

**DISEÑO Y FACTIBILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICA DE UNA PROPUESTA
DE TECHO VERDE EN EL EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN DE LA
UIS**

**ANDREA CAROLINA MORALES SANTIAGO.
YULIETH MARCELA UZCÁTEGUI MOJICA.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

**DISEÑO Y FACTIBILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICA DE UNA PROPUESTA
DE TECHO VERDE EN EL EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN DE LA
UIS**

**ANDREA CAROLINA MORALES SANTIAGO.
YULIETH MARCELA UZCÁTEGUI MOJICA.**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera civil

**DIRECTOR
Álvaro Viviescas Jaimes
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. METODOLOGÍA	19
1.1 REVISIÓN LITERARIA.....	19
1.2 ESTADO ACTUAL DE LA EDIFICACIÓN	20
1.2.1 Caracterización arquitectónica.....	20
1.2.2 Caracterización estructural	20
1.2.3 Caracterización eléctrica.....	21
1.2.4 Caracterización climática y medioambiental	22
1.3 SELECCIÓN TIPO DE TECHO VERDE A IMPLEMENTAR	23
1.4 DISEÑO DEL TECHO VERDE Y PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS.....	23
1.4.1 Selección de las capas y materiales	24
1.4.1.1 Cobertura Vegetal.....	24
1.4.1.2 Sustrato.....	25
1.4.1.3 Filtro	25
1.4.1.4 Capa de Drenaje.....	26
1.4.1.5 Impermeabilizante y Barrera Anti-Raíces.....	26
1.4.1.6 Elementos Auxiliares.....	27
1.4.2 Opciones de diseño	27
1.5 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS PROPUESTAS.....	27
1.6 FACTIBILIDAD TÉCNICA	28
1.7 SELECCIÓN DE LA PROPUESTA FINAL Y DETALLES CONSTRUCTIVOS.	28
1.8 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA	29
2. RESULTADOS.....	30

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1.1. Eficiencia Energética	36
2.2 ESTADO ACTUAL DE LA EDIFICACIÓN	38
2.2.1 Caracterización Arquitectónica	38
2.2.2 Caracterización Estructural	40
2.2.3 Caracterización eléctrica.....	46
2.2.4 Caracterización climática y medioambiental	54
2.3 SELECCIÓN TIPO DE TECHO VERDE A IMPLEMENTAR	57
2.4 DISEÑO DEL TECHO VERDE Y PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS.....	61
2.4.1 Selección de capas	61
2.4.1.1 Cobertura Vegetal.....	61
2.4.1.2 Sustrato.....	63
2.4.1.3 Filtro	64
2.4.1.4 Drenaje	64
2.4.1.5 Impermeabilizante y Barrera Anti-Raíces.....	66
2.4.1.6 Elementos Auxiliares.....	68
2.4.2 Opciones de diseño	69
2.5 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS PROPUESTAS.....	73
2.6 FACTIBILIDAD TÉCNICA	75
2.7 SELECCIÓN DE LA PROPUESTA FINAL Y RECOMENDACIONES.....	80
2.7.1 Seguimiento	81
2.7.2 Mantenimiento	82
2.7.3 Proveedores.....	82
2.8 FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	83
2.8.1 Impactos del proyecto.....	84
2.8.2 Costos.....	85
2.8.3 Ahorros considerados	90
2.8.4 Evaluación Económica.....	91
3. CONCLUSIONES	102
4. RECOMENDACIONES.....	104

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 105

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Capas de un techo verde.....	31
Figura 2. Comparación de una cubierta sin vegetación (a) y una cubierta vegetal (b).....	37
Figura 3. Ubicación del edificio ABP en el campus universitario.....	39
Figura 4. Registro fotográfica de la cubierta del edificio ABP (I).....	39
Figura 5. Registro fotográfico de la cubierta del edificio ABP (II).....	40
Figura 6. Registro fotográfico de la cubierta del edificio ABP (III).....	40
Figura 7. Registro fotográfico de grietas en el cerramiento de los voladizos de la fachada.....	42
Figura 8. Deflexiones de los voladizos externos del edificio ABP ante cargas de servicio, vista en 3D (I).....	43
Figura 9. Deflexiones de los voladizos externos del edificio ABP ante cargas de servicio, vista en 3D (II).....	43
Figura 10. Deflexiones de los voladizos internos, vista en planta (I).....	44
Figura 11. Deflexiones de los voladizos internos, vista en planta (II).....	44
Figura 12. Deflexiones de los voladizos internos, vista en planta (III).....	45
Figura 13. Áreas donde la estructura puede llegar a resistir peso adicional.....	45
Figura 14. Zonas climatizadas por aires acondicionados en el segundo piso. .	46
Figura 15. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 1).....	47
Figura 16. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 2).....	48
Figura 17. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 3).....	49
Figura 18. Unidad acondicionadora Minisplit tipo cassette.....	50
Figura 19. Unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-05.....	51
Figura 20. Unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-06.....	52
Figura 21. Área de trabajo de la zona izquierda de la cubierta.....	69
Figura 22. Área de trabajo de la zona central.....	70
Figura 23. Área total de trabajo.....	71
Figura 24. Capas del diseño de techo verde propuesto.....	71
Figura 25. Propuesta de Diseño No. 1.....	72
Figura 26. Propuesta de Diseño No. 2.....	72
Figura 27. Propuesta de Diseño No. 3.....	73
Figura 28. Propuesta de Diseño No. 4.....	73
Figura 29. Espesores de las capas del diseño de techo verde final.	81

Figura 30. Proyecto techo verde Hospital Internacional de Colombia.....	83
Figura 31. VPN Vs. TIO	100

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Valores de carga muerta en estado de saturación de acuerdo primaria del techo verde	32
Tabla 2. Características de techo verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos.....	34
Tabla 3. Especificaciones de materiales y consideraciones de diseño del edificio ABP.....	41
Tabla 4. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 1).....	47
Tabla 5. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 2).....	48
Tabla 6. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 3).....	49
Tabla 7. Placa de información Minisplit tipo cassette.....	50
Tabla 8. Consumo anual Minisplit tipo cassette	51
Tabla 9. Placa de información unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-05.....	51
Tabla 10. Consumo anual unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-05.....	52
Tabla 11. Placa de información unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-06.....	53
Tabla 12. Consumo anual unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-06.....	53
Tabla 13. Gasto anual de los aires acondicionados del segundo piso del ABP.	54
Tabla 14. Duración de exposición solar	54
Tabla 15. Precipitaciones mensuales	55
Tabla 16. Cantidad de eventos de lluvia al año	55
Tabla 17. Temperatura máxima mensual	56
Tabla 18. Temperatura media mensual	56

Tabla 19. Temperatura mínima mensual	56
Tabla 20. Análisis cualitativo para la clasificación primaria de la cubierta	58
Tabla 21. Clasificación secundaria para un techo autorregulado.....	59
Tabla 22. Análisis cualitativo para la clasificación primaria de los sistemas de techo verde	60
Tabla 23. Capacidad mínima de drenaje.	65
Tabla 24. Peso saturado de un techo con vegetación tipo pasto.....	74
Tabla 25. Peso saturado de un techo verde con vegetación tipo Sedum	74
Tabla 26. Rangos de calificación de la matriz de evaluación de factibilidad técnica	76
Tabla 27. Análisis cualitativo y cuantitativo de los requisitos técnicos para cada propuesta de diseño	77
Tabla 28. Impactos cuantificables en la implementación de un techo verde	85
Tabla 29. Costo impermeabilización	87
Tabla 30. Costo capa protectora.....	87
Tabla 31. Costo lamina de drenaje	87
Tabla 32. Costo filtro.....	88
Tabla 33. Costo capa de drenaje.....	88
Tabla 34. Costo medio de crecimiento.....	88
Tabla 35. Costo perfiles perimetrales	88
Tabla 36. Costo escalera	89
Tabla 37. Costo sistema de irrigación.....	89
Tabla 38. Costo total del techo verde	89
Tabla 39. Cotización impermeabilización techo convencional	89
Tabla 40. Consumo por m2 impermeabilización de techo convencional	90
Tabla 41. Costo SikaFill 12 Power.....	90
Tabla 42. Costo total impermeabilización convencional	90
Tabla 43. Ahorro por impermeabilización	91
Tabla 44. Flujo de caja sin techo verde	93
Tabla 45. Flujo de caja con techo verde	95
Tabla 46. Flujo de caja incremental y Flujo de caja incremental acumulado	98
Tabla 47. VPN para diferentes tasas de descuento.....	99

Tabla 48. VPN y TIR del proyecto.....	100
Tabla 49. RCB del proyecto.....	100
Tabla 50. Payback del proyecto.....	101

LISTA DE ANEXOS*

ANEXO A. Planos arquitectónicos del edificio Álvaro Beltrán Pinzón

ANEXO B. Planos estructurales del edificio Álvaro Beltrán Pinzón

ANEXO C. Planos de los sistemas de aire acondicionado del edificio Álvaro Beltrán Pinzón

ANEXO D. Encuestas

ANEXO E. Planos de desagüe de la cubierta del edificio ABP

* Ver documento adjunto en el CD-Rom

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y FACTIBILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICA DE UNA PROPUESTA DE TECHO VERDE EN EL EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN DE LA UIS

AUTORES: ANDREA CAROLINA MORALES SANTIAGO**
YULIETH MARCELA UZCATEGUI MOJICA

PALABRAS CLAVE: Techo Verde, Eficiencia energética, Aires acondicionados, Factibilidad técnica, Factibilidad económica.

DESCRIPCIÓN

Los techos verdes representan una alternativa efectiva para reducir el consumo eléctrico en las edificaciones, ayudan a la mitigación del efecto de isla de calor en las ciudades y al restablecimiento del confort térmico en los espacios. Este documento presenta los resultados del estudio de factibilidad técnico-económica para la implementación de un techo verde en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), enfocado en el ahorro de energía por el uso de aires acondicionados. Se llevó a cabo una revisión de literatura en donde se estudiaron las características de los techos verdes y requerimientos mínimos para su instalación. Conociendo las características del edificio y la zona se seleccionó el tipo de techo verde que se ajustara mejor de acuerdo a las recomendaciones de la literatura estudiada. La factibilidad técnica tuvo en cuenta los requisitos mínimos, capacidad estructural y conociendo el consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado de la edificación se pudo evaluar la factibilidad económica. Se concluyó que la mejor alternativa sería instalar un techo verde extensivo, autorregulado con diferentes especies de pastos, se especificaron los detalles constructivos del techo verde como materiales, ubicación, distribución y mantenimiento. Económicamente se concluyó que la construcción del techo verde sería factible con una recuperación de la inversión inicial a un plazo de nueve años y un mes. Este documento ofrece información sobre los aspectos a tener en cuenta en la planeación de un techo verde para una edificación ya existente.

**Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ingeniero Civil.

ABSTRACT

TÍTULO: DESIGN AND TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY OF A ALVARO BELTRAN BUILDING`S PROPOSAL AT UIS

AUTHORS: ANDREA CAROLINA MORALES SANTIAGO**
YULIETH MARCELA UZCATEGUI MOJICA

KEY WORDS: Green roof, Energy efficiency, Air conditioning, Technical feasibility, Economic feasibility.

DESCRIPTION

Green roofs represent an effective alternative for reduce electrical consumption in buildings, help to mitigate heat island effect in cities and to restore thermal comfort in spaces. This document presents the technical-economic feasibility results for the implementation of a green roof in the Álvaro Beltrán Pinzón building of the Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), focused on saving energy by the use of air conditioners. A literature review was carried out, in which the characteristics of green ceilings and minimum requirements for their installation were studied. Knowing building characteristics and the area, it was selected the type of green roof that would fit better according to the recommendations of the literature studied. The technical feasibility took into account the minimum requirements, structural capacity and knowing the electric consumption of the building air conditioning systems could be assessed the economic feasibility. It was concluded that the best alternative would be install an extensive green roof, self-regulated with different pasture species, the construction details of the green roof as materials, location, distribution and maintenance were specified. Economically it was concluded that the green roof construction would be feasible with a recovery of the initial investment to a term of nine years and a month. This document provides information on the aspects to be taken into account in the green roof planning for an existing building.

*Bachelor Thesis

** Facultad de ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director Álvaro Viviescas Jaimes, Ingeniero Civil.

INTRODUCCIÓN

Cerca de la mitad de la población del mundo vive actualmente en ciudades, y se espera que esta cantidad aumente al 61% para el 2030 [1]. El crecimiento acelerado de las urbes del mundo ha sido paralelo a la transformación del entorno natural “camino, estacionamientos y edificios reemplazan el sustrato natural con superficies impermeables alterando los ciclos del agua y del aire” [2]. El efecto de isla de calor, pérdida de biodiversidad, despilfarro energético, contaminación atmosférica y emisión de gases de efecto invernadero son algunas de las consecuencias más dramáticas.

Desde la perspectiva energética, las ciudades representan entre el 60 y 80% del consumo de energía en el mundo y son responsables de hasta el 75% de las emisiones de carbono [1]. Las edificaciones, concebidas como el lugar donde los seres humanos desarrollan sus diferentes actividades en condiciones de confort, representan un alto porcentaje de la demanda energética en la ciudad y son generadoras de cantidades importantes de CO_2 [3], debido en gran medida, al uso de sistemas de refrigeración y calefacción como solución inmediata a los requerimientos de confort térmico del ser humano [4].

La construcción de edificaciones verdes es uno de los intentos más importantes para disminuir los impactos ambientales de los entornos construidos [5]. Una medida eficiente para contrarrestar las islas de calor y, a su vez, el consumo energético por uso de aires acondicionados, es la aplicación de vegetación en la envolvente del edificio [6].

En particular, los techos verdes son una alternativa energética sostenible, que gracias a su efecto aislante sobre la cubierta, reducen las ganancias de calor

por radiación solar en una edificación [7]. Su efectividad queda demostrada en diversos estudios donde se ha concluido que su implementación puede generar una disminución de la temperatura del edificio, entre 2 a 6°C en la noche y de 6 a 8°C en el día y si se implementaran a nivel general podrían significar, incluso, una disminución de temperatura en toda la ciudad [8], representando ahorros energéticos considerables [9].

En dicho contexto, la Universidad Industrial de Santander (UIS) se encuentra localizada en un entorno urbano en el cual se presentan temperaturas media de 23 C° [10] y en donde las cubiertas de las edificaciones pueden alcanzar temperaturas elevadas.

En el presente proyecto se pretende evaluar la factibilidad de construir un techo verde en una edificación existente, el edificio Álvaro Beltrán Pinzón (ABP) de la UIS, en donde se encuentran salones, oficinas y laboratorios que utilizan sistemas de aires acondicionados industriales que representan un gasto energético significativo debido a la demanda de los usuarios que a diario frecuentan el edificio y a la maquinaria de los laboratorios que requieren refrigeración continua.

Con el fin de optimizar recursos tanto energéticos como financieros de la UIS y siguiendo la política ambiental de la universidad, propuesta en los principios del sistema de gestión integrado [11], se diseñará una propuesta de techo verde que se ajuste a las condiciones de la edificación, evaluando la factibilidad técnica y económica de su implementación.

1. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo utilizada para dar alcance a los objetivos propuestos en este documento, se desarrolló en las etapas que se describen a continuación.

1. Revisión literaria.
2. Caracterización del estado actual de la edificación.
3. Selección del tipo de techo verde a implementar.
4. Diseño del techo verde y presentación de propuestas.
5. Evaluación estructural de las propuestas de diseño.
6. Factibilidad técnica de las propuestas,
7. Selección de la propuesta final y recomendaciones.
8. Evaluación de la factibilidad económica.

1.1 REVISIÓN LITERARIA

Se realizó una búsqueda de información enfocada en metodologías para la aplicación de techos verdes en estructuras ya existentes y en el efecto de la implementación de estos en la temperatura del edificio y su consumo energético.

Como principales fuentes de la revisión bibliográfica se utilizaron las bases de datos de la biblioteca de la UIS, aquellas que específicamente se enfocaban en temas de ingeniería civil como ASCE (The American Society of Civil Engineers) e ICE (Institution of Civil Engineers). Los criterios de búsqueda fueron: Techo verde, Green roof, cubiertas verdes, consumo energético, aires acondicionados, edificaciones verdes y eficiencia energética.

Para seleccionar los documentos relevantes para el proyecto se buscó identificar en ellos: Características de los techos verdes y antecedentes internacionales y nacionales; para saber cómo proceder con el estudio de factibilidad técnica y económica se buscaron guías sobre detalles técnicos de su implementación y artículos que abordan estudios sobre la influencia de los techos verdes en la temperatura de las edificaciones, su relación con el consumo energético por el uso de aires acondicionados, comparación de un techo verde con un techo convencional y la relación costo-efectividad.

1.2 ESTADO ACTUAL DE LA EDIFICACIÓN

El análisis de la edificación actual buscó conocer las condiciones a las que deberá ceñirse el diseño de la cubierta vegetal según las características arquitectónicas, estructurales, eléctricas, climáticas y medio ambientales de la edificación.

1.2.1 Caracterización arquitectónica. Se buscó identificar las áreas disponibles para la construcción de una cubierta verde en el edificio ABP a partir los planos arquitectónicos provistos por planta física de la UIS (**ANEXO A**). Se detectaron las áreas ocupadas por maquinarias como los sistemas de aire acondicionado, equipos de seguridad en alturas y tuberías o cables a la vista, realizando las respectivas mediciones y mapeo en planos. Se prestó especial atención a la accesibilidad de la cubierta.

1.2.2 Caracterización estructural. El objetivo principal de la evaluación es determinar la confiabilidad estructural de la edificación actual y establecer si cumple con los requerimientos mínimos para la implementación de una cubierta verde, ya que esto implica nuevas cargas al sistema.

