo de declinación ($23,45^\circ$), el sol se ubicará siempre en el sur y por lo tanto el generador debe disponerse en esa dirección con un ángulo $\alpha = 0^\circ$. Sin embargo, Piedecuesta se encuentra a una latitud norte de 7° , lo cual es menor a la

declinación máxima, y el sol se ubicará al norte entre el 9 de abril y el 3 de septiembre, donde los rayos solares alcanzan un ángulo máximo de $16,45^\circ$ respecto al plano horizontal, y al sur el resto del año, consiguiendo una inclinación máxima de los rayos solares de $30,45^\circ$ (Figura 70). Este hecho determina la inclinación β que debe tener el panel, para lo cual se sugiere que el panel permanezca inclinado $8,2^\circ$ al norte entre el 9 de abril y 3 de septiembre, y $15,2^\circ$ al sur después del 3 de septiembre.

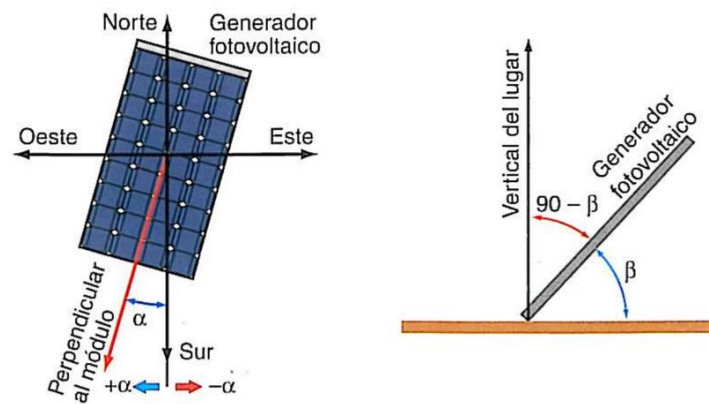


Figura 69. Orientación del Generador. Adaptado de Castejon Oliva & Santamaria Herranz (s.f)

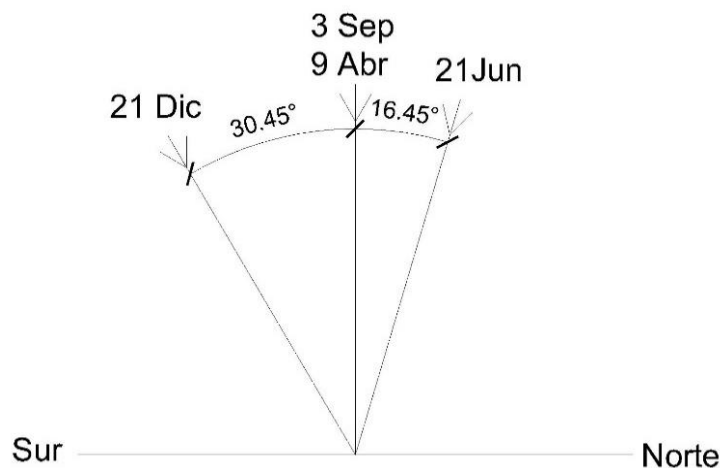


Figura 70. Dirección Radiación sobre Superficie Horizontal a 7° Latitud Norte

9.3 Componentes del Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico para la generación de electricidad posee una serie de elementos que depende del tipo de sistema a instalar, que puede ser conectado a red (grid tie) o autónomo. En un sistema conectado a la red se prescinde de la batería de acumuladores y el regulador de carga, y solo es indispensable un inversor de corriente, ya que la energía generada es dirigida inmediatamente a la red. Este sistema es viable cuando la compañía que brinda el servicio público de electricidad compra la energía producida por el sistema fotovoltaico. Así funciona por ejemplo en España. Sin embargo, en la localidad de Bucaramanga la compañía del servicio eléctrico ESSA no promueve este sistema.

Para este proyecto se llevará a cabo el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo que provea la demanda total de corriente alterna (AC) de la vivienda de la segunda planta. Es así como el sistema se compone de los elementos que se muestran en la *Figura 71*, un generador fotovoltaico, regulador de carga, batería de acumuladores e inversor de corriente.

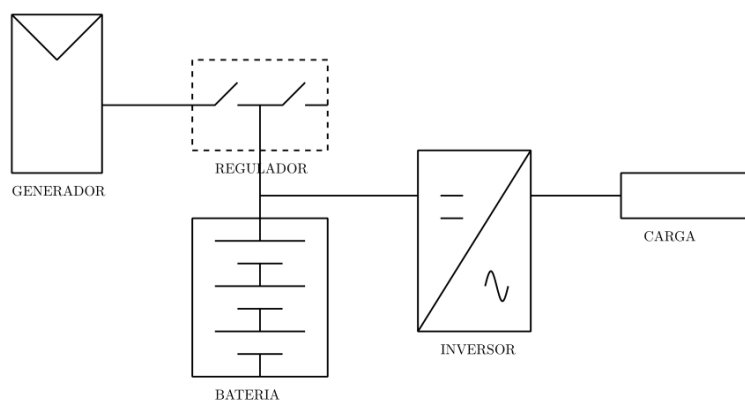


Figura 71. Sistema Fotovoltaico Aislado de la Red. Adaptado de Perpiñán Lamigueiro (2015)

9.3.1 Generador Fotovoltaico. Se trata de módulos conformados por células de elementos semiconductores como el silicio, las cuales tienen la propiedad que bajo la acción de la radiación

se liberen electrones que conforman enlaces covalentes, produciendo un hueco o carga positiva y de esta manera los electrones se muevan de un hueco a otro generando una corriente eléctrica. Las tecnologías más populares en la construcción de módulos fotovoltaicos son los conformados por células de silicio monocristalino y policristalino, y de láminas delgadas. Los más eficientes son los de silicio monocristalino (13 – 18%), sin embargo, son los más costosos. Los módulos de silicio amorfo (láminas delgadas) por otra parte, son mucho más baratas, pero menos eficientes (8%) y se degradan rápidamente. En la *Figura 72* se puede apreciar el montaje de módulos fotovoltaicos sobre una cubierta de lámina.