Se determinó el estado actual del edificio recabando toda la información concerniente a características generales de la estructura, tipo de sistema estructural, uso del edificio, características de los materiales empleados, norma de diseño vigente durante la concepción, capacidad estructural, daños y anomalías existentes.

El levantamiento geométrico de la estructura, los materiales que la conforman y las especificaciones de los mismos fueron tomados de los planos estructurales suministrados por la oficina de planta física de la UIS (**ANEXO B**). El análisis de la capacidad de soporte de la estructura y los daños asociados a esta, se obtuvieron de estudios vigentes realizados anteriormente en la edificación [12].

1.2.3 Caracterización eléctrica. Con el fin de cuantificar el ahorro energético que un techo verde puede proporcionar al edificio ABP, se debe conocer el consumo de energía actual destinado a la climatización de la edificación, así como los costos que esto representa.

La estimación del consumo eléctrico en kWh requirió la identificación de los sistemas de aires acondicionados instalados en las diferentes zonas del edificio y la recopilación de las características eléctricas de cada uno. Las horas de trabajo de los diferentes aires acondicionados se calcularon a partir de encuestas e información obtenida sobre el uso del edificio en la escuela de ingeniería civil de la UIS. División de mantenimiento y planta física de la universidad proporcionaron los planos eléctricos del edificio y recibos de luz, respectivamente (**ANEXO C**).

1.2.4 Caracterización climática y medioambiental. Las condiciones climáticas y medioambientales pueden impactar de manera positiva o negativa el proyecto. Estas influyen directamente en la elección de los diferentes elementos del techo verde. Un ejemplo, son los periodos de lluvia y de sequía que definen la especie de vegetación a implementar, así como el plan de manejo de aguas lluvias de la cubierta y el tipo de mantenimiento.

En Colombia la entidad encargada de realizar estudios sobre los recursos naturales y del medio ambiente es el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales). Se procuró buscar información sobre los factores relevantes tomando en consideración que los datos obtenidos fueran multianuales de al menos 10 años.

Específicamente se buscó información sobre la ciudad de Bucaramanga y los factores a tener en cuenta puntualmente fueron:

- Intensidad y duración de exposición solar.
- Precipitación anual y mensual.
- Intensidad de lluvia.
- Cantidad de eventos de lluvia al año.
- Temperatura promedio del aire mínima y máxima.
- Humedad relativa.
- Velocidad del viento.

Los datos encontrados fueron organizados y analizados para caracterizar la zona de trabajo.

1.3 SELECCIÓN TIPO DE TECHO VERDE A IMPLEMENTAR

El tipo de techo verde a implementar viene condicionado por múltiples factores que abarcan desde el propósito del proyecto hasta las características de la estructura.

Los techos verdes se clasifican en extensivos, semi- intensivos e intensivos [13], [14], [15]. Para hacer dicha clasificación hay que tener en cuenta espesores de sustrato, tipo de vegetación y pesos que no se conocen en la fase inicial del proyecto. Por lo tanto, y siguiendo lo recomendado por [16] se puede hacer una clasificación más detallada y adecuada que permita tener una idea primaria de lo que se quiere implementar. Por lo tanto se tuvo en cuenta, en primera medida, los siguientes parámetros de clasificación:

- Clasificación primaria: Propósito y uso del techo verde.
- Clasificación secundaria: Robustez del sistema en función del porte y requerimientos de la vegetación empleada.
- Tipo de sistema de techo verde según la tecnología empleada.

Finalmente se tipificó el techo verde entre extensivo, semi-intensivo e intensivo.

1.4 DISEÑO DEL TECHO VERDE Y PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS

Con base en el estudio preliminar que se realizó del edificio y el propósito del proyecto, se seleccionaron las capas y las propiedades de los elementos que conforman el sistema de techo verde y se diseñaron diferentes propuestas con el fin de encontrar un diseño de techo verde conforme las características y limitaciones de la edificación.

1.4.1 Selección de las capas y materiales. Para la selección de la estructura de las capas se tuvieron en cuenta guías y libros especializados en cubiertas vegetales, donde se dan opciones que se han implementado en otros proyectos de techos verdes [13], [14], [17]. Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, la selección de los productos tuvo en cuenta los requisitos mínimos en una cubierta vegetal según normativas técnicas internacionales, descritos en [16] y [18]. En adición, se buscó asesoría con la empresa especialista en techos verdes en Bucaramanga, Casa Ambiente SAS, quienes ayudaron a concretar el planteamiento con proveedores locales, precios e indicaron detalles que no se tomaron en consideración en el momento de hacer la revisión bibliográfica, como tipo de sistema de irrigación, capas adicionales en caso de condiciones deficientes de pendiente y costo en el plan de seguimiento.

1.4.1.1 Cobertura Vegetal. La selección de la cobertura vegetal se basó en factores como la accesibilidad a la cubierta, el propósito del techo verde, las limitantes estructurales y los factores climatológicos [13], [18].

Se consultaron géneros vegetales que se ajustaban mejor al tipo de techo verde que se quería implementar y se buscó asesoramiento para saber qué tipos de especies, pertenecientes a los géneros consultados, se ajustaban mejor a las características del proyecto. Adicionalmente se consultó sobre especies endémicas de Bucaramanga o especies que no se recomendaban en la bibliografía pero que podrían funcionar en el proyecto teniendo en cuenta los requerimientos del techo verde.

Para conocer si las especies que se proponían utilizar en el proyecto se comercializan en la ciudad, se visitaron viveros.

1.4.1.2 Sustrato. Para el sustrato, se buscó un producto que proporcionara el equilibrio físico, químico y los nutrientes requeridos para mantener la cobertura vegetal viva y sana [16]. El grosor del sustrato y sus componentes vendrían determinados por la vegetación y el tipo de techo verde a implementar. El proveedor debía garantizar una óptima distribución granulométrica de las partículas que lo conformarían de manera que se logrará un flujo y almacenamiento de agua, aire e intercambio de gases óptimo. Además, de dar a conocer el peso del sustrato en estado saturado.

No se enfocó la búsqueda del sustrato en que cumpliera los estándares internacionales German Landscape Research, Development and Construction Society (FLL), de Alemania, pues las condiciones de la localidad del proyecto son diferentes a las establecidas en la normativa [18]. Pero si se le dio especial atención a la composición del sustrato, donde se garantizara un correcto porcentaje de material mineral y orgánico que fuese ligero para que no sobrecargara la estructura y que la mezcla del sustrato hubiese probado su buen resultado en otros proyectos ejecutados con anterioridad.

1.4.1.3 Filtro. El medio filtrante debe garantizar la retención de partículas finas y permitir el paso del agua. Para su selección se buscó que preferiblemente filtrara partículas de menos de 2 mm de diámetro [16], fuese liviano y a prueba de putrefacción [19]. Adicionalmente, se procuró que el producto hubiese sido pensado especialmente para proyectos de techos verdes y que hubiese sido utilizado con anterioridad en más proyectos. Al proveedor se le solicitó información del peso del material, resistencia a la tracción y penetración.

1.4.1.4 Capa de Drenaje. De la capa de drenaje a implementar se buscó que permitiera el flujo del agua producto de precipitación pero, que al mismo tiempo, almacenara parte de ella para el uso de la vegetación. Además, se procuró que condujera el agua de forma efectiva hacia los elementos de evacuación. Del producto se buscó que cumpliera una tasa de drenaje mínima y altura efectiva [16].

Para conocer la capacidad de drenaje mínima que debía tener el producto se utilizaron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la ciudad de Bucaramanga y el área de la cubierta donde se localizaría el medio drenante.

Se solicitó al proveedor que el material del producto no fuese degradable [19] y que se diera a conocer el peso del producto en estado saturado. Se buscó que, preferiblemente, hubiese sido diseñado para proyectos similares y hubiese sido utilizado en otros proyectos de cubiertas vegetales.

1.4.1.5 Impermeabilizante y Barrera Anti-Raíces. La impermeabilización de la cubierta es un punto crítico en el proyecto, por eso se requirió un producto que tuviera garantía de funcionamiento y que el proveedor brindara los profesionales competentes para su correcta instalación. El producto tenía que garantizar protección contra agentes físicos y químicos, protección mecánica, preferiblemente que tuviera certificación contra los rayos UV y se evitaron los productos con componentes que atrajeran las raíces de la vegetación. Se tuvo preferencia por productos pensados especialmente para techos verdes y que hubiesen sido utilizados en otros proyectos.

1.4.1.6 Elementos Auxiliares. Una vez conocida la estructuración de la cubierta vegetal y su distribución en el área de la cubierta, se identificaron los elementos auxiliares a emplear para garantizar el completo funcionamiento del proyecto. De los productos se buscó que cumplieran su función de manera adecuada, generándole el menor peso a la estructura y el menor costo al diseño.

1.4.2 Opciones de diseño. En esta etapa se definió la estructuración de las capas del techo verde, su orden y de qué manera se deberían disponer para lograr una estructura funcional.

Se diseñaron diferentes propuestas de techo verde, haciendo variaciones en las especies vegetales a implementar, el sustrato y la ubicación y distribución del mismo en el espacio disponible. Se obtuvo como resultado diferentes condiciones de cargas adicionales para la estructura.

1.5 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS PROPUESTAS

La evaluación estructural de las opciones de diseño propuestas consideró las cargas adicionales que recibiría la cubierta una vez ejecutado el proyecto.

Las cargas generadas por los materiales de las capas del techo verde son cargas permanentes, por lo tanto, serían cargas muertas en el modelo. Como cargas vivas se consideró el agua proveniente de precipitaciones, dichas cantidades de agua deben adicionarse al análisis de carga pues debido a la cubierta vegetal tardará más en ser evacuada y parte de ella se retendrá para el uso de la cobertura vegetal.

Mediante el modelo del edificio en el programa ETABS, tomado de [12] y ajustado para el presente proyecto, se analizó la estructura con las cargas adicionales y sus deformaciones. De esta manera se determinó si estructuralmente era factible implementar cada una de las propuestas de diseño.

1.6 FACTIBILIDAD TÉCNICA

Se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de los requisitos técnicos mínimos dados por [16] de cada una de las propuestas de diseño, para determinar si eran factibles técnicamente y en qué porcentaje lo eran. De cada propuesta se calificó si cumplía o no el criterio de evaluación.

1.7 SELECCIÓN DE LA PROPUESTA FINAL Y DETALLES CONSTRUCTIVOS

La selección de la propuesta final se basó principalmente en la evaluación estructural, el porcentaje de factibilidad técnica y la manera en que la propuesta cumplía con el propósito del proyecto.

Una vez seleccionado el diseño final se procedió a especificar los detalles técnicos que se debían tener en cuenta para que el proceso constructivo se diera de forma adecuada (altura del nivel de instalación, rutas de acceso a la cubierta, requerimientos de seguridad y equipo requerido). Adicionalmente, se hicieron recomendaciones en cuanto al seguimiento y mantenimiento del techo verde.

1.8 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Inicialmente, se realizó el cálculo de cantidades por metro cuadrado de cada uno de los materiales que conforman el techo vivo a partir de la información suministrada por proveedores.

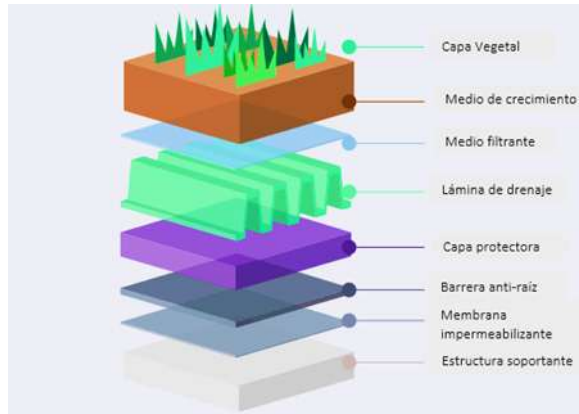
Se evaluó la inversión que tendría que hacer la universidad para ejecutar el proyecto en el edificio (Precio de los materiales, transporte, instalación, mano de obra, seguimiento y mantenimiento) y se analizó en contraste con el ahorro que significaría su implementación. Se evaluó el tiempo que tardaría la universidad en recuperar la inversión y si el ahorro de energía por consumo de aires acondicionados sería lo suficientemente significativa como para considerar el proyecto factible económicamente con base en indicadores económicos.

2. RESULTADOS

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los techos verdes se definen como sistemas constructivos sostenibles formados por una serie de capas que mantienen un paisaje vegetal sobre la cubierta de una edificación [14], [16]. Las capas están conformadas por vegetación, medio de crecimiento, capa de drenaje, filtro, membrana impermeabilizante, barrera anti-raíces, membrana protectora y capa aislante (opcional) [14], [16], [17], [19], [20] (Figura 1). La vegetación es un componente activo del techo verde y está formado por un conjunto de especies vegetales que se seleccionan dependiendo de factores como tipo de techo verde y propósito, clima y biota local de la zona donde se encuentra el inmueble [14], [16]. El medio de crecimiento o sustrato es la capa de enraizamiento para las plantas y está compuesto por materia orgánica e inorgánica [17], [19] y trata de emular las condiciones básicas para satisfacer las necesidades de la vegetación [16]. La capa de drenaje es aquella que asegura que las grandes cantidades de agua producto de escorrentía fluyan a los sistemas de drenaje de la edificación y, en algunos casos, sirve para retener humedad en períodos de sequía [14], [17], [19], [20]. El filtro permite el flujo de agua mientras mantiene el medio de crecimiento en su lugar, evitando que las partículas finas bloqueen las tuberías del desagüe [14], [17], [19], [20]. La membrana impermeabilizante es el sistema que resiste la presión hidrostática y provee protección contra el ingreso de agua a la edificación [17]. La barrera anti-raíces es una defensa física o química que protege a la membrana impermeabilizante de raíces invasivas [14], [19]. La membrana protectora tiene como función preservar la nueva membrana impermeabilizante durante la instalación del techo verde de otros elementos del inmueble y de la cobertura vegetal [14], [16], [19]. La capa aislante es un componente usado para reducir la transferencia de temperatura y, dependiendo del país y el código de construcción, su uso es opcional [19], [20].

Figura 1. Capas de un techo verde



Fuente. Growing Green Guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia.

La tipología del techo verde puede estar definida por diferentes clasificaciones:

Clasificación primaria: Según el propósito y el uso que se le va a dar a los techos verdes estos se pueden clasificar en Autorregulados, Ajardinados, Ecológicos y Huerta. Los Autorregulados requieren un mínimo de materiales, inversión y carga estructural para garantizar las prestaciones básicas (Disminución del volumen de escorrentía, aislamiento térmico y acústico, atenuación del caudal de evacuación). Los ajardinados o naturalizados tienen como propósito servir de espacio de recreación o contemplación, siendo transitable para los usuarios, al tiempo de brindar las prestaciones básicas. Los ecológicos tienen como propósito principal replicar y mantener sobre la cubierta un paisaje biotopo altamente especializado para constituirse en hábitat para la fauna y flora local. Por último los tipos Huerta tienen como propósito principal la producción agrícola [16], [21].

Clasificación secundaria: Hace referencia al peso total del Techo verde en estado saturado. Se pueden clasificar en Liviano, Moderado y Robusto. En la **Tabla 1** se muestran los valores de carga muerta en estado saturado de acuerdo a la clasificación del techo vivo.

Tabla 1. Valores de carga muerta en estado de saturación de acuerdo primaria del techo verde

VALORES DE CARGA MUERTA EN ESTADO DE SATURACION DE ACUERDO A LA CLASIFICACION DEL TECHO VIVO			
CLASIFICACION PRIMARIA	CLASIFICACION SECUNDARIA		
	Liviano	Moderado	Robusto
Autorregulado	hasta 80 kg/m ²	más de 80 y hasta 120 kg/m ²	más de 120 y hasta 150 kg/m ²
Ajardinado	hasta 150 kg/m ²	más de 150 y hasta 200 kg/m ²	más de 250 kg/m ³
Ecológico	hasta 200 kg/m ²	más de 200 y hasta 300 kg/m ²	más de 300 y hasta 450 kg/m ⁴
Huerta	hasta 150 kg/m ²	más de 150 y hasta 250 kg/m ²	más de 250 y hasta 350 kg/m ⁵

Fuente. Guía de techos verdes Bogotá

Tipo de sistema de techo verde según la tecnología empleada: Existe gran diversidad de sistemas para techos verdes, su selección depende de su disponibilidad comercial y del proveedor. Los más conocidos son los sistemas tipo multicapa monolítico, tipo multicapa elevados, tipo receptáculo y tipo monocapa. Los tipo multicapa monolíticos o sistema de instalación in situ se apoyan directamente sobre el techo impermeabilizado, requiriendo la instalación por separado de cada uno de sus componentes especializados [19]. El resultado es un techo verde con continuidad horizontal con comportamiento monolítico. Los tipo multicapa elevados se apoyan en pedestales, en donde se localizan múltiples capas especializadas, creando un espacio horizontal continuo entre la estructura soportante y todo el sistema [16]. Los tipo receptáculo están compuesto por módulos fijos al techo impermeabilizado, los cuales contienen el sustrato y la vegetación [18], [19] y pueden lograr las funciones básicas del sistema de manera independiente y en conjunto [16]. Los tipo monocapa son tapetes pre sembrados que reúnen en una sola capa los componentes básicos para el funcionamiento del sistema y se fija al techo impermeabilizado [16].