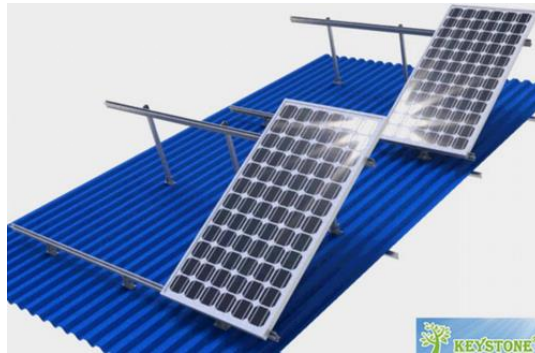


Figura 72. Montaje de Panel Fotovoltaico sobre Cubierta de Lámina. Adaptado de Keystone (s.f.)

9.3.2 Batería de Acumuladores. Una batería consiste básicamente de un recipiente que contiene dos placas de diferentes polaridades (positiva y negativa) aisladas por separadores e inmersas en un electrolito de ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4). Las placas actúan como electrodos y consisten principalmente de rejillas de plomo cuya función es conservar la materia activa y conducir la corriente eléctrica.

La batería tiene la función de almacenar la energía producida por el panel con el fin de garantizar la continuidad del servicio durante las horas donde no hay luz solar. Su capacidad de

almacenamiento se mide en amperios-hora (Ah), es decir, que en teoría una batería de 100Ah es capaz de suministrar 2A en 50 horas o 50A en 2 horas. Aunque esto no es del todo válido ya que la capacidad del acumulador disminuye si el tiempo de descarga es muy corto. Así pues, la capacidad e intensidad nominal siempre se deben dar referidas a un régimen de descarga. Por ejemplo, a una capacidad nominal $C_n = 360 Ah$ con régimen de descarga C72, le corresponde una intensidad nominal $I_n = 5A$, es decir que puede suministrar 5A durante 72 horas de funcionamiento.

9.3.2.1 Constitución. Una batería se constituye básicamente por electrodos y un electrolito. Los electrodos son placas generalmente a base de plomo (Pb-acido), aunque pueden ser de níquel-cadmio (Ni-Cd) o níquel-hierro. El electrolito sirve de conductor iónico, es una solución acuosa de un ácido, una base o sales, y en algunos acumuladores actuales suele ser un gel.

9.3.2.2 Tipos de baterías. Son dos los tipos de baterías: monoblock y estacionarias. La batería monoblock suele utilizarse en instalaciones fotovoltaicas aisladas que necesiten poca capacidad de almacenamiento, y debe considerarse contar con una batería de ciclo profundo, ideal para grandes descargas. Las estacionarias por otra parte, se utilizan en instalaciones fotovoltaicas de 24 y 48V que necesitan de gran capacidad de almacenamiento, con una profundidad de descarga moderada (SunFields, s.f.). Se constituyen por elementos generalmente de 2V, los cuales se unen en serie hasta alcanzar la tensión del sistema de acumulación.

Según la forma del electrolito se pueden conseguir baterías líquidas y baterías VRLA (Valve Regulated Lead Acid Battery). Las líquidas son las más económicas y son menos problemáticas si se sobrecargan, aunque se debe controlar su nivel de agua y tienen corta vida útil, alrededor de 400 ciclos de carga y descarga. Dentro de las baterías VRLA hay dos tipos: de Gel y

AGM. Las de gel vienen selladas y ya no existe un líquido que controlar, su vida útil es mayor y resisten mejor las bajas temperaturas, aunque su precio es superior y posee una resistencia interna un poco mayor que reduce el flujo máximo de la corriente. Las AGM tienen la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo (95%), su autodescarga con el tiempo es mínima y tiene una resistencia interna que permiten corrientes altas. Sin embargo, son más caras y vulnerables ante descargas profundas (Parra Silva & Osorio, 2014). En la *Figura 73* se puede observar a la izquierda una batería monobloque y a la derecha una estacionaria, ambas de tecnología gel.



Figura 73. Baterías Tecnología Gel para Sistemas Fotovoltaicos. Adaptado de Bureau Baterias (s.f.)

9.3.3 Regulador de carga. Es el encargado de controlar el proceso de carga y descarga de la batería, protegiéndola contra sobrecargas o descarga profunda, conservando su vida útil y mejorando el funcionamiento del sistema fotovoltaico. Según el modo como se efectuó la regulación se tienen: Reguladores todo o nada y reguladores PWM. La técnica de regulación PWM permite introducir más corriente en la batería sin aumento de la tensión, consiguiendo estados de carga cerca al 95% respecto a 80% - 90% por parte de reguladores todo o nada. Además, se mejora el aprovechamiento de la energía procedente del generador fotovoltaico.

También es común encontrar hoy en día reguladores con seguidor de máxima potencia MPP (Máximo Power Point), los cuales reducen las pérdidas de potencia cuando se utilizan

módulos fotovoltaicos cuya tensión en el punto de trabajo óptimo es muy diferente a la tensión de trabajo de las baterías. Los seguidores MPP se incluyen como parte integrante de los inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a red. Sin embargo, para sistemas autónomos no es frecuente su uso porque encarece el regulador sin aportar ventajas significativas. Debe considerarse la posibilidad de utilizar un regulador con seguidor MPP y trabajar con una tensión en el generador fotovoltaico superior a la del sistema de acumulación, si la potencia es superior a 2KW y las distancias entre el regulador y el generador es mayor a 10 m.

9.3.4 Inversor de corriente. Su función es transformar la corriente continua (CC) que suministra el panel en corriente alterna (AC) demandada por los diferentes electrodomésticos. Es preferible trabajar con AC debido a que se manejan intensidades menores, lo cual es una ventaja para el transporte de la misma y la selección de los conductores. Además, la mayoría de aparatos se construyen para trabajar con este tipo de corriente.

9.3.4.1 Tipos. Los inversores pueden ser de dos tipos, según el destino de la corriente alterna: Inversores para sistemas fotovoltaicos autónomos e inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Para los sistemas autónomos, el inversor se puede conectar a la salida del regulador o en los bornes del acumulador, aunque para este caso tiene que tolerar el rango de variación de la tensión de entrada proporcionado por la batería. Para sistemas conectados a red es indispensable que el inversor disponga de seguidor MPP, y para sistemas aislados este mecanismo no es necesario.

Según la forma de la onda de salida se tienen inversores de onda cuadrada, onda cuadrada modificada y onda sinusoidal. Los inversores de onda cuadrada no se recomiendan para uso doméstico, ya que no tienen mucho control sobre el voltaje de salida, ni limitan la sobretensión. Los inversores de onda modificada pueden manejar grandes sobretensiones y son recomendables

para uso doméstico, aunque producen ruido eléctrico que afecta algunos artefactos electrónicos. Los de onda sinusoidal permiten el uso de equipos electrónicos muy sensibles, tienen alta capacidad de sobretensión y pueden arrancar muchos tipos de motores con gran facilidad (Proyecto EnDev/GIZ, 2013).

9.4 Dimensionamiento del sistema

9.4.1 Cargas. Con el fin de dimensionar el generador fotovoltaico y su capacidad, primero debe conocerse la carga que se le impondrá al sistema. En la Tabla 18 se listan los diferentes aparatos con sus respectivos consumos de potencia en vatios (W) y la energía demandada en Vatios-hora (Wh) estimando un periodo de utilización para cada aparato.

Tabla 18
Cargas Asociadas al Sistema Fotovoltaico

Cantidad	Receptor	Potencia (W)	Uso diario (horas)	Energía diaria (Wh)
1	Nevera	150		1.113 ^a
1	Lavadora	400		633 ^a
1	Licuada	270	0,1	27
8	Bombillos 15W	120	4	480
1	T. V	100	4	400
2	Portátil 75W	150	4	600
	Otros	100	2	200
	Total	1.290		3.453

Nota. ^a Consumos estimados por el fabricante

9.4.2 Tensión nominal del sistema. Elegir la tensión nominal del sistema depende principalmente de la potencia a manejar. Siguiendo el criterio de la Tabla 19, para una potencia de 1.290W corresponde una tensión nominal (U_n) de 24V.

Tabla 19

Tensión Nominal del Sistema en Función de la Potencia

Potencia	Tensión nominal
$P \leq 800W$	12 V
$800 < P \leq 1.600 W$	24 V
$1.600 < P \leq 3.200 W$	48 V
$P > 3.200 W$	120 o 300 V

Nota. Adaptado de Castejon Oliva & Santamaria Herranz, (s.f)

9.4.3 Calculo del Generador Fotovoltaico. El dimensionamiento del generador fotovoltaico se lleva a cabo en función del consumo eléctrico y la radiación solar que se recibe en el lugar. Para la ciudad de Piedecuesta, según la tabla de la *Figura 70*, la intensidad de la radiación solar sobre una superficie horizontal correspondiente es $G_{dm} = 4,98 Kwh/m^2/dia$, el cual corresponde al mes con la menor radiación para las coordenadas específicas. Si el panel se inclina un ángulo β óptimo hacia el sol como se describió en 6.2.1 entonces se aprovecha mejor la radiación. Este incremento sin embargo no se tendrá en cuenta, y se tomará como margen de seguridad en el dimensionamiento. El valor mínimo de potencia del generador fotovoltaico (PG_{min}) se calcula con la *Ecuacion 12*, donde W_d es el consumo de energía diario obtenido de la Tabla 18 (Wh), B_0 es la constante solar cuyo valor es $B_0 = 1000 W/m^2$, G_{dm} es la radiación diaria mensual según el lugar, y PR corresponde al rendimiento energético de la instalación, cuyo valor depende de los componentes involucrados en el sistema: para sistemas con inversor $PR = 0,7$, para sistemas con inversor, batería y regulador de carga $PR = 0,6$, y para sistemas con batería y regulador de carga (sin inversor) $PR = 0,7$.

$$PG_{min} = \frac{W_d * B_0}{G_{dm} * PR} \quad \text{Ecuacion 12}$$

$$PG_{min} = \frac{3.453 * 1.000}{4.980 * 0,6} = 1.156 W$$

En la *Figura 74* se muestra un panel fotovoltaico comercial CS6P – 260M con potencia máxima $P_{max} = 260W$. y sus características eléctricas STC (Standard Test Conditions), definidas a una radiación $B_0 = 1000 W/m^2$ y temperatura de $25^\circ C$.

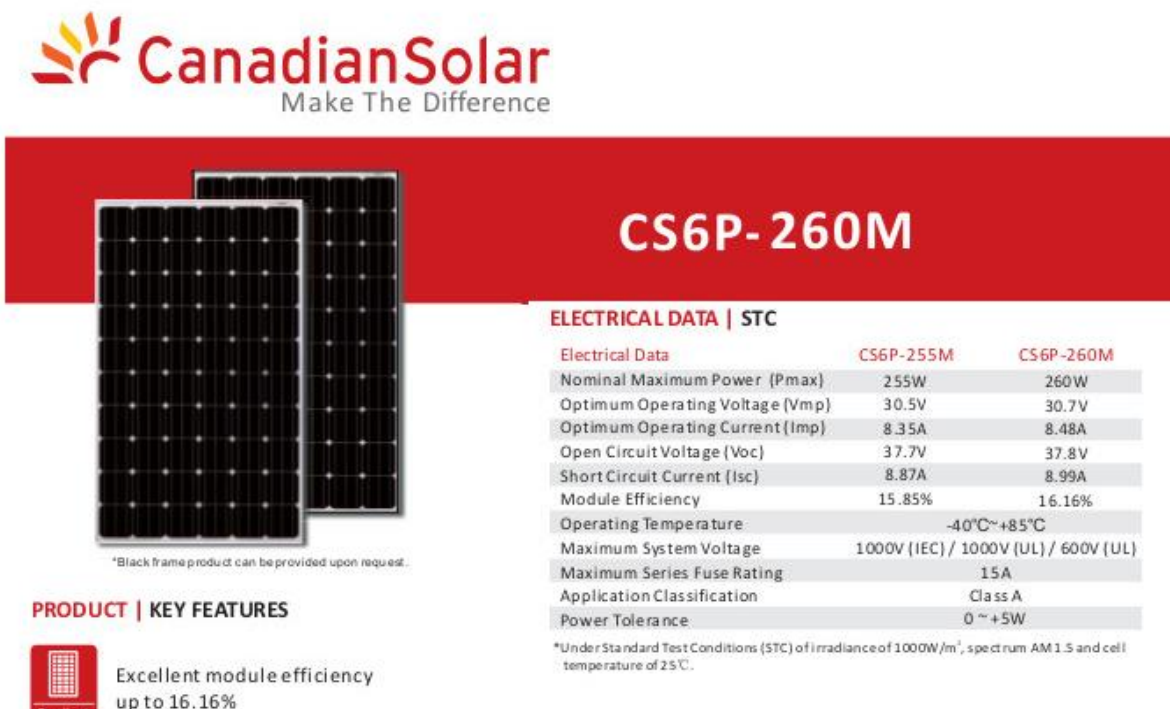


Figura 74. Características Eléctricas de Modulo Fotovoltaico Monocristalino. Adaptado de Canadian Solar