Extensivo e Intensivo: Los extensivos hacen referencia a la plantación que crece naturalmente con espesores de sustrato de 3 hasta 15 cm sin mantenimiento o con un régimen mínimo. Implican una carga adicional de máximo $1,6 \text{ kN/m}^2$ para la edificación [13], [15], [16]. Su vegetación consta principalmente de plantas de bajo porte y pocos requerimientos de agua [14], [21]. Los intensivos abarcan sustratos mayores a 30 cm, sus plantas presentan mayor diversidad y requieren mantenimiento regular [14]. Su vegetación consta de plantas vivaces, leñosas y superficies de césped [13]. Su peso saturado es mayor a 2 KN/m^2 , y no se recomienda para techos con pendientes muy elevadas [16]. Existe un intermedio, llamados techos verdes semi-intensivos. (**Tabla 2**).

Tabla 2. Características de techo verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos.

CARACTERISTICAS	EXTENSIVO	SEMI-INTENSIVO	INTENSIVO
Espesor sustrato	Hasta 15 cm	Entre 10 y 20 cm	Mayor que 15 cm
Transitabilidad	No transitable	Parcialmente transitable	Transitable
Peso saturado	Entre 0,5 y 1,7 kN/m^2	Entre 1,5 y 2,5 kN/m^2	Mayor que 2,45 kN/m^2
Diversidad vegetal	Poca	Mayor	Máxima
Mantenimiento	Mínima	Variable	Alto
Vegetación	Rastreras	Arbustos pequeños, pastos ornamentales	Arbustos y árboles pequeños

Fuente. Cámara chilena de la construcción. Recomendaciones técnicas para proyectos de cubiertas vegetales.

La implementación de techos verdes genera beneficios como:

Mejoramiento de la gestión de aguas lluvias: La presión en los sistemas de alcantarillado pluvial se ve reducida, ya que el 70% del agua lluvia es absorbida por el techo verde [22] y el porcentaje restante es filtrada naturalmente y drenada a las redes de desagüe a una menor velocidad. [13], [14], [23], [24]. Cubiertas con sustratos gruesos pueden retener hasta un 90% de aguas lluvia [15].

Incremento de la vida de la impermeabilización: El sustrato y la vegetación sirven como aislante térmico contra los rayos UV y las fluctuaciones de temperatura, protegiendo la impermeabilización y evitando la aparición de fisuras [19], [21]. En una cubierta tradicional, la impermeabilización dura en promedio cinco años [13], [14]. Estudios realizados en Europa han demostrado funcionar por el doble de la vida útil

de un sistema de impermeabilización de un techo convencional [25]. Se han registrado proyectos de treinta años sin intervenciones o reparaciones [15].

Aislamiento térmico: La transferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la edificación se ve reducido por efecto de la cobertura vegetal, dependiendo del grosor de tierra que se implemente. De modo que el exceso de calor se reducirá en verano y en invierno se minimizarán las pérdidas de calor del edificio [13], [15], [21], [24].

Aislamiento acústico: Las ondas producto de actividades urbanas son absorbidas, en parte, por las plantas y el sustrato, mejorando el aislamiento acústico y reduciendo la reflexión de la onda. El sustrato cumple un papel más decisivo en el grado de aislamiento acústico que se logra [13], [15], [19].

Reducción del efecto de isla de calor: Materiales como el concreto y el asfalto, usados en la construcción de cubiertas, absorben el calor recibido de la radiación solar y lo irradian nuevamente a la atmósfera, contribuyendo al aumento de la temperatura en las ciudades. Con la implementación de techos verdes se consigue que el calor proveniente del sol sea utilizado en la evapotranspiración de las plantas y se disminuya la temperatura del aire circundante, mejorando el clima y aumentando la sensación de confort térmico [14], [15], [19], [23].

Mejoramiento de la calidad del aire: La vegetación presente filtra el polvo y las partículas nocivas, presentes en forma de gas y aerosoles [13]. Las plantas con alta densidad de follaje o con superficie de hoja rugosa atrapan con mayor efectividad las partículas, para ser removidas del follaje por

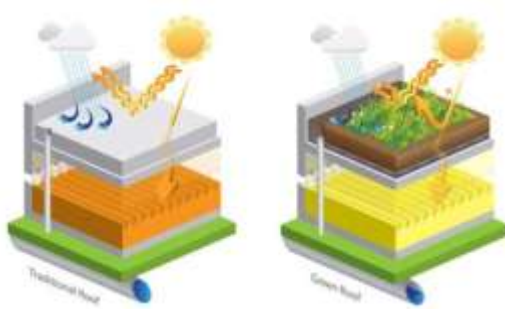
acción de las precipitaciones. Además durante el proceso de fotosíntesis se transforma el dióxido de carbono en oxígeno [14]. 1 m^2 de techo verde construido produce el oxígeno para una persona al año aproximadamente [15].

2.1.1. Eficiencia Energética. Uno de los principales beneficios que se le puede atribuir a los techos verdes es su efecto regulador sobre la temperatura de las superficies de la cubierta y los interiores del edificio [26] El aislamiento proporcionado por una cubierta verde reduce las fluctuaciones de las temperaturas exteriores disminuyendo las necesidades energéticas en calefacción y aire acondicionado requeridas en las temporadas de invierno y verano, respectivamente [13] [27] [28].

En zonas cálidas los techos cubiertos con vegetación reducen considerablemente el recalentamiento de las superficies techadas [13] que pueden superar la temperatura ambiente hasta 50°C [26] influyendo directamente en el calor radiante dentro del recinto y en el consumo energético [29].

Las plantas y el medio de cultivo de la cubierta verde mantienen la membrana de la azotea fresca por el sombreado directo [30]. Por medio de sus funciones biológicas, como la fotosíntesis, la respiración, transpiración y evaporación de agua, las plantas pueden llegar a demandar el 90% de la energía solar consumida [13][31]. De esta forma, la radiación solar y la temperatura externa se reducen a medida que pasan a través del follaje que cubre el techo [31] (**Figura 2**).

Figura 2. Comparación de una cubierta sin vegetación (a) y una cubierta vegetal (b).



Fuente. Green Roof Guide

En Kassel (Alemania) para un techo de pasto con un sustrato de 16 cm de espesor y una temperatura exterior al mediodía de 30°C había bajo la vegetación 23°C y bajo la capa de sustrato solamente 17,5°C [13].

En general, se considera que el impacto de un techo verde sobre el uso de electricidad para enfriamiento es significativo en la planta superior, inmediatamente debajo de la superficie del techo [26]. No obstante, el ahorro de energía específico dependerá de las condiciones climáticas locales[27], [32], de las características de la edificación[27][32][33], del porcentaje de techo que tiene cubierta vegetal[19][27], el tipo de vegetación[27], [28], [32], profundidad del sustrato[19], [28], [32], entre otras variables [27], [28], [32], [33].

Los resultados de modelado realizados para aplicaciones de techos verdes han mostrado ahorros de energía de refrigeración similares, aunque variados, dadas las características del edificio y del tejado verde [26]. La demanda de energía por carga de enfriamiento en un edificio en Melbourne (Australia) bajo un techo experimental de 20 m² y 125 mm de sustrato fue 48% menor en comparación a la carga con un techo de hormigón convencional. Para una sala

de pruebas con paredes más delgadas, la reducción de la carga de refrigeración con el techo verde se estimó en un 56% [34].

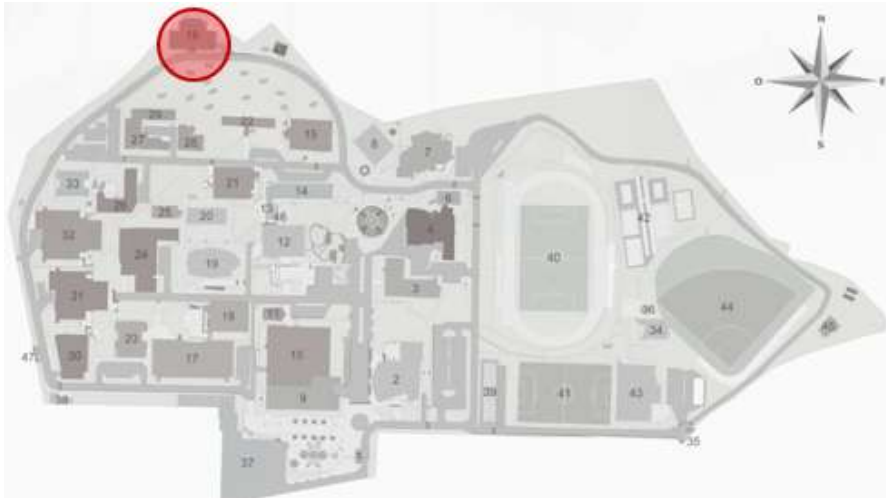
En [35] se estudió el efecto térmico de un techo verde para nueve ciudades con diversos climas. Para una ciudad con condiciones climáticas parecidas a Bucaramanga, [36] concluyó que una cubierta verde reducirá la temperatura de los espacios interiores cercanos a la azotea de 3°C a 5°C durante el día generando un ahorro energético entre el 25% y el 50% por menor uso de sistemas de refrigeración.

Por último, se encontró que los techos verdes pueden proporcionar ahorros de energía adicionales para edificios con sistemas de aire acondicionado en la azotea debido a su capacidad de mantener una temperatura del aire localizada por debajo de la temperatura ambiente, permitiendo que entre aire más frío en el sistema de aire acondicionado aumentando así su eficiencia y reduciendo la energía utilizada para el enfriamiento [26].

2.2 ESTADO ACTUAL DE LA EDIFICACIÓN

2.2.1 Caracterización Arquitectónica. El edificio ABP es una dependencia de la escuela de ingeniería civil de la universidad industrial de Santander, ubicada en el noroccidente del campus universitario (**Figura 3**). Cuenta con un área aproximada de 830,44 m^2 en el primer piso (N+0.00), 865,29 m^2 en el segundo piso (N+4.90) y área de la cubierta (N+8.30) corresponde a 660,83 m^2 .

Figura 3. Ubicación del edificio ABP en el campus universitario



Fuente. Universidad Industrial de Santander.

La azotea es el lugar destinado para la colocación de la cubierta verde. En esta área se encuentran ubicadas las unidades externas de los sistemas de aires acondicionados que ocupan cerca de 66 m^2 del área total de la cubierta. El acceso a la azotea se hace mediante una escalera portátil facilitada por el personal técnico del edificio. En **Figura 4**, **Figura 5** y **Figura 6** se presentan los registros fotográficos del área a intervenir.

Figura 4. Registro fotográfica de la cubierta del edificio ABP (I)



Fuente. Propia

Figura 5. Registro fotográfico de la cubierta del edificio ABP (II)



Fuente. Propia

Figura 6. Registro fotográfico de la cubierta del edificio ABP (III)



Fuente. Propia

2.2.2 Caracterización Estructural. La estructura en análisis fue construida en el año 2006 y consta de 3 niveles con uso en actividades de carácter académico y una azotea. El edificio ABP fue constituido con base en un sistema estructural de pórtico resistente a momentos en concreto reforzado según la norma sismo-resistente NSR-98. Las consideraciones de diseño según lo plasmado en los planos estructurales se especifican en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Especificaciones de materiales y consideraciones de diseño del edificio ABP

Normas colombianas de diseño y construcción	Sismo-resistente NSR-98. Ley 400 de 1997
Concreto:	
Cimientos y muro de contención	$f_c = 21 \text{ Mpa}$ (210 kg/cm ²)
Vigas, columnas y placas	$f_c = 28 \text{ Mpa}$ (280 kg/cm ²)
Acero de refuerzo:	$f_y = 420 \text{ Mpa}$ (4200 Hg/cm ²)
Mortero de pega:	Dosificación por volumen $\geq 1:4$
Unidades de mampostería:	Resistencia a la compresión $> 3 \text{ Mpa}$ (30 kg/cm ²)
	Absorción del 12 al 20% (ladrillo)
	Absorción de 8 al 12% (Bloque de concreto)
Acabados	Resistencia a la compresión $> 1,20 \text{ Mpa}$ (120 kg/cm ²)
Grado de disipación de energía	DES
Carga viva de diseño	250 kg/m ²
Capacidad admisible del suelo	40 Ton/m ² Requerida
Profundidad de cimentación	Hasta encontrar suelo firme según E.D.S

Fuente. Planos estructurales del edificio ABP

Por inspección visual, se detectaron agrietamientos en el cerramiento de los voladizos de la fachada, asociados a cargas verticales (**Figura 7**), y en general, la estructura se encontró en buenas condiciones.

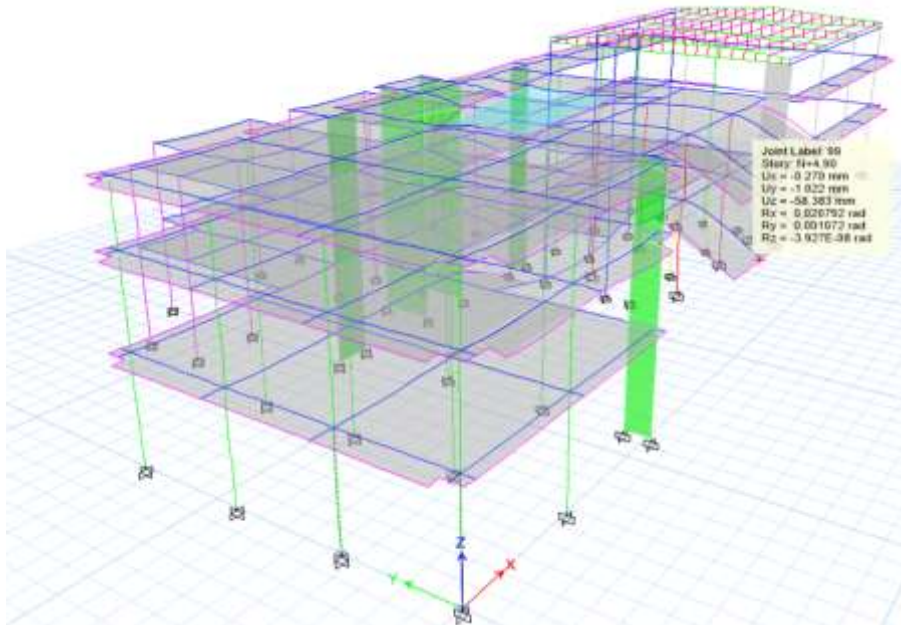
Figura 7. Registro fotográfico de grietas en el cerramiento de los voladizos de la fachada



Fuente. Propia

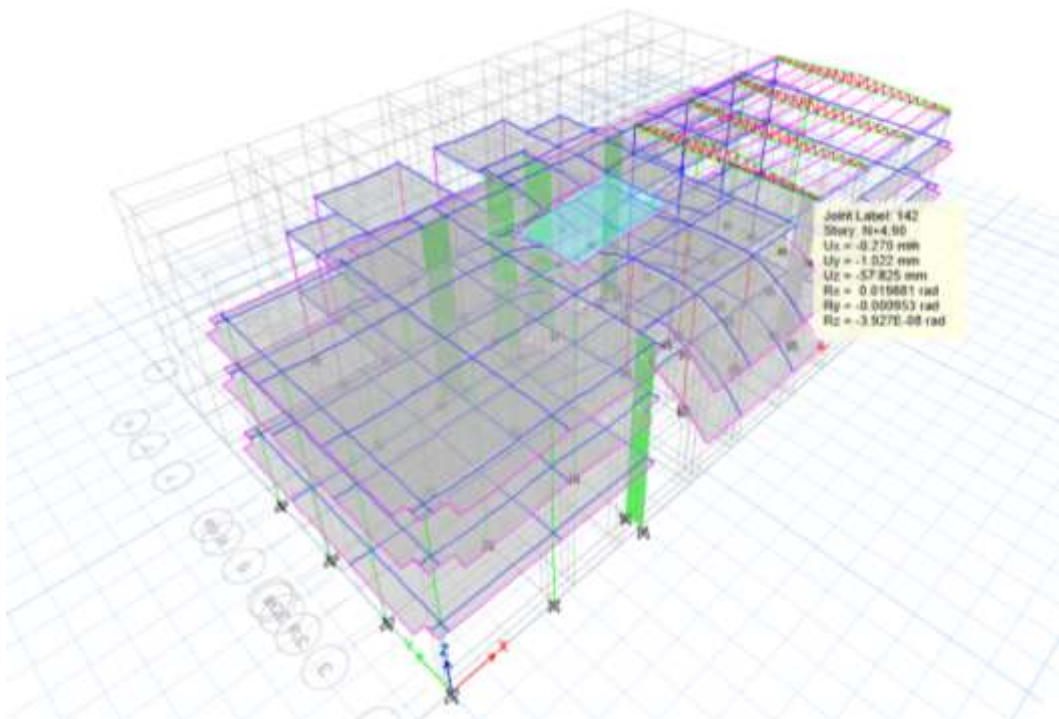
Lo anterior se corroboró en [11], donde se determinaron los daños estructurales presentes en el edificio basado en resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad sísmica, de acuerdo con lo establecido en la NSR-2010. Se estableció que la estructura presenta un buen comportamiento ante cargas gravitacionales, a excepción de los voladizos que presentan grandes deflexiones debido a la carga viva a la que se encuentran sometidos [11] (**Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12**). Se concluye que los voladizos no deberán ser sometidos a nuevas cargas en futuras intervenciones al edificio.

Figura 8. Deflexiones de los voladizos externos del edificio ABP ante cargas de servicio, vista en 3D (I)



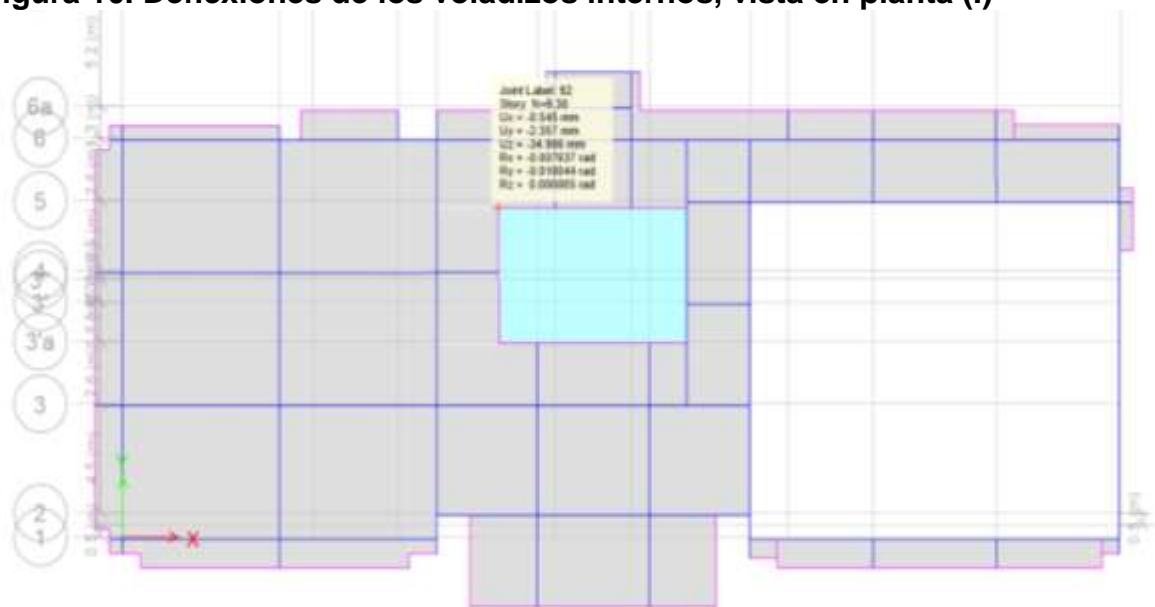
Fuente. Modelo ETABS

Figura 9. Deflexiones de los voladizos externos del edificio ABP ante cargas de servicio, vista en 3D (II)



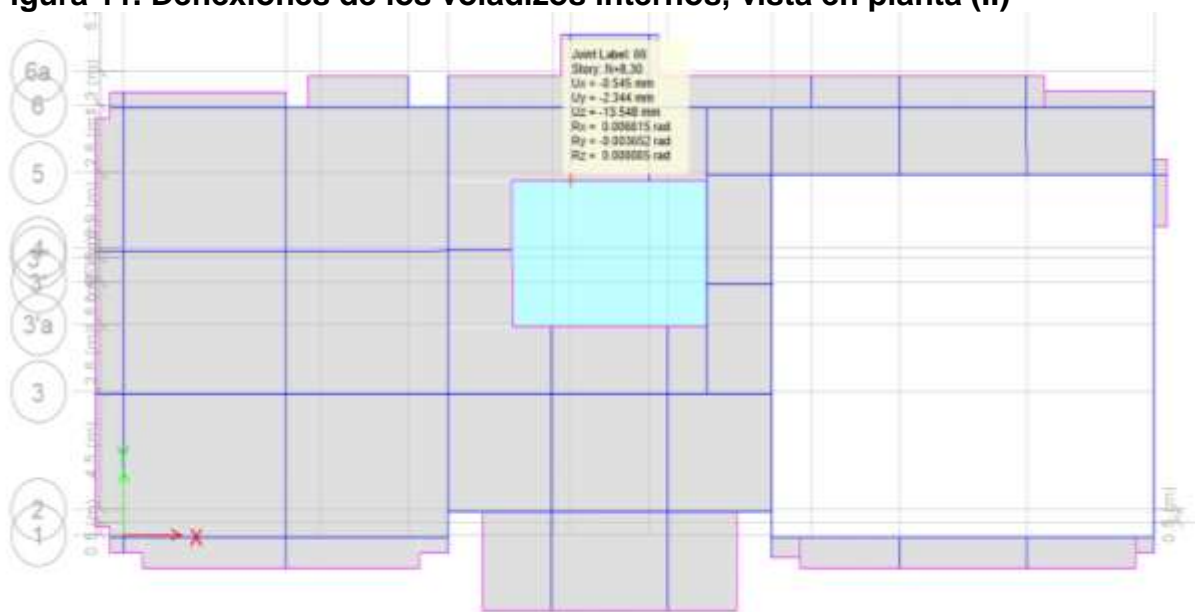
Fuente. Modelo ETABS

Figura 10. Deflexiones de los voladizos internos, vista en planta (I)



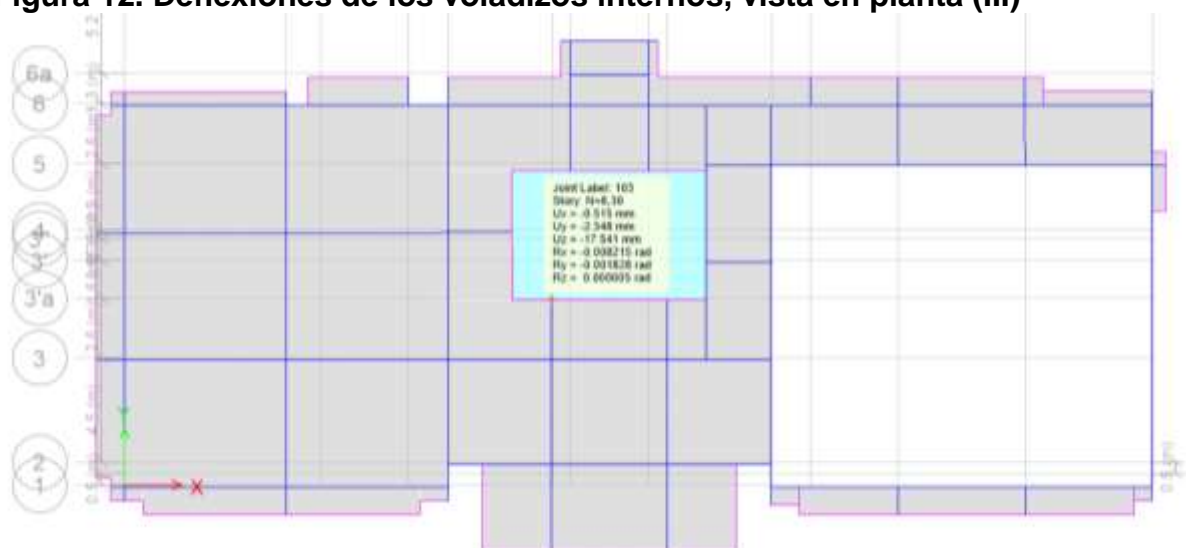
Fuente. Modelo ETABS

Figura 11. Deflexiones de los voladizos internos, vista en planta (II)



Fuente. Modelo ETABS

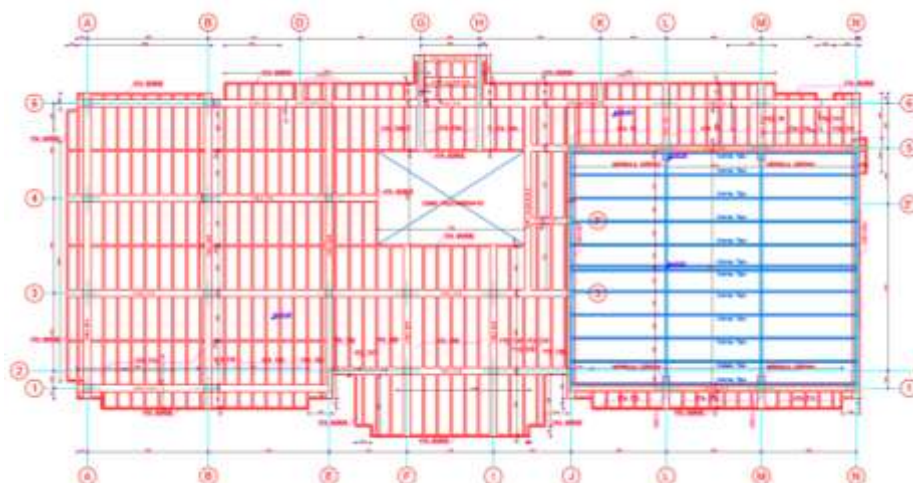
Figura 12. Deflexiones de los voladizos internos, vista en planta (III)



Fuente. Modelo ETABS

Finalmente, con base en los planos estructurales se delimitaron las zonas en donde la construcción del techo verde puede tener un menor impacto a nivel estructural en la edificación (**Figura 13**).

Figura 13. Áreas donde la estructura puede llegar a resistir peso adicional.



Fuente. Planos estructurales

2.2.3 Caracterización eléctrica. Según la información y planos suministrados por la División de mantenimiento de la Universidad, en el edificio ABP se encuentran instalados doce sistemas de aire acondicionado, los cuales según [37] representan cerca del 24% del consumo de la energía total del edificio.

La climatización del piso inmediatamente debajo de la cubierta se realiza a partir de 4 sistemas de aire acondicionado que refrigeran tres zonas correspondientes a las oficinas de profesores, sala de grupos de investigación y sala de juntas, mostradas en la **Figura 14**.

Figura 14. Zonas climatizadas por aires acondicionados en el segundo piso.



Fuente. Propia

Para las zonas 1 y 2 se documentó por medio de un formato, diligenciado por los estudiantes y profesores que frecuentan estas áreas, las horas en las cuales se encontraba en funcionamiento el aire acondicionado, registrado en hora regular durante 3 semanas, iniciando el día 5 de junio de 2017 y finalizando el 25 de junio, para un total de 6 formatos recogidos (**Anexo D**). El

uso de aires acondicionados en la zona 3, se determinó a partir de los horarios suministrados por la escuela de ingeniería civil. Los resultados obtenidos se presentan en **Figura 15, Figura 16, Figura 17** y en **Tabla 4, Tabla 5** y **Tabla 6**.

OFICINAS-ZONA 1

Figura 15. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 1)

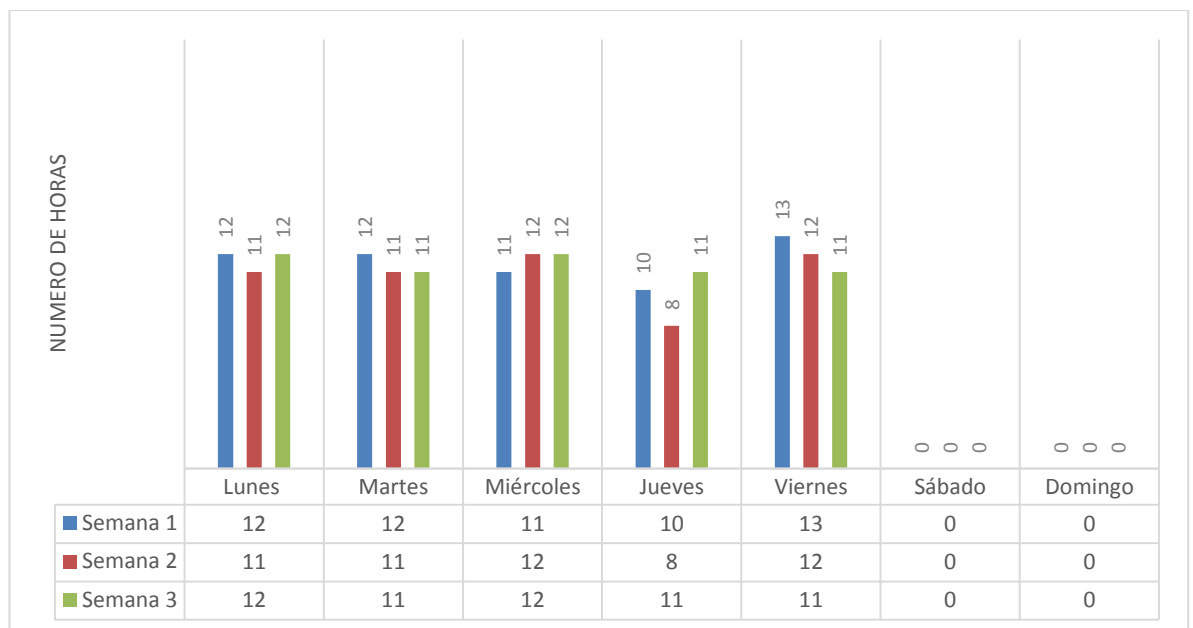


Tabla 4. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 1)

Fecha	Semana	Total horas
05/06/17- 11/06/17	1	58
12/06/17- 18/06/17	2	54
19/06/17- 25/06/17	3	57
Promedio		56

SALA GRUPOS DE INVESTIGACIÓN-ZONA 2

Figura 16. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 2)

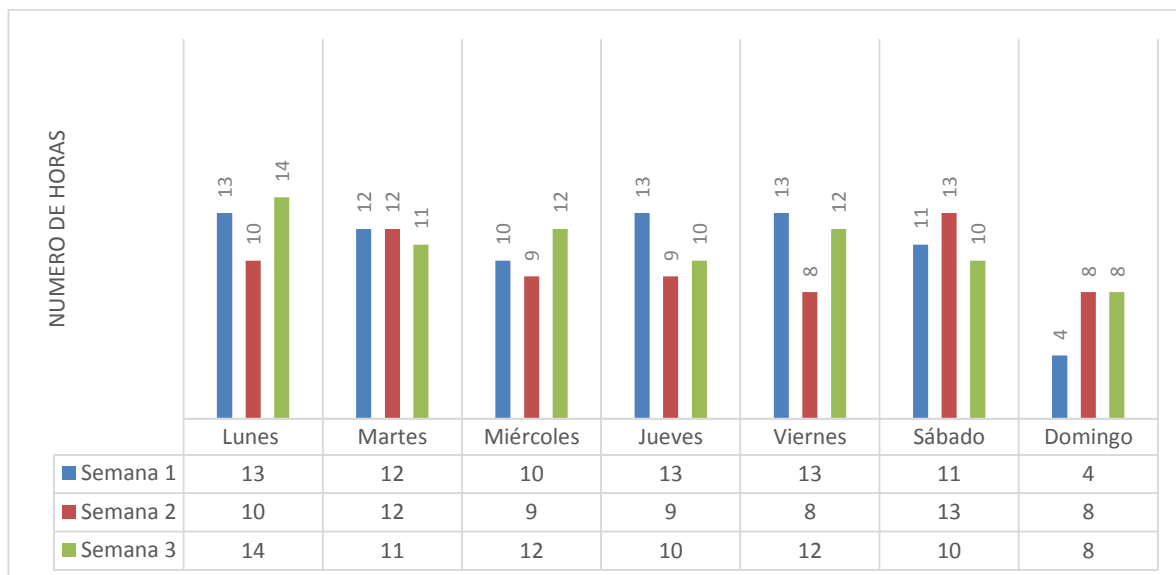


Tabla 5. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 2)

Fecha	Semana	Total horas
05/06/17- 11/06/17	1	76
12/06/17- 18/06/17	2	69
19/06/17- 25/06/17	3	77
Promedio		74

SALA DE JUNTAS - ZONA 3

Figura 17. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 3)

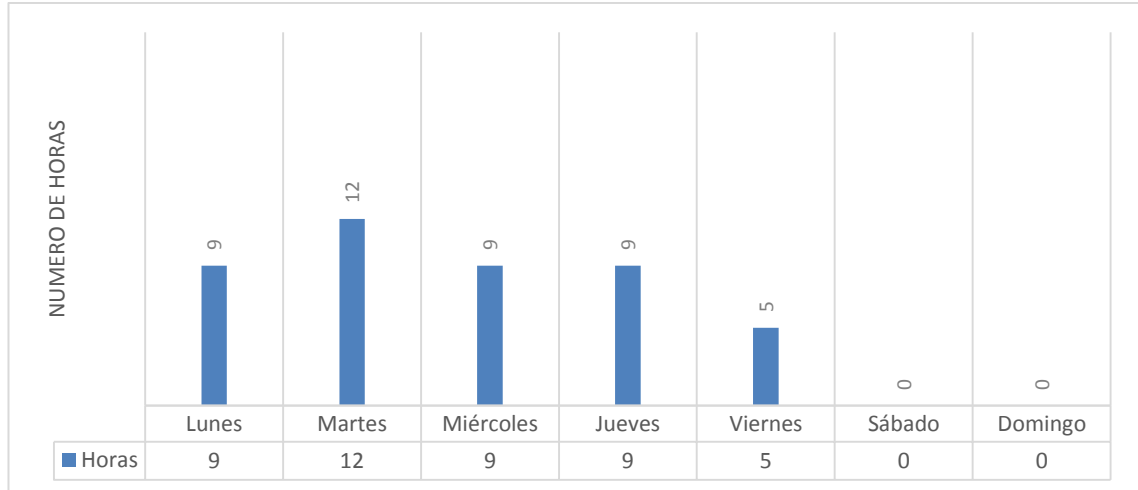


Tabla 6. Número de horas de trabajo de aires acondicionados ubicados en el segundo piso del ABP (zona 3)

SALA DE JUNTAS	
Día	Hora
Lunes	9
Martes	12
Miércoles	9
Jueves	9
Viernes	5
Sábado	0
Domingo	0
Total	44

Finalmente, el valor de kWh se extrajo de los recibos de energía eléctrica entregados por planta física de la universidad, por un valor de \$395,4 La descripción y consumo eléctrico de cada unidad se detallan en el **Tabla 7**, **Tabla 8**, **Tabla 9**, **Tabla 10**, **Tabla 11**, **Tabla 12**, **Tabla 13**.