La cantidad de módulos necesarios para suministrar la potencia mínima requerida es la relación entre potencia mínima (PG_{min}) y la potencia máxima de cada módulo (P_{max}). Dichos módulos se conectan en serie o en paralelo, teniendo en cuenta que al conectarlos en serie se aumenta la tensión del sistema y al conectarlos en paralelo se aumenta la intensidad del sistema. Así pues, el producto entre el número de módulos conectados en paralelo (N_p) y el número de módulos conectados en serie (N_s) debe cumplir la *Ecuación 13*.

$$N_p * N_s \geq \frac{PG_{min}}{P_{max}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Como el módulo CS6P – 260M de la *Figura 74* trabaja a una tensión nominal de 24V la cual coincide con la tensión nominal del sistema, entonces $N_s = 1$ y:

$$N_p \geq \frac{1.156 W}{260 W} = 4,44 \approx 5 \text{ modulos}$$

Para evitar el sobredimensionamiento del generador fotovoltaico se deberá comprobar que la potencia máxima por parte del agrupamiento de los módulos elegidos (PG) no sobrepase el 20% del valor de la potencia mínima requerida ($PG_{min} = 1.156 W$).

$$PG_{min} \leq PG \leq 1,2 PG_{min} \quad \text{Ecuación 14}$$

Como se trata de 5 módulos cuya potencia pico es de 260 W para cada uno, entonces $PG = 1.300 W$, y según la *Ecuación 14*:

$$1.156 W \leq 1.300 W \leq 1.387 W$$

9.4.3.1 Corriente de cortocircuito. La corriente de cortocircuito del generador (I_{Gsc}) depende de la cantidad de módulos conectados en paralelo y de la intensidad de cortocircuito del módulo según la *Ecuación 15*. Para el módulo CS6P – 260M la corriente de cortocircuito $I_{sc} = 8,99 A$.

$$I_{Gsc} = N_p * I_{sc} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$I_{Gsc} = 5 * 8,99 = 44,95 A$$

9.4.3.2 Voltaje de circuito abierto. La tensión de circuito abierto del generador (U_{Goc}) depende de los módulos conectados en serie, según la *Ecuación 16*, donde U_{oc} , es la tensión de circuito abierto del módulo, que para el CS6P – 260M, $U_{oc} = 37,8 V$.

$$U_{Goc} = N_s * U_{oc} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$U_{Goc} = 1 * 37,8 = 37,8 V$$

9.4.4 Dimensionado del sistema de acumulación. El criterio básico de diseño de la batería es garantizar la continuidad del sistema, incluso en días de muy baja o nula radiación. Por lo tanto, debe fijarse el número de días de autonomía (A) del sistema, el cual depende del lugar y tipo de instalación. Para aplicaciones domesticas se debe contar con 3 días de autonomía, y una profundidad de descarga máxima ($PD_{m\acute{a}x}$) del 75%. La capacidad de la batería de acumuladores (C_n) se calcula con la *Ecuación 17*, donde Q_d es el consumo medio diario en Ah obtenido según la *Ecuación 18*, η_{inv} es el rendimiento del inversor cuyo valor es del 85% y η_{rb} es el rendimiento del conjunto regulador y batería con valor típico del 80%.

$$C_n = \frac{Q_d * A}{PD_{m\acute{a}x} * \eta_{inv} * \eta_{rb}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$Q_d = \frac{W_d}{U_n} \quad \text{Ecuación 18}$$

Según la *Ecuación 18* con una tensión nominal de acumulación $U_n = 24 V$ y $W_d = 3.453 Wh/dia$, se obtiene $Q_d = 143,9 Ah$. Y de la *Ecuación 17*:

$$C_n = \frac{143,9 * 3}{0,75 * 0,85 * 0,8} = 846,2 Ah$$

El cálculo de la capacidad de la batería (C_n) según la *Ecuación 17* está referida a un tiempo de descarga de 20 horas en vez de 100 que sería el más apropiado tratándose de sistemas fotovoltaicos. Este hecho sobredimensiona en un 25% el acumulador, pero compensa la pérdida de capacidad por autodescarga del mismo a lo largo del tiempo. Sin embargo, para hacer económicamente más viable la instalación, teniendo en cuenta que la batería debe reponerse cada 3 años aproximadamente, se utiliza una batería de 510 Ah, la cual garantiza 2 días de autonomía con un 13% de sobredimensionamiento en vez de 25%.

Por lo tanto, el sistema de acumulación se diseña conectando en serie 4 baterías Power DC-510 (Figura 75) de 6V para conseguir la tensión nominal del sistema $U_n = 24 V$, con una capacidad $C_n = 510 Ah$. Estas baterías son de ciclo profundo, con una vida útil de 1.000 ciclos equivalentes a 3 años, y requieren mantenimiento para reponer el electrolito que pierden durante la gasificación producida en el proceso de carga.



Figura 75. Batería de Ciclo Profundo de 6V. Adaptado de Tecnosol (s.f.)

9.4.5 Dimensionado del regulador de carga. Para la selección del regulador de carga se debe considerar su aplicación, la tensión nominal del sistema (U_n) y la corriente máxima de generación. La corriente en operación continua que debe ser soportada por el controlador de carga, será como máximo la intensidad de cortocircuito del generador (I_{Gsc}) (Orbegozo & Arivilca, 2010). En la figura se puede apreciar un regulador que trabaja a una tensión de 24V y con capacidad de soportar una intensidad de 50A, el cual es superior a I_{Gsc} .



Figura 76. Regulador de Carga PWM. Adaptado de mercadolibre.com

9.4.6 Dimensionado del Inversor. Son dos parámetros los que rigen la selección del inversor para un sistema fotovoltaico autónomo: la tensión nominal de entrada y la potencia nominal. La tensión nominal debe coincidir con la del sistema de acumulación $U_n = 24V$, y la potencia nominal del inversor se calcula sumando los valores de potencia aparente de todos los receptores que puedan funcionar simultáneamente. La potencia aparente se mide en voltamperios (VA) e involucra un factor de potencia que, para los aparatos con consumo inductivo como la nevera, la lavadora y licuadora difiere de la unidad, además de requerir de un inversor de onda sinusoidal pura con capacidad para el arranque del receptor.