Figura 18. Unidad acondicionadora Minisplit tipo cassette



Fuente. Propia

Tabla 7. Placa de información Minisplit tipo cassette

Equipo	Unidad acondicionadora minisplit tipo cassette			
Cantidad	2			
Unidad No.	UC-05/06			
Área servida	Sala de juntas - Zona 3			
Localización	Cubierta			
Marca	York			
Modelo	AC036X1024A			
DATOS ELÉCTRICOS DE LA PLACA				
LOAD	HP	Volt	RLA/FLA	% Funcionamiento
ID BLOWER	0,054	230		100%
COMP	3	230	16,1	40%
OD FAN	0,25	230	1,4	40%

Tabla 8. Consumo anual Minisplit tipo cassette

CONSUMO ELÉCTRICO UC-05/06						
LOAD	Potencia Unidad [HP]	Potencia Unidad [Kw]	Horas uso/Año	Kwh/Año	\$/Kwh	\$/Año unidades Dos
ID BLOWER	0,054	0,040	1408	56,320	\$ 395,37	\$44.534,48
COMP	3	2,24	563,2	1261,57	\$ 395,37	\$997.572,28
OD FAN	0,25	0,19	563,2	107,008	\$ 395,37	\$84.615,51
TOTAL				1424,896	\$ 395,37	\$ 1.126.722,26

UNIDAD TIPO PAQUETE DE EXPANSIÓN DIRECTA- PAQ-05

Figura 19. Unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-05



Fuente. Propia

Tabla 9. Placa de información unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-05

Equipo	Unidad tipo paquete de expansión directa - PAQ			
Unidad No.	PAQ-05			
Área servida	Sala grupos de investigación – Zona 2			
Localización	Cubierta			
Marca	York			
Modelo	DM150C00A2AAA4A			
DATOS ELÉCTRICOS DE LA PLACA				
LOAD	HP	Volt	RLA/FLA	% Funcionamiento
ID BLOWER	3	230	10,9	100%
COMP#1	6	230	20	40%
COMP#2	6	230	20	40%
OD FAN#1	0,75	230	3,5	40%
OD FAN#2	0,75	230	3,5	40%

Tabla 10. Consumo anual unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-05

CONSUMO ELÉCTRICO PAQ-05						
LOAD	Potencia Unidad [HP]	Potencia Unidad [Kw]	Horas uso/Año	Kwh/Año	\$/Kwh	\$/Año
ID BLOWER	3	2,2371	2368	5297,453	\$ 395,37	\$ 2.094.453,91
COMP#1	6	4,4742	947,2	4237,962	\$ 395,37	\$ 1.675.563,13
COMP#2	6	4,4742	947,2	4237,962	\$ 395,37	\$ 1.675.563,13
OD FAN#1	0,75	0,559275	947,2	529,745	\$ 395,37	\$ 209.445,39
OD FAN#2	0,75	0,559275	947,2	529,745	\$ 395,37	\$ 209.445,39
TOTAL				14832,868	\$ 395,37	\$ 5.864.470,96

UNIDAD TIPO PAQUETE DE EXPANSIÓN DIRECTA- PAQ-06

Figura 20. Unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-06



Fuente. Propia

Tabla 11. Placa de información unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-06

Equipo	Unidad tipo paquete de expansión directa - PAQ			
Unidad No.	PAQ-06			
Área servida	Oficinas profesores - Zona 1			
Localización	Cubierta			
Marca	York			
Modelo				
DATOS ELÉCTRICOS DE LA PLACA				
LOAD	HP	Volt	RLA/FLA	% Funcionamiento
ID BLOWER	2	230	11	100%
COMP	4	230	22	40%
OD FAN	0,5	230	2,75	40%

Tabla 12. Consumo anual unidad tipo paquete de expansión directa PAQ-06

CONSUMO ELÉCTRICO PAQ-06						
LOAD	Potencia Unidad [HP]	Potencia Unidad [Kw]	Horas uso/Año	Kwh/Año	\$/Kwh	\$/Año
ID BLOWER	2	1,4914	1792	2672,589	\$ 395,37	\$ 1.056.661,43
COMP	4	2,9828	716,8	2138,071	\$ 395,37	\$ 845.329,15
OD FAN	0,5	0,37285	716,8	267,259	\$ 395,37	\$ 105.666,14
TOTAL				5077,919	\$ 395,37	\$ 2.007.656,72

A partir de la información recolectada se obtuvo un estimado del consumo anual en kWh de los sistemas de refrigeración del último piso del edificio ABP con el fin de conocer los costos anuales que generan y estimar el ahorro potencial que causaría la implementación del techo verde. En la (Tabla 13) se especifican los equipos de aires acondicionados correspondientes a cada zona y el gasto anual que representan.

En total la utilización de los aires acondicionados del segundo piso del edificio representa un gasto anual de \$8.998.850.

Tabla 13. Gasto anual de los aires acondicionados del segundo piso del ABP.

Zona	Equipo	Kwh/Año	\$/Año
1	Unidad tipo paquete de expansión directa - PAQ O6	5078	\$ 2.007.657
2	Unidad tipo paquete de expansión directa - PAQ-O5	14833	\$ 5.864.471
3	2 Unidades acondicionadoras minisplit tipo cassette	1425	\$ 1.126.722
TOTAL		21336	\$ 8.998.850

2.2.4 Caracterización climática y medioambiental

- Intensidad y duración de exposición solar:

En promedio al día hay 3,75 horas de sol. Como se puede observar en la **Tabla 14**, los meses con mayor número de horas de sol al día son Enero y Diciembre, con 5,9 y 5,3 horas respectivamente. Y los meses con menos horas de brillo solar son marzo, junio y octubre, con 3,3, 3 y 3,5 horas al día. La intensidad solar promedio es de 4 kWh/m^2 .

Tabla 14. Duración de exposición solar

PROMEDIO DE BRILLO SOLAR POR MES (Horas de sol al día) (1979-2012) (Estación UIS)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
5,9	4,3	3,3	3,6	3,7	3	3,8	3,8	3,6	3,5	4,4	5,3

Fuente. IDEAM

- Precipitación anual y mensual:

En promedio las precipitaciones mensuales son de 107,9 mm. Los meses con mayores precipitaciones comprenden desde Marzo a Mayo y de Septiembre a Noviembre, siendo Marzo el mes con mayores precipitaciones con 139,7 mm. Diciembre y Junio son los meses con menores precipitaciones, siendo

Diciembre el mes con menores precipitaciones de todos con 66,6 mm (**Tabla 15**). El promedio de lluvia total anual es de 1303 mm.

Tabla 15. Precipitaciones mensuales

PRECIPITACION PROMEDIO POR MES (mm) (1971-2000) (Estación UIS)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
91,2	91,3	137,1	120,6	139,7	90,7	111,7	81,7	117,8	123,9	104,1	66,6

Fuente. IDEAM

- Cantidad de eventos de lluvia al año:

En promedio en Bucaramanga llueven 8-12 días al mes. Los meses con mayor número de días de lluvia son Abril, Mayo, Septiembre y Octubre, con un rango de 12-16 días de lluvia al mes. Los meses con menores días de lluvia son Enero, Febrero y Diciembre, con un rango de 4-8 días de lluvia al mes (**Tabla 16**). El número medio de días con lluvia Total anual es de 100-150 días.

Tabla 16. Cantidad de eventos de lluvia al año

NÚMERO MEDIO DE DÍAS CON LLUVIA MENSUAL MULTIANUAL (1981-2010)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
4-8	4-8	8-12	12-16	12-16	8-12	8-12	8-12	12-16	12-16	8-12	4-8

Fuente. IDEAM

Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses más secos son diciembre, enero y febrero, y en menor proporción, junio, julio y agosto. Las temporadas de lluvia se extienden de marzo a mayo y de septiembre a noviembre.

- Temperatura promedio del aire mínima y máxima:

La temperatura media está alrededor de los 23°C. La temperatura máxima media oscila alrededor de los 28°C y la temperatura mínima media 19°C (**Tabla**

17, **Tabla 18** y **Tabla 19**). La temperatura máxima se alcanza en las horas del mediodía y las mínimas en la madrugada.

Tabla 17. Temperatura máxima mensual

TEMPERATURA MÁXIMA (C°) (1971-2000) (Estación UIS)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
28	28,1	28,3	28,2	28,5	28,4	28,4	28,7	28,6	28,1	27,6	27,7

Fuente. IDEAM

Tabla 18. Temperatura media mensual

TEMPERATURA MEDIA (C°) (1971-2000) (Estación UIS)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
23,1	23,3	23,4	23,3	23,2	23,2	23,1	23,2	23	22,6	22,6	22,8

Fuente. IDEAM

Tabla 19. Temperatura mínima mensual

TEMPERATURA MÍNIMA (C°) (1971-2000) (Estación UIS)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
19	19,3	19,4	19,7	19,6	19,6	19,2	19,4	19,2	19,1	19,3	19,2

Fuente. IDEAM

- Humedad relativa:

La humedad relativa del aire es mayor a 80% en promedio y en épocas de lluvias alcanza valores superiores al 84%.

- Velocidad del viento

Velocidad del viento a 10 metros de altura anual promedio es de 2-3 m/s (IDEAM 2000-2010).

Según el Índice de confort Bucaramanga se clasifica como una ciudad cálida.

2.3 SELECCIÓN TIPO DE TECHO VERDE A IMPLEMENTAR

- Clasificación primaria:

En la **Tabla 20** se muestra el análisis cualitativo que se hizo para la clasificación primaria de la cubierta vegetal [54]. En la tabla se tuvieron en cuenta cinco criterios de selección (Propósito, Prestaciones básicas, transitabilidad, Accesibilidad y mantenimiento). De cada criterio se evaluó si era factible o no dependiendo de lo que se quería para el proyecto y si las condiciones del mismo lo permitían.

El propósito principal del proyecto es disminuir el consumo de energía eléctrica producto del uso de los aires acondicionados. Por lo tanto, el tipo de techo verde a implementar tiene que contribuir al aislamiento térmico. El acceso a la cubierta es limitado y no se tiene pensado para uso recreativo o de contemplación, ni para cumplir las funciones de huerta, de modo que se clasificó como un **Techo Verde Autorregulado**. En este tipo de techos la transitabilidad no es el fin principal salvo para limpieza e inspección esporádica. Y la vegetación a implementar puede mantener su vitalidad con el régimen de lluvias y con un seguimiento mínimo sin necesidad de riego adicional. El techo verde del proyecto se diseñaría, entonces, para un espesor de sustrato entre 20 y 120 mm aproximadamente [16].

Tabla 20. Análisis cualitativo para la clasificación primaria de la cubierta

Ítem	Autorregulado	Factible	Ajardinado	Factible	Ecológico Especializado	Factible	Huerta	Factible
Propósito principal	Lograr las prestaciones básicas con el mínimo de materiales, inversión económica y peso.	Si	Crear un espacio paisajístico transitable	No	Constituirse en un hábitat para la fauna y flora local	No	Siembra y recolección agrícola	No
Prestaciones básicas	Disminución del volumen de escorrentía, atenuación del caudal de evacuación, aislamiento térmico y acústico	Si	Disminución del volumen de escorrentía, atenuación del caudal de evacuación, aislamiento térmico y acústico	Si	Disminución del volumen de escorrentía, atenuación del caudal de evacuación, aislamiento térmico, acústico y preservación de la fauna y flora local.	No	Disminución del volumen de escorrentía, atenuación del caudal de evacuación, aislamiento térmico y acústico y producción agrícola	No
Accesibilidad	Poca	Si	Si	No	Si	No	Si	No
Transitabilidad	Poca	Si	Si	No	Si	No	Si	No
Mantenimiento	Mínimo (Grado 1)	Si	Regular (Grado 2)	Si	Especial (Grado 3)	No	Permanente (Grado 4)	No

Fuente. Guía de techos verdes Bogotá

- Clasificación secundaria:

Para el techo verde del proyecto se estimó la mayor carga para un techo autorregulado según la clasificación secundaria, 150 kg/m^2 (**Tabla 21**), debido a que era la situación de carga más crítica para la estructura y daría un rango de espesores para trabajar, en caso de que estructuralmente cumpliera para los mayores espesores. El techo verde se clasificó, por consiguiente, en **Robusto**.

Tabla 21. Clasificación secundaria para un techo autorregulado.

VALORES DE CARGA MUERTA EN ESTADO DE SATURACIÓN DE ACUERDO A LA CLASIFICACIÓN PRIMARIA DEL TECHO VIVO			
CLASIFICACIÓN PRIMARIA	CLASIFICACIÓN SECUNDARIA		
	Liviano	Moderado	Robusto
Techo Autorregulado	Hasta 80 kg/m^2	Más de 80 y hasta 120 kg/m^2	Más de 120 y hasta 150 kg/m^2

Fuente. Guía de techos verdes en Bogotá.

- Tipo de sistema de techo verde según la tecnología empleada:

La decisión sobre la tecnología a emplear se vio influenciada por la disponibilidad comercial y por la capacidad de ajustarse al espacio de trabajo. Se eligió un *sistema tipo multicapa monolítico*, por su flexibilidad para acomodarse a las diferentes dimensiones del área de trabajo y, además, por la flexibilidad de trabajo con cualquier espesor [14].

- Extensivo, Semi- Intensivo e Intensivo:

En la **Tabla 22** se analizó cualitativamente entre extensivo, semi-intensivo e intensivo teniendo en cuenta cinco criterios (Espesor de sustrato, Cobertura Vegetal transitable, Peso saturado, Diversidad Vegetal y Mantenimiento).

Tabla 22. Análisis cualitativo para la clasificación primaria de los sistemas de techo verde

Característica	Extensivo	Factible	Semi-Intensivo	Factible	Intensivo	Factible
Espesor de sustrato	Hasta 15 cm	Si	Entre 15 y 20 cm	No	Mayor que 20 cm	No
Transitabilidad	No transitable	Si	Parcialmente transitable	No	Transitable	No
Peso Saturado	Entre 50 y 170 kg/m ²	Si	Entre 150 y 250 kg/m ²	No	Mayor que 245 kg/m ²	No
Diversidad Vegetal	Poca	Si	Mayor	No	Máxima	No
Mantenimiento	Mínima	Si	Variable	No	Alto	No

Fuente. Guía de techos verdes en Bogotá.

Con base en las clasificaciones anteriores se obtuvo una idea más clara de lo se quería para el proyecto y las limitaciones de este. Se determinó que el techo verde se clasificaba en: **Extensivo**.

Los techos verdes extensivos, comparados con los semi-intensivos e intensivos, son más livianos, económicos, aptos para áreas grandes y requieren menos mantenimiento [19].

2.4 DISEÑO DEL TECHO VERDE Y PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS.

2.4.1 Selección de capas

2.4.1.1 Cobertura Vegetal. Debido a la temperatura máxima promedio que alcanza la ciudad de Bucaramanga, 28 C°, y la temperatura promedio en verano, 23 C°, se optó por implementar plantas de clima cálido. Se tuvo en cuenta que la accesibilidad a la cubierta era muy limitada y el sol irradiaría directamente en el techo verde sin mucha generación de sombras. Se buscaron especies vegetales que fueran tolerantes al calor y a la sequía, ya que esto facilitaría la manutención del proyecto y se adaptarían mejor [13], [14] [18].

La carga estructural que se le iba a aplicar al edificio también se tuvo en cuenta, por lo tanto, se optó por vegetación que tuviera un sistema radial de raíces cortas, es decir, que no solicitaran grandes espesores. Según [13] y [14], para el requerimiento de sustrato se tenía la siguiente clasificación para techos extensivos:

- Altura de sustrato de 3 a 5 cm: Mantas prefabricadas de Musgo y Sedum.
- Altura de sustrato de 5-8 cm: Suculentas de bajo crecimiento y algunas especies de pastos.
- Altura de sustrato de 12 a 18 cm: Pastos silvestres y vegetación de pasto-hierba.

De cada género se consultaron las características, los cuidados y requerimientos y de ahí se descartaron los menos convenientes para el proyecto. Lo que se quería primordialmente, además de que se ajustara a las

condiciones de la zona, era que cumpliera el propósito del techo verde de la manera más óptima generando la menor carga al edificio.

Se buscaría implementar prioritariamente pastos, con ellos se logran los más densos colchones de vegetación con la mayor superficie de hoja verde y por lo tanto los mejores efectos de aislación térmica [13]. En segunda medida, suculentas de bajo porte para no sobrecargar la estructura en caso de que hubiesen limitantes estructurales, tal como la especie Sedum.

Se consideró implementar diversas especies vegetales ya que implementar solo una especie en el techo verde podría significar una decisión riesgosa para el proyecto. Las condiciones climáticas y pesticidas pueden ser fatales para específicas especies así que podrían afectar al monocultivo y exterminar todas las plantas del techo verde [18].

Hay tres modos de propagación de la vegetación: semillas, esquejes o trasplantes. Las semillas requieren mucha irrigación y requieren de protectores de viento para que su germinación sea efectiva. Los esquejes requieren ser plantados en suelos saturados, si las condiciones climáticas del lugar se prestan no es necesario irrigación adicional. Los trasplantes por su parte tienen un establecimiento más estable, pero encarecen en gran medida el proyecto [18]. En el caso de los Sedum su propagación se dará por medio de trasplante, la propagación se determinó por lo comercialmente disponible, y para los pastos, en estolones debido a su practicidad en comparación con las semillas.

2.4.1.2 Sustrato. El medio de crecimiento o sustrato para techo verdes está, típicamente, compuesto por una parte de materia inorgánica o “agregados” y una porción de materia orgánica [14], [19].

La materia orgánica usualmente se mantiene en una baja proporción de toda la mezcla (20% o menos), ya que tiene poca durabilidad, generando hundimientos producto de su degradación [14].

El componente orgánico puede constituirse a base de paja orgánica, madera, césped, hojas, pasto cortado, residuos de agricultura, humus, compost, fibra de coco, turba o abono) [19].

Para cubiertas extensivas en las cuales se tiene planeado cultivar pastos y Sedum, es conveniente que el sustrato no contenga demasiado humus. Si se llega a implementar tierra de suelo, se tiene que tener precaución en que esta no sea muy arcillosa. En general la tierra utilizada tiene que venir empobrecida con material mineral como piedra pómez, lava, pizarra expandida, arcilla expandida partida y material reciclado de ladrillos porosos de arcilla y piedra pómez [13].

Finalmente, las condiciones dadas por la vegetación determinaron un espesor de sustrato de 15 cm. El sustrato por el cual se optó en el proyecto será proveído por la empresa CASA AMBIENTE SAS, la cual sigue las directrices de la German Landscape Research, Development and Construction Society (FLL). El sustrato es rico en nutrientes, con un buen drenaje y trabaja óptimamente para la vegetación establecida en el presente proyecto. La mezcla que se buscó está compuesta por 80% tierra empobrecida con material mineral y 20% humus.

2.4.1.3 Filtro. El material utilizado para los filtros puede ser tejido o no tejido. Aunque un material no tejido es preferible por su mayor resistencia a la penetración de raíces [14]. Generalmente los productos usados como filtro son ligeros y no retienen grandes cantidades de agua [18]. Comercialmente se encuentra como alfombras de fibras de poliéster o alfombras de polietileno-polipropileno [19].

El producto que se seleccionó como medio filtrante fue el geotextil sika PP 1800, ya que es una membrana sintética no tejida 100% de polipropileno, pensada especialmente para cubiertas verdes. Es resistente a las raíces, a químicos, a contaminación por hongos, no genera putrefacción y no contamina los acuíferos.

2.4.1.4 Drenaje. En los proyectos de cubiertas verdes son usados como medios drenantes agregados, geotextiles, láminas drenantes de plástico o poliestireno y paneles de espumas modificadas [16], [19]. Los agregados requieren una labor de instalación intensa y representan una mayor carga adicional para la estructura, comparados con los otros materiales [18]. Si se quiere emplear agregados, se tiene que optar por minerales porosos y livianos, granos gruesos, arcilla expandida, pizarra expandida, lava expandida, piedra pómez y materiales reciclados de escoria y ladrillos [13].

Para determinar la capacidad de drenaje que requiere el techo verde se miraron las curvas IDF de la ciudad de Bucaramanga, disponibles en el IDEAM, para un tiempo de retorno de 25 años y una duración de una hora. Se calculó la capacidad mínima de drenaje que debía tener el medio drenante empleado para el techo verde teniendo en cuenta la pendiente y las áreas aferentes correspondientes a los desagües en la cubierta (**Tabla 23**).

Tabla 23. Capacidad mínima de drenaje.

Pendiente [%]	1,5		
ZONA	Intensidad [mm/h]	Área [m²]	Capacidad de Drenaje [L/s/m²]
1	69,7	61,6	1,19
2	69,7	96,1	1,86
3	69,7	65,3	1,26
4	69,7	71,9	1,39
5	69,7	140,01	2,71

Fuente. Propia

Se buscó entonces un medio drenante con capacidad para mínimo 2,7 L/s/m². El producto que se seleccionó fue la lámina sika 32-T ya que está elaborada de polietileno extruido de alta densidad y está diseñada especialmente para su uso en techos verdes. La lámina cuenta con una serie de orificios que garantiza la ventilación de las raíces de las plantas, el exceso de agua se evacua a través de los orificios que hay entre nodos y se filtra mediante la crujía que se forma entre los nódulos. El producto es resistente al aplastamiento, tiene buena resistencia química, resiste al impacto y la abrasión, a las raíces, a la contaminación por hongos, no genera putrefacción, no contamina los acuíferos y tiene una capacidad de drenaje de 4,6 L/s/m².

Un factor importante para que se dé el buen funcionamiento del sistema de drenaje es la pendiente de la cubierta, se recomienda una pendiente mínima de 1% en soportes de hormigón [38]. Una pendiente del 2% se considera óptima para la correcta evacuación del agua [14], [18], [16], en pendientes inferiores pueden darse estancamientos que afecten a la vegetación [13]. En caso de que las condiciones de la cubierta no sean óptimas se puede aumentar la pendiente aplicando mortero de nivelación reforzado [16] o conseguir la inclinación

deseada mediante capas aislantes [19]. Si aumentar la pendiente no es factible, se puede recurrir a aumentar el grosor de la capa de drenaje, de manera que se consiga distanciar las raíces de la vegetación de los charcos de agua [39]. Se optó por incorporar a la capa de drenaje, una capa de grava de 2 cm de espesor.

2.4.1.5 Impermeabilizante y Barrera Anti-Raíces. En el mercado existen varias tecnologías para impermeabilización de cubiertas verdes como las membranas de EPDM, membranas de TPO, Membranas líquidas de Poliuretano y Láminas de PVC. [19] Las membranas impermeabilizantes deben estar protegidas contra daños físicos y químicos, ser a prueba de raíces y deben ser instaladas por personal calificado y competente. [19] No se deben emplear membranas de impermeabilización de menos de 1,2 mm de espesor y se recomienda que sean resistentes a los rayos UV especialmente en sistemas parcial o totalmente expuestos a la radiación solar directa.

La impermeabilización a base de bitumen se ha comprobado, a lo largo de los años, que es atravesada por raíces de distintas plantas. Si se llegan a emplear mantos de impermeabilización que contengan bitumen o asfalto, se deben tratar químicamente para repeler las raíces y utilizar un refuerzo adicional [16].

Las membranas de PVC no son resistentes al bitumen, polystyrol y a productos aceitosos. En proyectos de estructuras ya existentes, es común encontrar cubiertas impermeabilizadas con bitumen [18]. Para evitar el deterioro de la nueva capa de impermeabilización se debe separar la membrana de PVC de los materiales bituminosos con material sintético, manta de fibra de vidrio o con láminas de polietileno de por lo menos 0,2 mm [16].

Se hizo necesario aplicar una nueva capa de impermeabilización debido a que la capa ya existente está elaborada a base de bitumen (se pudo comprobar por inspección) y ha recibido radiación directa del sol desde su construcción.

El producto que se seleccionó para impermeabilizar fue Sarnafil G476-12, pues es una membrana sintética multi-capas de PVC que no requiere de una barrera anti-raíces. Además, está reforzada con fibra de vidrio y fue diseñada, especialmente, para implementarse en cubiertas verdes. Es resistente a químicos, a las raíces, a los hongos y microorganismos bacterianos. Soporta diferentes niveles de presión hidrostática, incluyendo agua estancada y presenta un espesor de 1,2 mm.

El uso de PVC como membrana de impermeabilización y la capa de bitumen presente en la cubierta de la estructura, hizo necesario emplear una capa adicional protectora. Se seleccionó el producto geotextil Sika PP 1800, debido a que es una membrana sintética no tejida 100% de polipropileno diseñada tanto para filtración en techos verdes como protección de membranas de PVC. Es resistente a las raíces, a químicos, a contaminación por hongos, no genera putrefacción y no contamina los acuíferos.

2.4.1.6 Elementos Auxiliares. El proyecto debido a su ubicación en la cubierta y a sus características exige requerimiento de confinamiento particular. Las capas no están delimitadas en su mayoría por los bordes de la cubierta por lo que se hace necesario el uso de retenedores perimetrales. En el mercado se consiguen productos como retenedores de hormigón prefabricado, borde de aluminio, borde de madera, maceteros y retenedores de productos reciclados. Los bordes de aluminio fueron los elegidos por su ligereza y facilidad de instalación.

Los desagües de la cubierta del edificio no tienen resumideros de azotea que protejan el sistema de taponamientos por hojas u otros materiales. Así que se repararían los resumideros y como lo recomiendan [14], [16], [19], se le daría una protección adicional contra las capas del sistema.

En el mercado se consiguen desde cajas registrables, que permiten hacer inspección de las condiciones del desagüe [19] hasta mecanismos más sencillos que involucran grava y material filtrante. Para el desagüe de la cubierta se decidió trabajar con grava de material liviano y geotextil, exactamente el mismo producto del medio filtrante del sustrato.

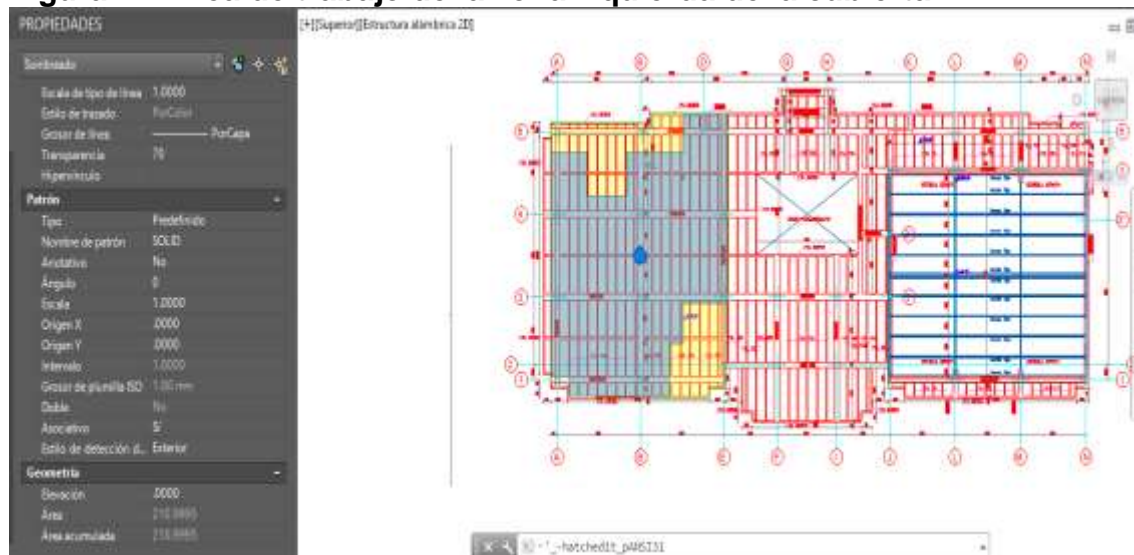
Con el propósito de facilitar el mantenimiento de la cobertura vegetal se hizo necesario la inclusión de elementos como una escalera de gato y senderos transitables. En el mercado se encuentra una gran variedad de productos para el diseño de pasarelas como grava, rocas de fibra de vidrio, piedra natural, estructuras de madera, placas de cemento y adoquines prefabricados [19]. Para el proyecto se optó por emplear grava de agregados livianos.

2.4.2 Opciones de diseño. En el diseño de las propuestas para la cubierta verde, se identificó la carga estructural como el principal factor limitante y el espesor de sustrato como el elemento que determina, en mayor medida, dicha carga estructural.

La caracterización estructural permitió conocer las áreas de la cubierta que no eran aptas para resistir cargas adicionales ya que presentaban cargas actuantes mayores a las resistentes, en donde se daban grandes deformaciones. Las zonas descartadas desde la fase de caracterización fueron aquellas en donde se presentaban vigas en voladizo.

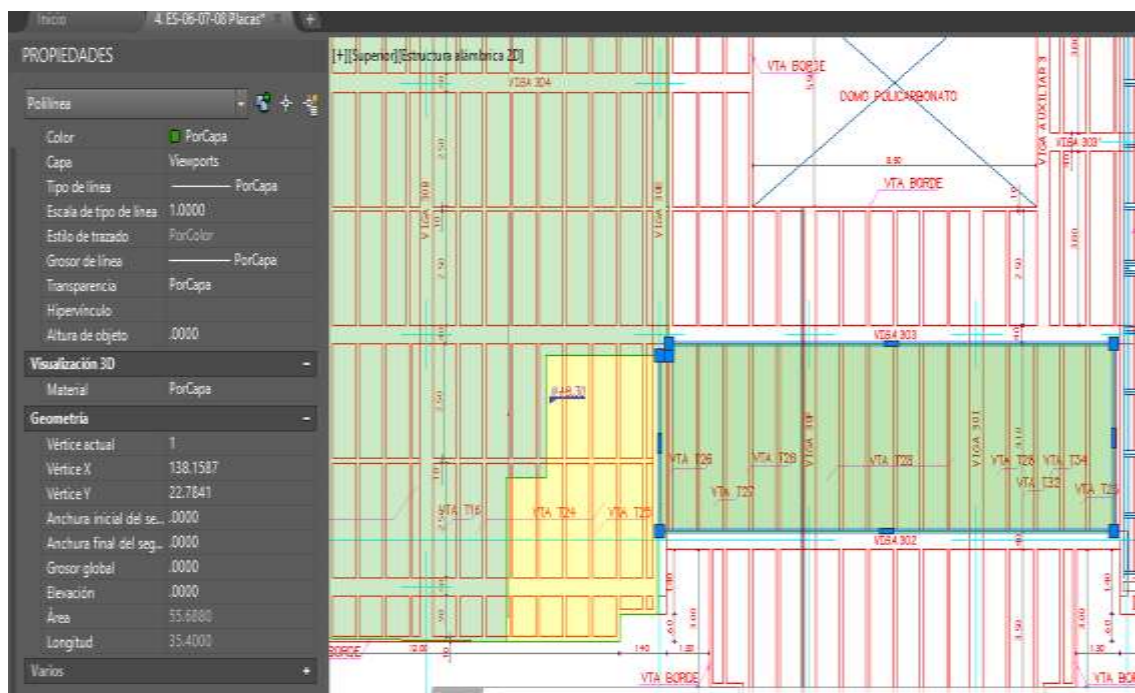
La zona izquierda de la cubierta presenta buenas condiciones de apoyo, por lo tanto se trabajaría con ella. Se restaron las medidas de las áreas ocupadas por los aires acondicionados, el área de trabajo dio de 211 m^2 (**Figura 21**).

Figura 21. Área de trabajo de la zona izquierda de la cubierta



La zona central delimitada por las vigas 302 y 303, se mantendrá como opcional dependiendo de cómo se comportará la estructura después de haberse cargado con el peso adicional. El área de trabajo dio de aproximadamente, $55,7 \text{ m}^2$ (**Figura 22**).

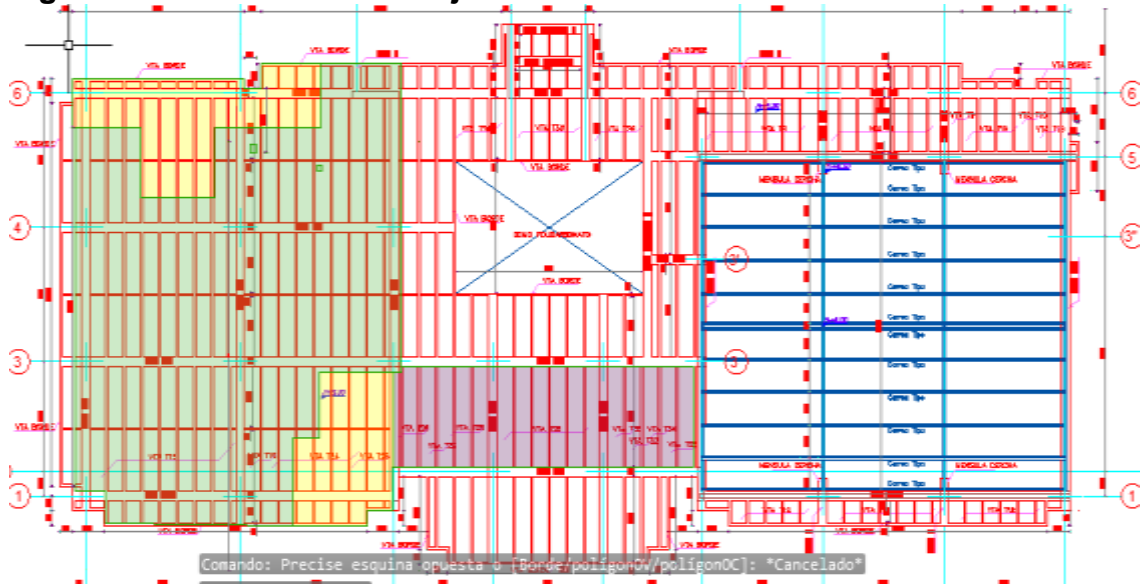
Figura 22. Área de trabajo de la zona central



Fuente. Propia

El área restante no se tendría en cuenta para el proyecto debido a que es un área aislada y debajo de ella no hay oficinas o salones que directamente consuman energía por el uso de aires acondicionados. El área total a considerar para el proyecto sería de $266,7 \text{ m}^2$ (**Figura 23**).

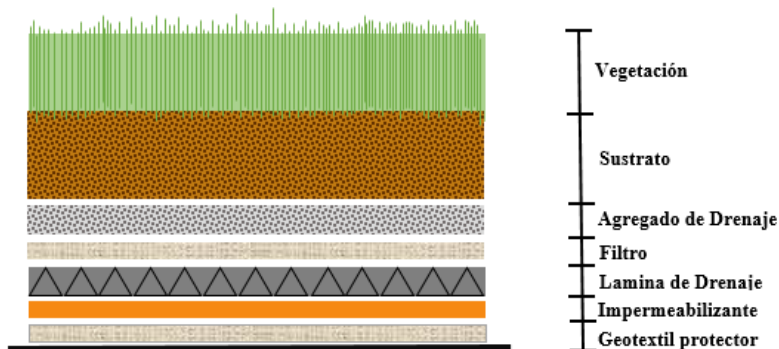
Figura 23. Área total de trabajo



Fuente. Propia

Para cada una de las opciones de diseño se mantuvieron fijas las capas que no aportaban mayor peso, como protección del impermeabilizante, impermeabilizante, lámina de drenaje, filtro y agregado de drenaje. Se varió el espesor de sustrato y, por consiguiente, la vegetación. Las capas que conforman el diseño de techo verde propuesto se muestran en la (Figura 24).

Figura 24. Capas del diseño de techo verde propuesto.