En la Tabla 18 se obtuvo la sumatoria de los consumos cuyo valor corresponde a la potencia nominal $P_n = 1.290 VA$. Ahora, la potencia para el arranque se puede considerar como el doble de la potencia aparente del receptor para un periodo de 0,5 segundos. Así para la nevera por ejemplo se tiene una potencia de arranque de 300 VA, que sumado a los demás receptores se obtiene un valor para la potencia pico máxima $P_{m\acute{a}x} = 2.110 VA$.

Otras características a tener en cuenta en la selección del inversor son su tensión de salida, frecuencia y tipo de onda. En la *Figura 77* se muestra el inversor adecuado para este proyecto, con una potencia nominal de 1.500 W y 3.000 W de potencia pico, rendimiento del 85%, trabaja a una tensión de entrada de 24V c.c. y tensión de salida de 120V c.a. de onda sinusoidal a 60 Hz.



Figura 77. Inversor de Corriente de Onda Sinusoidal. Adaptado de mercadolibre.com

9.4.7 Dimensionado de los conductores. La circulación de corriente por los conductores ocasiona una caída de tensión que depende principalmente del diámetro y longitud del conductor. Entre mayor sea la intensidad de corriente que se transporta en la línea y mayor sea su longitud, mayor debe ser el diámetro del conductor. Por ello debe evitarse transportar intensidades muy grandes, lo cual se logra con tensiones del sistema más elevadas.

La circulación de corriente conlleva a elevar la temperatura de los conductores. Esta temperatura tiene que ser inferior a la que puede soportar el aislamiento del conductor, la cual es de 70°C para aislamientos termoplásticos y de 90°C para aislamientos termoestables.

9.4.7.1 Trayectorias de corriente. El circuito fotovoltaico está dividido en 5 tramos y 3 trayectorias, según se indica en la *Figura 78*. En el día durante las horas de insolación la corriente circula por la trayectoria A y B, en cambio en la noche o en horas de baja insolación lo hace por la trayectoria C.

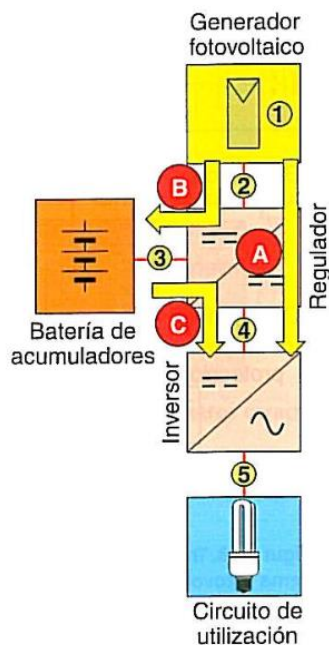


Figura 78. Trayectorias de Corriente Durante el Funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico. Adaptado de Castejon Oliva & Santamaria Herranz (s.f)

9.4.7.2 Criterio de máxima caída de tensión permisible. Es el método por el cual se dimensionarán los conductores del circuito fotovoltaico, desde el generador hasta la caja general de mando y protección donde se conectan los diferentes circuitos hacia los receptores. Según la Norma Técnica Colombiana NTC 2050, la regulación de tensión debe ser menor al 1,5%. Esto quiere decir que la caída de tensión a lo largo de todo el circuito fotovoltaico debe ser a lo mucho del 1,5% repartido entre los diferentes tramos teniendo en cuenta la trayectoria de corriente. Así para la trayectoria A que es la más desfavorable por ser la más larga, existe una caída de tensión unitaria ΔU_u con la cual se determina la caída correspondiente para cada tramo en función de su longitud, y en este caso la trayectoria A mide 7 m. Entonces, para cada uno de los tramos se obtiene su respectiva caída de tensión $\Delta U_{\%n}$ según la *Ecuación 19*, donde l_n es la longitud del conductor en metros.

$$\Delta U_u = \frac{1,5\%}{7 \text{ m}} = 0,214 \text{ \%}/\text{m}$$

$$\Delta U_{\%n} = \Delta U_u * l_n \quad \text{Ecuación 19}$$

Para la el tramo 3 de otra parte, podrá tener la misma caída de tensión que la suma de las caídas de los tramos 1 y 2 (*Ecuación 20*), para que se cumpla la condición de máxima caída de tensión en horas nocturnas o de baja insolación.

$$\Delta U_{\%3} = \Delta U_{\%1} + \Delta U_{\%2} \quad \text{Ecuación 20}$$

9.4.7.3 Intensidad de corriente por tramo. Para cada tramo de la *Figura 78* corresponde una intensidad de corriente (l_n) particular: para el tramo 1 se toma la intensidad de cortocircuito de un módulo fotovoltaico (I_{sc}). Para los tramos 2 y el 3 la corriente a considerar es la intensidad de cortocircuito del generador fotovoltaico (I_{Gsc}). En el tramo 4 se tiene en cuenta la corriente continua (c.c.) de entrada del inversor ($I_{inv \text{ c.c.}}$) para su potencia nominal (P_{inv}), la tensión

nominal del sistema de acumulación (U_n) y el rendimiento del inversor (η_{inv}) según la *Ecuación 21*. Y para el tramo 5 la intensidad de corriente alterna ($I_{inv\ c.a.}$) a la salida del inversor en función de su tensión de salida ($U_{inv\ c.a.} = 120\ v$) como se indica en la *Ecuación 22*.

$$I_{inv\ c.c.} = \frac{P_{inv}}{\eta_{inv} * U_n} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$I_{inv\ c.a.} = \frac{P_{inv}}{U_{inv\ c.a.}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Para cada uno de los tramos anteriores debe ajustarse la capacidad de corriente de los conductores como lo exige la NTC 2050 literal 690-8, en el cual se dimensiona el conductor para el 125% de la intensidad calculada.

9.4.7.4 Sección del conductor. La sección de cada tramo (S_n) en mm^2 se calcula de acuerdo con la *Ecuación 23*, donde γ_θ es la conductividad del material que para el caso del cobre a $70^\circ C$ es de $46,82\ m/\Omega * mm^2$.

$$S_n = \frac{200 * l_n * I_n}{\Delta U_{\%n} * U_n * \gamma_\theta} \quad \text{Ecuación 23}$$

Cabe aclarar que para el tramo 5 en la *Ecuación 23* se emplea la tensión $U_{inv\ c.a.}$ en vez de U_n . En la Tabla 20 se listan los valores correspondientes a la sección transversal para cada uno de los tramos indicados en la *Figura 78* junto con su respectiva intensidad de corriente I_n , longitud l_n y caída de voltaje $\Delta U_{\%n}$.