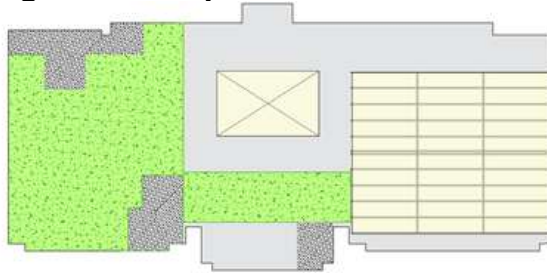


Fuente. Propia

Los diseños planteados se describen a continuación:

Diseño No. 1: Se trabajaría con un área de $266,7 \text{ m}^2$, en donde se plantaría pasto y se tendrían espesores de sustrato de 15 cm. (**Figura 25**).

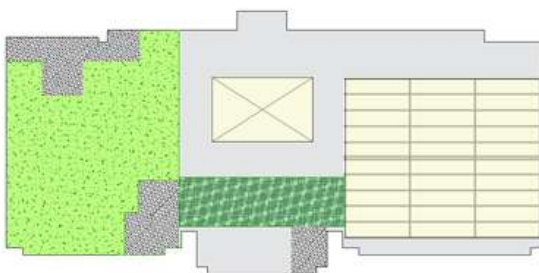
Figura 25. Propuesta de Diseño No. 1



Fuente. Propia

Diseño No. 2: Se trabajaría con un área de 211 m^2 , en donde se plantarían pastos con espesor de sustrato de 15 cm, y un área de $55,7 \text{ m}^2$, en donde se plantarían suculentas con espesores de sustrato de 5 cm. (**Figura 26**).

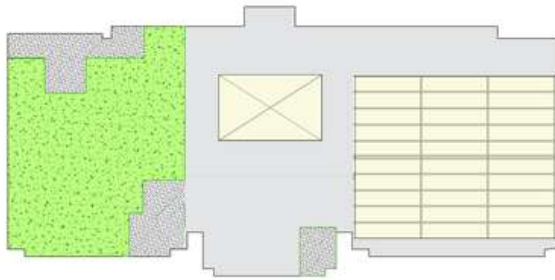
Figura 26. Propuesta de Diseño No. 2



Fuente. Propia

Diseño No. 3: Se trabajaría con un área de 211 m^2 , en donde solo se plantarían pastos y se tendrían espesores de 15 cm. (**Figura 27**)

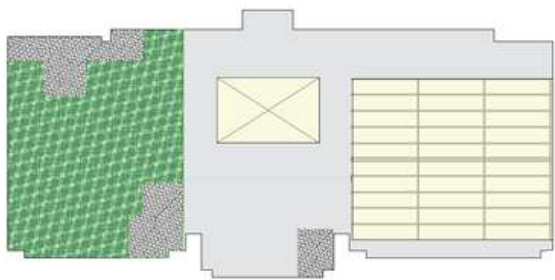
Figura 27. Propuesta de Diseño No. 3



Fuente. Propia

Diseño No. 4: Se trabajaría con un área de 211 m^2 , en donde se plantarían suculentas y se tendrían espesores de sustrato de 5 cm (**Figura 28**).

Figura 28. Propuesta de Diseño No. 4



Fuente. Propia

2.5 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS PROPUESTAS

Se tuvo en cuenta las cargas por m^2 de las capas propuestas considerando el peso de estas en estado saturado. Los pesos aportados por el geotextil, el impermeabilizante y la lámina de drenaje se obtuvieron de información suministrada por el fabricante. Para los materiales como la grava del drenaje y el peso de la vegetación se hicieron estimaciones con base en bibliografía. Según la Asociación Internacional de Techos Verdes para plantas tipo Sedum o suculentas se toman pesos de $9,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ y para arbustos y pastos de hasta 16 cm se toman pesos de $14 \text{ kg}/\text{m}^2$ [18]. Los agregados utilizados en el drenaje pueden llegar a pesar $20 \text{ kg}/\text{m}^2$ por cada 2,54 cm de espesor [18]. El peso del

sustrato saturado fue dado por el vivero que lo fabrica, y es de aproximadamente de 100 a 150 kg/m^2 .

En la **Tabla 24** y **Tabla 25**, se presenta en detalle los pesos saturados para una capa con vegetación tipo pasto y Sedum, respectivamente. Para el sistema compuesto por pastos se tomó una carga distribuida aproximada de 1,9 kN/m^2 y para las suculentas de 1 kN/m^2 .

Tabla 24. Peso saturado de un techo con vegetación tipo pasto

Capa	Material	Espesor [mm]	Peso [Kg/m ²]	Carga [KN/m ²]
Vegetación	Pasto	150	14	0,14
Sustrato	Mezcla Casa Ambiente	150	150	1,5
Drenaje	Agregado liviano	20	20	0,2
Filtro	Geotextil	1,5	0,145	0,00145
Drenaje	Lamina	20	1	0,01
Impermeabilización	Membrana PVC	1,2	1,6	0,016
Barrera Protectora	Geotextil	1,5	0,145	0,00145
		344,2	186,89	1,8689

Fuente. Propia

Tabla 25. Peso saturado de un techo verde con vegetación tipo Sedum

Capa	Material	Espesor [mm]	Peso [Kg/m ²]	Carga [KN/m ²]
Vegetacion	Suculentas	100	9,5	0,095
Sustrato	Mezcla Casa Ambiente	50	50	0,5
Drenaje	Agregado liviano	20	40	0,4
Filtro	Geotextil	1,5	0,145	0,00145
Drenaje	Lamina	20	1	0,01
Impermeabilizacion	Membrana PVC	1,2	1,6	0,016
Barrera Protectora	Geotextil	1,5	0,145	0,00145
		194,2	102,39	1,0239

Fuente. Propia

Mediante el modelo de ETABS se analizó la respuesta de los elementos estructurales a la carga adicional de la cubierta vegetal. Inicialmente, se evaluó la propuesta de techo verde con mayor exigencia a nivel estructural, correspondiente al diseño con mayor peso por m^2 sobre el área 1 y 2. En caso

de no cumplir, se evaluarían los otros diseños hasta encontrar la distribución de techo verde apropiada.

La propuesta de diseño No.1, es la alternativa con condiciones de peso más crítica, además parte de su peso se localiza en una zona entre vigas de voladizo. Sin embargo, al ser la propuesta con mayor área ocupada en pastos, se considera la alternativa con mayor beneficio a nivel de confort térmico en el edificio. En orden, siguen los diseños No 2, 3 y 4.

Se calcularon los momentos y esfuerzos cortantes resistentes de cada uno de los elementos estructurales que estarían en contacto con el techo verde teniendo en cuenta sus dimensiones, materiales y refuerzo. Luego, se cargó el modelo y se analizaron los momentos y cortantes actuantes para la propuesta de diseño No 1, en contraste con los resistentes para conocer los índices de sobreesfuerzo de la estructura.

Se encontró que el edificio responde estructuralmente a la alternativa de diseño más crítica y no se hizo necesario evaluar las demás propuestas.

2.6 FACTIBILIDAD TÉCNICA

Basada en un rango de calificación de 1 a 3 descrito en **Tabla 26**, la **Tabla 27** muestra la matriz de evaluación de los requisitos técnicos de cada propuesta de diseño,

Tabla 26. Rangos de calificación de la matriz de evaluación de factibilidad técnica

Valoración	Definición
3	Se cumple en totalidad el requisito o criterio
2	Se cumple medianamente el requisito o criterio
1	No se cumple el requisito o criterio

Fuente. Guía de techos verdes en Bogotá

Profundizando en cada uno de los criterios de evaluación:

Estanqueidad: Se calificaron todos los diseños con 3, cumplían en su totalidad este criterio, puesto que el producto buscado para la impermeabilización es sintético y aprueba de rayos UV. El proveedor, por su parte, da garantía del producto, la mano de obra de instalación y la prueba de estanqueidad que se debe realizar para asegurar el correcto funcionamiento de la impermeabilización.

Drenaje: Se calificaron todos los diseños con 3, cumplían en su totalidad este criterio. El edificio es una estructura ya existente, por lo que no hubo necesidad de hacer diseño de bajantes y canaletas, pero si se inspecciono el desagüe de la cubierta. Debido a la baja pendiente se presentaban estancamientos de agua, lo cual se solucionó adoptando una capa de material granular liviano. Se buscó que el medio drenante tuviera la capacidad para un escenario crítico de lluvias.

Tabla 27. Análisis cualitativo y cuantitativo de los requisitos técnicos para cada propuesta de diseño

Características técnicas mínimas y recomendadas para implementación de techos verdes			Evaluación factibilidad			
			Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
Requisitos mínimos de obligatorio cumplimiento	Operatividad del sistema de Techo Biótico	Estanqueidad	3	3	3	3
		Drenaje	3	3	3	3
		Retención de agua	3	3	3	3
		Estabilidad Mecánica	3	3	3	3
		Nutrición	3	3	3	3
		Filtración	3	3	3	3
	Techo Biótico implementado	Economía	3	3	3	3
		Durabilidad	3	3	3	3
		Estabilidad y resistencia mecánica	3	3	3	3
		Estabilidad biológica y vitalidad	3	3	3	3
		Continuidad operativa	3	3	3	3
	Inmueble intervenido	Integridad del inmueble	3	3	3	3
		Compatibilidad funcional con el inmueble	3	3	3	3
	Estructura ecológica principal	Conectividad ecológica	3	3	3	3
		Servicios ambientales prioritarios	3	2	3	2
Resultados		Total	45	44	45	44
		Porcentaje de factibilidad	100,0	97,8	100,0	97,8

Fuente. Guía de techos verde Bogotá

Retención de agua: Se calificaron todos los diseños con 3, cumplían en su totalidad este criterio. El sustrato se buscó de una empresa con experiencia en techos verdes, que asegura un óptimo funcionamiento del producto y una retención del 70%. Además, que se buscó que el medio drenante tuviera un sistema de retención de agua.

Consistencia: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3 puesto que se cumplían en su totalidad este criterio. Se buscaron elementos de confinamiento diseñados especialmente para techos verdes y se consideraron pasarelas para un tránsito mínimo debido al mantenimiento.

Nutrición: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Se optó por un sustrato diseñado especialmente para techos verdes, por una empresa especialista en el tema. Se buscó que coincidiera con los materiales consultados en múltiples fuentes bibliográficas y se diseñó para un espesor de sustrato acorde al tipo de vegetación.

Filtración: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Se buscó un medio filtrante de calidad, diseñado para su uso en techos verdes, con resistencia a microorganismos y a la humedad.

Durabilidad: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Todos los materiales estables seleccionados son resistentes a microorganismos, a la humedad y los expuestos a la radiación, resistentes a los rayos UV.

Estabilidad: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Para evitar deformaciones en el sistema se buscaron perfiles perimetrales y el viento que se presenta a esa altura, 3 m/s, para no representar riesgo en el sistema pues el peso del sustrato y la vegetación evitan el levantamiento.

Vitalidad: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Se implementaron plantas acordes a las condiciones ambientales de la zona y que no fueran invasivas. Se plantearon unas recomendaciones de seguimiento y mantenimiento para garantizar la vitalidad de la vegetación empleada.

Continuidad operativa: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. La universidad cuenta con personal de jardinería apto para hacerse cargo del seguimiento y mantenimiento del techo verde.

Integridad del inmueble: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Se realizó una caracterización y valoración estructural de la edificación. Para cada diseño se tuvieron en cuenta las cargas vivas y muertas adicionales y se analizó en un modelo de la estructura en ETABS, asegurando la viabilidad de su implementación.

Compatibilidad funcional con el inmueble: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. El sistema de desagüe funciona correctamente y los medios drenantes en el techo verde fueron seleccionados para cumplir de manera óptima las condiciones de drenaje. Se plantearon senderos en los diseños para garantizar no solo el

mantenimiento del techo verde sino el mantenimiento de los otros equipos ubicados en la cubierta.

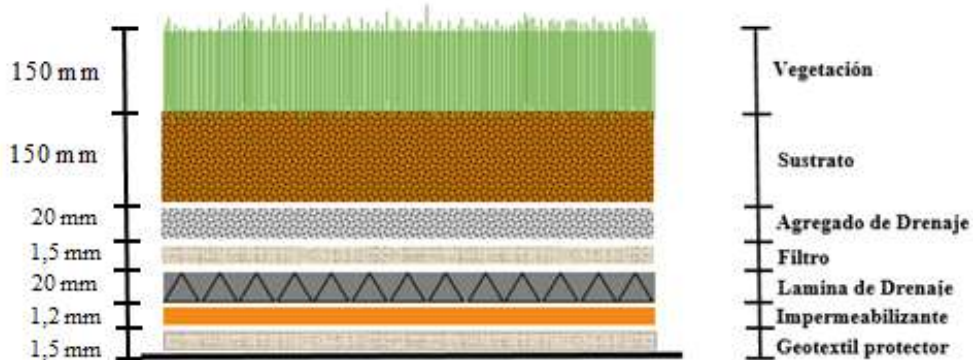
Conectividad ecológica: Se calificaron todos los diseños con una puntuación de 3, puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Todas las especies que se seleccionaron para el techo verde son adaptadas, por lo tanto, propician el equilibrio ecológico de la zona.

Servicios ambientales prioritarios: El principal servicio ambiental que prestaría el techo verde sería como aislante térmico y la eficiencia para cumplir este propósito estará condicionada al tipo de vegetación que se emplee. Los techos verdes con Sedum tiene un efecto ecológico y físico-constructivo menor respecto a los pastos [13] por esa razón se calificaron los diseños uno y tres, techos verdes con solo pastos, con una puntuación de 3 puesto que cumplían en su totalidad este criterio. Las áreas con pastos tendrían las mayores superficies verdes y colchones de sustrato haciéndolos más eficientes. Los diseños 2 y 4 se calificaron con una puntuación de 2, pues cumplían medianamente el criterio de evaluación.

2.7 SELECCIÓN DE LA PROPUESTA FINAL Y RECOMENDACIONES

Se seleccionó el diseño No. 1 dado que cumplió estructuralmente y se considera es la mejor opción para lograr el propósito del techo verde. Los espesores del diseño final se observan en (**Figura 29**).

Figura 29. Espesores de las capas del diseño de techo verde final.



Fuente. Propia

2.7.1 Seguimiento. Hay un periodo de establecimiento en el cual las raíces de las plantas se acostumbran al sustrato y al ambiente de la cubierta. Este periodo comprende entre 6 a 10 semanas para trasplantes (tienen que ser regadas de a 3 a 4 días a la semana) y el doble para esquejes. Las especies de pastos que se seleccionaron para el proyecto vienen en estolones, por lo tanto, para el período de establecimiento constara de 20 semanas. Durante este periodo las plantas tendrán altos requerimientos hídricos y de nutrientes. Aplicación de un fertilizante granular de liberación lenta (12- 14 meses) en la superficie del sustrato dará los nutrientes que necesitan las plantas durante un año. En temperaturas frías, lluvias o irrigación una vez a la semana es suficiente. En climas cálidos, como el de Bucaramanga, será necesario irrigación de las plantas dos o tres veces por semana [18].

Los techos verdes con plantas tolerantes a la sequía prosperan en épocas de lluvia y en épocas sin lluvias que excedan 4 a 6 semanas se necesita irrigación adicional [18].

2.7.2 Mantenimiento. Los techos verdes con pastos de densos colchones evaporan proporcionalmente mucha humedad, pero gracias a la formación de rocío por la mañana vuelven a quedar completamente regados [13]. Los techos verdes autorregulados, como el del presente proyecto, requieren un seguimiento post instalación grado 1 (mínimo), que consiste en inspección y limpieza de sumideros y deshierbe [16].

Pero como lo menciona [18] todas las plantas requieren de agua y las condiciones climáticas son impredecibles así que en periodos muy largos de sequía se hace necesario el riego artificial [18]. Para proyectos ubicados a menos de 7 metros del suelo se pueden utilizar llaves de agua conectadas a una manguera para proveer el agua de irrigación. Otra opción es instalar una válvula en el techo para hacer el proceso de irrigación más sencillo.

2.7.3 Proveedores. Como proveedor de la cobertura vegetal se seleccionó el Vivero Artes, quien trabaja en conjunto con la empresa especialista en proyectos de techos verdes, CASA AMBIENTE SAS. Se seleccionó debido a su experiencia trabajando con más proyectos de techos verdes en el área metropolitana, donde se destacan el Hospital Internacional de Colombia y la Batería de Baños de la Biblioteca de la UIS. El vivero podía suplir la vegetación para grandes áreas y brindó asesoramiento para el proyecto.

En cuanto a los insumos no verdes se cotizó con la empresa Sika pues tiene una línea de materiales pensados especialmente en techos verdes y ha trabajado en proyectos de este tipo anteriormente, además, de contar con distribuidores e instaladores aprobados en la ciudad de Bucaramanga. Igualmente se seleccionó a Sika como proveedor de la capa drenante y se recibió asesoramiento de la empresa CASA AMBIENTE SAS la cual ha trabajado en múltiples proyectos de techos verdes en el área metropolitana

entre ellos el Hospital Internacional de Colombia y la batería de baños de la biblioteca de la UIS.

Figura 30. Proyecto techo verde Hospital Internacional de Colombia.



Fuente. Casa Ambiente SAS

2.8 FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Los análisis de costo beneficio han sido extensamente reconocidos como un marco útil para evaluar los aspectos positivos y negativos de las acciones y políticas prospectivas. Y por hacer las alternativas, como las implicaciones económicas, una parte explícita del proceso de toma de decisiones [40].

La propuesta de techo verde fue pensada con el objetivo principal de conseguir ahorros en energía producto del uso de aires acondicionados, pero complementariamente la idea de techo verde que se diseñó conlleva más beneficios directos e indirectos que se ven reflejados en ahorros para el proyecto.