Tabla 20
Calculo de la Sección de Conductores

Tramo #	I_n (A)	l_n (m)	$\Delta U_{\%n}$	S_n (mm^2)	Calibre AWG
1	11,24	2	0,428	9,35	6
2	56,19	4	0,856	46,73	1/0
3	56,19	1	1,284	7,79	8
4	91,91	0,5	0,107	76,44	3/0
5	15,63	0,5	0,107	2,60	12

10. Análisis de Costos

En la Tabla 21 se puede observar la descripción de los costos referentes a los diferentes sistemas involucrados en el diseño de la vivienda ecológica. En la Tabla 22 se hace el análisis de los costos si la vivienda se construyera utilizando el sistema tradicional de ladrillos y acabados.

Tabla 21
Relación de Costos Proyecto de Vivienda Ecológica

Estructura					
Materiales	Columnas	Vigas	Costos	Mano de obra	Total
Varilla 6m. 3/8	155	106	2.204.145		
Varilla 6m. 1/2	30	65	1.420.250		
Cemento (<i>Kg</i>)	1.300	1.945	1.397.500		
Arena (m^3)	1,98	2,97	346.500		
Triturado (m^3)	2,97	4,45	519.400		
Encofrado			898.795		
Subtotal			6.786.590	\$2.392.455	\$9.179.045
Paredes					
	Adobe	Bahareque			
Tierra (m^3)	3,28	2,66	382.769		
Paja cortada (m^3)	8,40	1,14	651.195		
Madera (m^3)		0,56	517.795		
Transporte			260.000		
Subtotal			1.811.759	\$1.500.000	\$3.311.759
Revoque					
Tierra (m^3)		0,6	38.664		
Paja cortada (m^3)		0,78	53.243		
Arena (m^3)		1,2	84.000		
Arena fina (m^3)		0.55	38.500		
Cal (<i>Kg</i>)		160	158.400		
Bosta de vaca (m^3)		0,07	45.000		
Aceite linaza (<i>mL</i>)		3.785	123.211		
Subtotal			541.018	\$1.243.431	\$1.784.449

Tabla 21
Continuación...

Cubierta Verde				
	Cubierta	Techo verde		
Estr. madera (m^3)	1,1		1.026.259	
Machihembrado (m^2)	68,2		1.896.000	
Barr. de vapor (m^2)	68,2		87.731	
Ais. térmico (m^3)	4,77		685.723	
Listones (m^3)	0,232		216.086	
Lámina galv. (m^2)	68,2		1.151.700	
Subtotal			5.063.499	\$1.686.479 \$6.749.978
Botellas 3L		480	24.000	
Sustrato (Kg)		1.440	727.900	
Plántulas		1.440	74.880	
Válvula PVC ½"		17	85.000	
Tubería PVC ½" (m)		90	270.000	
Microtubo (m)		96	18.000	
Electroválvula		1	167.500	
Soldadura PVC (mL)		236	21.342	
Te PVC ½"		15	8.085	
Codo PVC ½"		4	1.624	
Tapón PVC ½"		16	6.400	
Transporte			120.000	
Subtotal			1.524.731	\$750.000 \$2.274.731
Sistema de Captación Pluvial en Techos				
Tanque 3.500 L		1	1.134.516	
Tanque 250 L		1	104.900	
Tubería desagüe 2" (m)		24	175.200	
Codo 2"		7	11.340	
Tubería PVC 1"		3	9.333	
Codo PVC 1"		3	3.831	
Tubería PVC ½"		12	16.044	
Adaptador tanque		1	13.900	
Accesorios PVC ½"			2.569	
Válvula selectora "or"		1	144.494	
Válvula direccional		1	234.080	
Válvula pie bronce 1"		1	42.800	
Válvula retención		1	29.600	
Canaleta 20cm (m)		14	217.200	
Sensor de nivel		2	61.000	

Tabla 21

Continuación...

Filtro de bajante	1	221.990		
Motobomba 0,25 HP		75.900		
Cable encauchetado 2x12 (m)	12	46.200		
Subtotal		2.544.897	\$580.000	\$3.124.897
Sistema Solar Fotovoltaico				
Modulo FV 260W	5	2.254.500		
Regulador de carga 50A	1	188.000		
Batería SCL DC-510	4	4.404.211		
Inversor 1500 W	1	753.990		
Conductores		99.350		
Soporte metálico		476.558		
Subtotal		8.176.609	\$1.226.491	\$9.403.100
Instalaciones y terminados				
Instalaciones eléctricas		429.400	\$660.000	\$1.089.400
Instalaciones sanitarias		327.374	\$570.000	\$897.374
Instalación de gas				\$527.714
Piso en cerámica (m ²)	53	1.863.056	\$636.000	\$2.499.056
Enchape pared (m ²)	7,2	276.812	\$86.400	\$363.212
Puertas y ventanas				\$1.828.900
Aparatos sanitarios				\$369.700
TOTAL				\$43.403.315

Tabla 22

Costo Pared Tradicional

Materiales	Pared	Revoque	Costo	Mano de obra	Total
Ladrillo H-10	1560		1.170.000		
Cemento (Kg)	386	1.025	623.500		
Arena (m ³)	1,53	2.79	302.400		
Estuco (gal)		28	198.900		
Pintura (gal)		4	163.960		
Total			2.458.760	2.783.495	\$5.242.255

11. Conclusiones

Se pudo determinar que la estructura no estaba en condiciones para poder construir un segundo piso, ya que no cumple con las normas de construcción sismorresistente colombianas NSR-10, además, las columnas no tienen el refuerzo suficiente requerido para garantizar una construcción segura.

Se realizó el diseño arquitectónico y estructural, teniendo en cuenta la norma NSR-10 y aspectos importantes relevantes a la construcción con elementos de tierra, con el fin de brindar seguridad, comodidad y estética.

En la construcción de paredes con adobe dentro de estructura de concreto reforzado, es importante el correcto confinamiento de los adobes, teniendo en cuenta que el espesor mínimo de la pared debe ser de 20cm, los vanos deben ubicarse en el centro y no deben abarcar más de la tercera parte de la superficie de la pared, y el peso de la pared debe ser lo más bajo posible.

Con el propósito de una buena iluminación y ventilación, y debido a las condiciones arquitectónicas, algunas paredes ocupan una gran parte de su área en vanos destinados a puertas y ventanas, por lo cual no sería seguro construir utilizando adobes. Así que para dichas paredes se hace necesario implementar otra técnica denominada como bahareque o quincha, la cual resulta más segura en estas situaciones.

Por medio de pruebas de campo se logró identificar el tipo de tierra como arcillosa, con una proporción aproximada de arena del 20%, por lo que se hace necesario estabilizar la mezcla con paja para evitar los efectos negativos de la retracción, y además disminuir su densidad y aumentar el aislamiento térmico.

Para la elaboración de los adobes y la construcción con tierra en general, debe llevarse a cabo un amasado intenso con suficiente agua y dejar reposar la mezcla de barro con paja por un periodo de dos o tres días, con el fin de ganar resistencia, cohesión y el equilibrio de humedad entre el barro y la paja para evitar la presencia de moho y esporas.

El diseño del techo verde consiste en una cubierta tradicional en la cual se apoyan las botellas de gaseosa de 3L donde se cultivan los vegetales para el consumo. Según el análisis de costos, esta práctica resulta poco económica debido a que incluye la cubierta tradicional, y sería más viable un techo verde extensivo.

La cantidad de agua lluvia que se puede recolectar depende entre otros, del tipo de cubierta, y para este techo verde en particular, se puede estimar un rendimiento del 50%, con lo cual se pueden captar 35.300 L anuales para satisfacer la demanda del sanitario y el riego del techo verde.

El volumen del tanque de almacenamiento calculado fue de 3.500 L, para una superficie de captación de 57 m^2 y pluviometría anual de 1.239 mm correspondiente a la zona. Se decidió utilizar únicamente un filtro de partículas grandes y no el tanque interceptor, pues no hay espacio donde ubicar este elemento.

El sistema fotovoltaico se dimensiono para un consumo de 3.453 Wh y una potencia de 1.290 W, con lo cual se necesitan 5 módulos de 260W a 24V conectados en paralelo, un regulador de carga de 50A, un banco de 4 baterías de 6V conectadas en serie con capacidad de 510 Ah y un inversor de 1500W de onda sinusoidal.

El generador fotovoltaico debe ubicarse inclinado $8,2^\circ$ al norte entre el 9 de abril y 3 de septiembre, y $15,2^\circ$ al sur después del 3 de septiembre, para de esta manera poder captar mejor la radiación solar y obtener mayor rendimiento.

Se opta por dimensionar un sistema fotovoltaico aislado de la red con el fin de evitar el pago de facturas, además de ser una instalación más sencilla. Sin embargo, se requiere de mayores garantías en el sistema de almacenamiento para evitar paros en el servicio, teniendo en cuenta que las baterías tienen un costo relativamente alto y una vida útil aproximada de 3 años.

El análisis de costos muestra que las paredes hechas a partir de barro tienen un costo solo un poco más bajo que las paredes tradicionales, pero cabe destacar que generan más trabajo y no utilizan materiales de gran impacto ambiental, además de los beneficios de la construcción natural.

Referencias Bibliográficas

- Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. W. (2006). Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan. 291-300.
- Acero Matallana, E. (2012). *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del ministerio de cultura y la norma de sismo resistencia colombiana*. Universidad Nacional de Colombia.
- Aqua España. (s.f.). *Guía Técnica de Aprovechamiento de Aguas Pluviales en Edificios*. Barcelona.
- Arnal , E., & Epelboim, S. (1985). *Manual para el proyecto de estructuras de concreto armado para edificaciones*. Caracas, Venezuela: Fundación "Juan José Aguerrevere", Fondo Editorial del Colegio de Ingenieros de Venezuela.
- Barrios L, G. (1986). Comportamiento de los suelos para la confección de adobes. *Informes de la Construcción*, 43-49.
- Beckert, J. (1986). Wirkung von Verunreinigungen der Raumluft auf den Menschen. En B. e. al. DÖsseldorf: Gesundes Wohnen.
- Blanco, M. (2012). Criterios fundamentales para el diseño sismorresistente. *Revista de la Facultad de Ingenieria U.C.V., Vol. 27, N° 3*, 71-84.
- Bonari, M. (6 de Agosto de 2011). *El ABC de una estructura sismorresistente*. Recuperado el 16 de Enero de 2018, de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=Y863hPYfYaU>
- Bureau Baterias. (s.f.). *Tienda Solar*. Obtenido de [bureaubaterias.com](http://www.bureaubaterias.com):
<http://www.bureaubaterias.com/renovables/es/instalaciones-aisladas-fotovoltaicas.php>
- Caballero Aquino, T. (2006). *Captación de agua lluvia y almacenamiento en tanques de ferrocemento, Manual Técnico*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.

- Caballero, M. (2 de Marzo de 2017). *2 claves de los materiales naturales. Higroscopicidad y difusión de vapor*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, de mirencaballerobioestudio : <https://mirencaballerobioestudio.com/materiales-naturales-higroscopicidad-y-difusion-de-vapor/>
- canalHogar. (16 de Junio de 2015). *Conoce la orientación de tu casa antes de comprarla*. Obtenido de Hogar Canales Mapfre: <https://www.hogar.mapfre.es/hogar/vivienda/2173/orientacion-casa>
- Castejon Oliva, A., & Santamaria Herranz, G. (s.f.). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Madrid: Editex S.A.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la Salud. (2004). *Guía de Diseño para Captación del Agua Lluvia*. Lima.
- CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. TABHA. (1984). *Manual de construcao com solo-cimento. 3 ed.atual*. Sao Paulo: CEPED/ BNH/ URBIS/ CONDER/ PMC/ OEA/ CEBRACE/ ABCP.
- Civilgeek. (1 de Junio de 2014). *Ingeniería y construcción*. Obtenido de Civilgeeks.com: <https://civilgeeks.com/2014/06/01/hoja-excel-para-diseno-de-vigas-de-madera/>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento*. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Fatás Fernández, L., & Catalán Garzarán, S. (2005). La construcción con tierra en la protohistoria del bajo Aragón: El caso de San Cristobal de Mazaleón. *Saldvie*, 131-141.
- Food and Agriculture Organization, FAO. (Abril de 2013). *Captación y Almacenamiento de Agua Lluvia, Opciones tecnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile.
- Forero Cortez, C. (2011). Mejora de las condiciones de habitabilidad y del cambio climático a partir de ecotechos extensivos. *Cuadernos de vivienda y urbanismo*, 316-329.

Francisco, S. P. (2014). *Carta Enciclica Laudato Si*.

Freud, S. (1927). El porvenir de una ilusión. En *Obras completas, vol II* (L. López Ballesteros, Trad., págs. 73-99). Madrid, España: Biblioteca Nueva.

Google Maps. (2018). *Google*. Obtenido de Centre National D'Études Spatiales (CNES):
<https://www.google.com.co/maps/@6.9994793,73.06253,167m/data=!3m1!1e3?hl=es>

Grandjean, E. (1972). *Wohnphysiologie*. Zürich.

Heathcote, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. *Informes de la Construcción*, 117-126.

Heredia Montes, R. (2012). *Practica empresarial en el diseño estructural en concreto reforzado, en los proyectos que adelanta la empresa Alexis Vega Ingenieros con la norma NSR-10*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Hernández Cristancho, E. Y., Quintero Sanguino, L. E., & Torres Romero, M. A. (2016). *Caracterización de la operación de paneles fotovoltaicos en condiciones tropicales bajo la influencia de un techo verde. Caso Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Ingenieria Colombiana. (1 de Noviembre de 2016). *Columnas en concreto - predimensionamiento*. Obtenido de YouTube:
<https://www.youtube.com/watch?v=Lcta8YMHKJ4>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Informe del estado del medio ambiente y de los recursos naturales*. Obtenido de IDEAM:
<http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/publicaciones-ideam>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2000). *Estudio Nacional del Agua*. Obtenido de IDEAM.

Keystone. (s.f.). *Solar Energy Systems*. Obtenido de Alibaba.com:
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/cheapest-solar-panel-mounting-racks-for-pitched-tin-roof-60348696110.html>

- Kusterer, J. M. (26 de marzo de 2008). *Atmospheric Science Data Center*. Obtenido de NASA Surface Meteorology and Solar Energy: RETScreen Data: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- Linares Monsalve, O., & Sanchez Gonzalez, O. E. (2005). *Análisis paramétrico del comportamiento sísmico no lineal de una estructura de hormigón reforzado*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Marangoni, G. (21 de Agosto de 2013). *El barro las manos la casa*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=5BxcRVdWaRc&t=619s>
- Mehmood, R. (Julio de 2012). *Islam Wallpapers & Muslim wallpapers*. Obtenido de http://islamichotpic.blogspot.com.co/2012_07_01_archive.html
- Mejía Piña, G. E., & Salamea Cobos, P. A. (2011). *Diseño de un sistema para reciclado, control y utilización de agua lluvia en la Ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción en tierra*. Kassel: Fin de siglo.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Universidad de Kassel, Alemania: Forschungslabor für Experimentelles Bauen.
- Neves, C. M., Faria, O. B., Rotondaro, R., Cevallos, P. S., & Hoffmann, M. V. (Octubre de 2009). *Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra - Prácticas de campo*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de <http://www.redproterra.org>
- Okambuva casas de paja. (8 de Marzo de 2015). *Barropaja - Taller sobre muros y tabique de tierra y paja*. Obtenido de Bioconstrucción - casas de paja - construcción sana y sostenible: <http://casadepaja.es/taller-muros-de-barropaja/>
- Parra Silva, E. F., & Osorio, J. E. (2014). *Diseño y construcción de un sistema híbrido "grid-tie" fotovoltaico casero con un consumo instantáneo máximo de 2000Watt*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- Perea, E. (28 de Septiembre de 2014). *Materiales de construcción*. Obtenido de Blogspot: <http://eliizab.blogspot.com.co/2014/09/ladrillo-un-ladrillo-es-una-pieza-de.html>
- Perpiñán Lamigueiro, O. (Marzo de 2015). *Energía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de GuitHub: <https://github.com/oscarperpinan/esf>
- Placitelli, C. (2010). *Techos verdes en el Cono Sur*. Uruguay.
- Proyecto EnDev/GIZ. (2013). *Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario*. Lima: Cooperacion Alemana al Desarrollo - GIZ.
- Reyes Galvis, R. D., & Sánchez Aguirre, J. A. (2013). *Estudio de las ventajas térmicas de los techos verdes en Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Riagosa Tuk, E. (2010). *Técnicas de reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rojas Zambrano, W. Y., & Florez Gomez, C. E. (2016). *Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico Upsolar 250W instalado sobre techo verde en la Ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- SA-I-TA. (21 de Mayo de 2017). *Sistema de Captación de Agua Pluvial en Techos*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=KiGvu-NVOnM&list=LLZqK8oQseQXy0oMOKP-RJIA&index=1&t=0s>
- Salazar Aguilar, C. (22 de Septiembre de 2014). *Modulo de Vivienda con Bambu y Materiales Reciclados*. Obtenido de EcoNotas.com: <http://www.econotas.com/2014/09/modulo-de-vivienda-con-bambu-y.html>
- Sánchez, A. (1997). La arquitectura del barro en el País Valenciano durante la Prehistoria y la Protohistoria. En *Tesis de Licenciatura* (pág. 397). Universidad de Valencia.
- Socodima. (s.f.). *Canaletas de aguas lluvias*. Obtenido de Socodima: http://www.socodima.cl/s/index.php?moduloFrontend=fn_prod_familias&flujo=familia&id=79

- SODIMAC. (29 de Mayo de 2012). *¿Como elegir canaletas y bajadas de agua?* Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=7MNcJbprR40>
- Suarez Rubi, M. C. (s.f.). *Estructuras de Madera Capitulo 2, Métodos de Diseño y Análisis Estructural*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/doc/15271807/Metodos-de-Disen-y-Analisis-Estructural-de-madera>
- Suarez Rubi, M. C. (s.f.). *Estructuras de Madera Capitulo 3, Diseño de Vigas de Madera*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/doc/15271853/Diseno-de-Vigas-de-madera>
- SunFields. (s.f.). *Batería Solar Hoppecke*. Obtenido de SunFields - PV System Supplier: <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/baterias-solares-hoppecke/>
- Tecnosol. (s.f.). *Bateria solar SCL de ciclo profundo Power DC-510* . Obtenido de Tecnosol: <https://tecnosolab.com/producto/baterias/baterias-monoblock/bateria-solar-scl-ciclo-profundo-power-dc-510/>
- Vela Cossío, F. (2005). Materiales, técnicas y sistemas de construcción en la arquitectura celtibérica de la primera Edad de Hierro. En *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (págs. 1051-1062). Cádiz: S. Huerta.
- Zabala Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 1133-1140.