El análisis económico se realizó con un enfoque diferente a un análisis hecho para un producto que se busca comercializar, se realizó con un enfoque propio de un proyecto ambiental, donde se identificaron los impactos, cuales eran económicamente relevantes, cuantificación de dichos impactos y rentabilidad del proyecto teniendo en cuenta diferentes indicadores económicos [41].

2.8.1 Impactos del proyecto. La implementación de techos verdes genera impactos en aspectos como la vida útil de la impermeabilización, el plan de manejo de aguas lluvias, el consumo energético, el aislamiento para la estructura, la calidad del aire, el efecto de isla de calor y en la generación de hábitat y espacios verdes. En la **Tabla 28** se identificaron cuáles impactos eran cuantificables basados en [40].

Para el presente proyecto se identificaron como beneficios relevantes la duplicación de la vida útil del techo, ahorro de energía y absorción de dióxido de carbono. Aunque los techos verdes generan una disminución en la presión de los alcantarillados y la cobertura vegetal y el sustrato filtran naturalmente el agua que retienen [13], [14], [18], en Colombia aún no se implementan tarifas de descuento por disminución de escorrentía y en el presente proyecto no se diseñó un sistema de aprovechamiento de agua, así que en esta categoría no se generan impactos económicamente cuantificables.

Los espacios urbanos verdes y de hábitat son un notable beneficio de la implementación de techos verdes, pero debido a que el valor del espacio verde debe derivarse estrictamente del valor del hábitat para las comunidades bióticas en los propios techos, lo cual es difícil de cuantificar [40] y está fuera del alcance de este proyecto, no se tendrá en cuenta como un impacto cuantificable.

Tabla 28. Impactos cuantificables en la implementación de un techo verde

Categoría	Beneficio	¿Se puede cuantificar?
Construcción y mantenimiento	Duplicar la vida del techo	Si
Manejo de aguas lluvias	Reducción del tamaño de la tubería de alcantarillado	Si
	Reducción de la necesidad de implementar prácticas para un mejor manejo de aguas lluvias	
Energía y aislamiento	Aislamiento adicional	Si
	Ahorros en energía	
Calidad del aire	Absorción de óxido de nitrógeno	Si
Hábitat/espacios verdes	Aumento de hábitat para insectos y aves	No
Isla de calor	Reducción de las temperaturas del aire	No

Fuente. Carter 2007

2.8.2 Costos. La realización del presupuesto se hizo en base a cotizaciones obtenidas de las empresas Casa Ambiente SAS y SIKA. Por medio de la empresa Casa Ambiente SAS se cotizaron cobertura vegetal, sustrato, agregado liviano, perfiles perimetrales, sistema de irrigación y demás elementos auxiliares. Las cotizaciones para impermeabilización, drenaje y Geotextiles se obtuvieron de la empresa SIKA. Los precios de instalación fueron dados por Casa Ambiente SAS e incluyen transporte para la zona de realización del proyecto, barrio la universidad.

Se utilizó como base para comparación y control de los precios, dadas por los proveedores y por bibliografía [15], una estimación aproximada de \$180.000/m² - \$200.000/m² de techo verde.

Teniendo en cuenta la información brindada por los proveedores, se realizó el presupuesto para la instalación del techo verde. Las cantidades se calcularon dependiendo del área de construcción y el consumo total del producto (**Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36 y Tabla 37**).

El costo total del proyecto se calculó en \$52.656.582,50 y el valor por metro cuadrado [m^2] dio de \$197.437,50 (**Tabla 38**), lo cual se encuentra dentro del rango de control anteriormente dicho.

Para el mantenimiento del techo se tomó un costo para el primer año de \$1.000.000, basados en recomendaciones de la empresa Casa Ambiente. Para el resto de años no se tomó en cuenta un costo de mantenimiento pues la universidad actualmente cuenta con un grupo de jardinería y el mantenimiento que requiere el techo por parte de personal es escaso, una vez la cobertura vegetal se establezca. Por otra parte, el sistema de irrigación se tiene para periodos de sequía donde el techo verde requiera riego adicional, de modo que no se consideró un costo fijo en todos los meses del año.

Con base en la caracterización eléctrica hecha a los aires del último piso del edificio, detallada en el apartado 3.2.3, se estimó un consumo eléctrico anual de \$8.998.849,95.

Por último, para la estimación del costo de la impermeabilización para el techo convencional, necesario para la realización del flujo de caja sin proyecto, se optó por una membrana Sika Acril Techo; las especificaciones técnicas dadas

por el proveedor y el área a trabajar permitieron realizar el cálculo. El costo de impermeabilizar toda el área del techo dio de \$19.311.245 (Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40, Tabla 41 y Tabla 42).

Tabla 29. Costo impermeabilización

Impermeabilizante	Presentación	Área [m ²]	Valor unitario [\$]	Valor empaque [\$]	Valor por m ² [\$]	Costo total [\$]
Sarnacol Cuñete 25 Kg	Cuñete 25 Kg	602,787	8600	2040000	8.600,00	5183968,2
Sikaplan-15R CO	Rollo 32 m2	602,787	26.713,00	854800	28.048,00	16906969,78
Sika MEtal Sheet	Lamina 1x2 m	602,787	9.303,00	307000	1.861,00	1121786,607
Sikaflex AT Connection	Cartucho 300 cc	602,787	24.800,00	24800	2.480,00	1494911,76
Sikaprimer 215	Unidad 250 ml	602,787	82.660,00	82660	331,00	199522,497
Sikadur 32 Primer	Unidad 3Kg	602,787	54.000,00	145530	216,00	130201,992
Instalación	-	602,787	-	-	15.000,00	9041805
TOTAL						34.079.165,83

Tabla 30. Costo capa protectora

Protección	Presentación	Consumo por m ²	Valor unitario [\$]	Valor empaque [\$]	Valor por m ² [\$]	Costo total [\$]
Geotextil Sika PP 1800	Rollo 1,80x100 m	1,03	3005	540900	3.095,00	1.865.625,77
TOTAL						1.865.625,77

Tabla 31. Costo lamina de drenaje

Lamina de Drenaje	Presentación	Consumo por m ²	Área a Trabajar [m ²]	Consumo total [m ²]	Valor por m ² [\$]	Costo Total [\$]
Lamina Sika Drenaje 32T	Rollo 2,0 x 25 m	1,03	266,7	274,701	11.382,00	3.035.579,40
Instalación	-	-	266,7	-	4.000,00	1.066.800,00
TOTAL						4.102.379,40

Tabla 32. Costo filtro

Filtro	Presentación	Consumo por m^2	Área a Trabajar [m^2]	Consumo total [m^2]	Valor por m^2 [\$]	Costo Total [\$]
Geotextil Sika PP 1800	Rollo 1,80x100 m	1,03	266,7	274,701	3.095,00	825.436,50
Instalación	-	-	266,7	-	4.000,00	1.066.800,00
					TOTAL	1.892.236,50

Tabla 33. Costo capa de drenaje

Agregado Liviano	Presentación	Consumo por m^2	Área a Trabajar [m^2]	Consumo total [m^2]	Valor por m^3 [\$]	Costo Total [\$]
Agregado Drenaje	-	0,02	266,7	5,334	40.000,00	213.360,00
Grava Senderos	-	0,02	68,71	1,3742	40.000,00	54.968,00
					TOTAL	268.328,00

Tabla 34. Costo medio de crecimiento

Sustrato	Presentación	Consumo por m^2	Área a Trabajar [m^2]	Consumo total [m^2]	Valor por m^3 [\$]	Costo Total [\$]
Mezcla casa ambiente	-	0,15	266,7	40,005	100.000,00	4.000.500,00
Cobertura vegetal	-	1	266,7	266,7	10.000,00	2.667.000,00
Instalación	-	-	266,7	-	20.000,00	5.334.000,00
					TOTAL	8.001.000,00

Tabla 35. Costo perfiles perimetrales

Confinamientos	Presentación	Longitud [m]	Valor por m [\$]	Costo Total [\$]
Perfil metálico	Unidad	108,5	18000	1953000
Instalación	-	108,5	4000	434000
			TOTAL	2.387.000

Tabla 36. Costo escalera

Acceso	Presentación	Cantidad	Costo Unidad	Costo total
Escalera metálica	Escalera	1	60847	60847
TOTAL				60.847

Tabla 37. Costo sistema de irrigación

Acceso	Medida	Cantidad	Costo unidad	Costo total
Sistema de irrigación	m ²	266,7	6000	1600200
Instalación	m ²	266,7	4000	1066800
TOTAL				1.600.200

Tabla 38. Costo total del techo verde

COSTO TOTAL [\$]	52.656.582,50
COSTO [\$/m²]	197.437,50

Tabla 39. Cotización impermeabilización techo convencional

PRODUCTO	Cantidad	Unidad	Unidad empaque	\$ unidad	Empaque	IVA	TOTAL
SikaFill 12 Power Impermeabilizante para cubiertas y terrazas.	4,4	Kg	4	11200	49280	9363	58643
	20	Kg	1	10200	204000	38760	242760
	230	Kg	1	9000	2070000	393300	2463300
SikaFelt FPP 30 (50 m2) Refuerzo de poliester, para impermeabilizaciones	50	m	1	1250	62500	11875	74375

Fuente. Sika

Tabla 40. Consumo por m2 impermeabilización de techo convencional

Etapa del sistema	Consumo <i>kg/m²</i>	
	Superficie lisa	Superficie rugosa
Imprimación	0,35	0,4
1 capa	0,55	0,65
Ref. SikaFelt FPP 30		
2 Capa	0,55	0,65
Total	1,45	1,7

Fuente. Sika**Tabla 41. Costo SikaFill 12 Power**

SikaFill 12 Power	
Área a impermeabilizar sin proyecto [<i>m²</i>]	602,787
Consumo [kg]	1024,7379
Consumo redondeado [kg]	5
Precio	\$12.316.500

Fuente. Sika**Tabla 42. Costo total impermeabilización convencional**

SikaFelt FPP 30	
Cantidad [Paquetes]	13
Precio	\$966.875
Instalación	
Mano de obra [\$/m ²]	10000
Precio total	\$6027870

Fuente. Propia

2.8.3 Ahorros considerados. Basado en los modelos de techos verdes y la estimación del ahorro energético de múltiples investigaciones estudiadas en la revisión bibliográfica, el ahorro de energía producto de la ejecución del proyecto se estimó del 25% según las características del proyecto y las condiciones climáticas y medio ambientales de la ciudad de Bucaramanga.

El impermeabilizante utilizado en la cubierta de la estructura tiene una vida útil de 20 años. Dado que el techo verde no será implementado en la totalidad de

la cubierta, el área expuesta y que requiere cambio de impermeabilizante es de 260,717 m². Por su parte, el área donde será ejecutado el proyecto generará ahorros de \$10.958.759 cada 20 años (**Tabla 43**).

Tabla 43. Ahorro por impermeabilización

Precio Total impermeabilización convencional sin proyecto	\$19.311.245
Precio Total impermeabilización convencional con proyecto	\$8.352.486
Ahorro	\$10.958.759

Fuente. Propia

La captación de CO_2 de los pastos se estimó en, aproximadamente, 865 kg $CO_2/m^2/año$. [42], [43], [44]. Se tomó el precio por kg de CO_2 de la media anual del 2016 para realizar la estimación del precio total del ahorro [45], [46]. La media anual para el 2016 fue de 5,35 euros/kg [47]. El área con cobertura vegetal fue de 266,7 m², dando un ahorro de \$3.702.663 anual.

2.8.4 Evaluación Económica. Mediante la evaluación económica se buscó medir la rentabilidad de la inversión del proyecto, en ella se destacaron las utilidades del proyecto sin considerar su financiamiento o como se distribuirán las ganancias generadas [49]. Los costos y beneficios constituyen el flujo económico [52].

Se proyectaron los flujos de caja a un tiempo de 40 años pues corresponde a la vida útil de un techo verde [40] y no se tuvo en cuenta la inflación en los precios, es decir, los valores se mantuvieron constantes.

- **Flujo de caja sin techo verde**

En la realización del flujo de caja sin techo verde se tuvieron en cuenta costos por consumo energético y costos por cambio de la impermeabilización (**Tabla 44**).

- **Flujo de caja con techo verde**

Se tuvieron en cuenta ingresos por ahorro en consumo energético, ahorro por CO₂ e impermeabilización. En cuanto a los costos se tuvo en cuenta la inversión inicial, el consumo energético de los aires acondicionados, el costo de mantenimiento y el cambio de impermeabilización cada 20 años (**Tabla 45**).

- **Flujo de caja incremental**

En el flujo de caja incremental se restaron los flujos de caja planeados sin proyecto y con proyecto (**Tabla 46**).

Tabla 44. Flujo de caja sin techo verde

FLUJO DE CAJA SIN PROYECTO	0	1	2	3	4	5
EGRESOS						
Consumo energético	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
Impermeabilización	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Total egresos	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
Saldo Final	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25

6	7	8	9	10	11	12	13	14
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25

15	16	17	18	19	20	21	22	23
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$19.311.245,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$23.809.377,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$23.809.377,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25

24	25	26	27	28	29	30	31	32
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25

33	34	35	36	37	38	39	40
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$19.311.245,00
\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$4.498.132,25	\$23.809.377,25
-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$4.498.132,25	-\$23.809.377,25

Fuente. Propia

Tabla 45. Flujo de caja con techo verde

FLUJO DE CAJA CON PROYECTO	0	1	2	3	4	5
INGRESOS						
Ahorro en consumo energético	-	\$1.124.533	\$1.124.533	\$1.124.533	\$1.124.533	\$1.124.533
Ahorro CO2	-	\$3.702.663	\$3.702.663	\$ 3.702.663	\$3.702.663	\$3.702.663
Ahorro impermeabilización	-	-	-	-	-	-
Total Ingresos	-	4.827.196	\$4.827.196	\$4.827.196	\$4.827.196	\$4.827.196
EGRESOS						
Costo Proyecto	\$ 52.656.582,50					
Consumo energético	4.498.132	\$4.498.132	\$4.498.132	\$4.498.132	\$ 4.498.132	\$4.498.132
Costo de mantenimiento	\$ 1.000.000	-	-	-	-	-
Impermeabilización	-	-	-	-	-	-
Total Egresos	\$ 58.154.715	\$ 4.498.132	\$4.498.132	\$4.498.132	\$ 4.498.132	\$4.498.132
Saldo final	-\$58.154.715	\$329.064	\$329.064	\$329.064	\$329.064	\$329.064

6	7	8	9	10	11	12	13	14
\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533
\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064

15	16	17	18	19	20	21	22	23
\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533
\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 10.958.759	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 15.785.955	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 19.311.245	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 23.809.377	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064	-\$ 8.023.422	\$ 329.064	\$ 329.064	\$ 329.064

24	25	26	27	28	29	30	31	32
\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533
\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ 329.064	\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064

33	34	35	36	37	38	39	40
\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533	\$ 1.124.533
\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663	\$ 3.702.663
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 10.958.759
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 19.311.245
\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 4.498.132	\$ 23.809.377
-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	-\$ 329.064	\$ 18.982.181

Tabla 46. Flujo de caja incremental y Flujo de caja incremental acumulado

FLUJO DE CAJA CON PROYECTO	0	1	2	3	4	5
Flujo de caja incremental	-\$53.656.583	\$4.827.196	\$4.827.196	\$4.827.196	\$4.827.196	\$4.827.196
Flujo de caja incremental Acumulado	-\$53.656.583	-\$48.829.386	-\$44.002.190	-\$39.174.994	-\$34.347.798	-\$29.520.602

6	7	8	9	10	11	12	13	14
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196
-\$ 24.693.406	-\$ 19.866.210	-\$ 15.039.014	-\$ 10.211.818	-\$ 5.384.622	-\$ 557.426	\$ 4.269.770	\$ 9.096.966	\$ 13.924.162

15	16	17	18	19	20	21	22	23
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 15.785.955	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.827.196
\$ 18.751.358	\$ 23.578.555	\$ 28.405.751	\$ 33.232.947	\$ 38.060.143	\$ 53.846.098	\$ 58.673.294	\$ 63.500.490	\$ 68.327.686

24	25	26	27	28	29	30	31	32
\$ 4.827.196	\$ 4.827.196	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068
\$ 73.154.882	\$ 77.982.078	\$ 82.151.147	\$ 86.320.215	\$ 90.489.284	\$ 94.658.352	\$ 98.827.420	\$ 102.996.489	\$ 107.165.557

33	34	35	36	37	38	39	40
\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 4.169.068	\$ 42.791.558
\$ 111.334.626	\$ 115.503.694	\$ 119.672.763	\$ 123.841.831	\$ 128.010.900	\$ 132.179.968	\$ 136.349.036	\$ 179.140.595

- **TIO, VPN y TIR**

El VPN (Valor presente neto) mide la rentabilidad en valores monetarios que exceden a la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión, tiene en cuenta el valor tiempo del dinero [49]. Se calculó la diferencia entre los ingresos y egreso, incluyendo la inversión como un egreso, a valores actualizados [50]. Con el flujo de caja incremental se calcularon los VPN para diferentes tasas internas de descuento. La TIR (tasa interna de retorno) se buscó conocer la tasa de interés o de rentabilidad del proyecto durante toda su vida útil. La TIR se define, de manera operativa, como la tasa de descuento que hace que el VPN del proyecto sea igual a cero [49]. La TIR incremental del proyecto dio de 12%. Por su parte, la TIO (Tasa interna de descuento) es la tasa mínima a la cual la empresa o el ente está dispuesto a correr el riesgo de la inversión [50]. Para proyectos sociales, en Colombia la TIO se toma de 10% [51]. La TIR dio superior a la TIO, por lo tanto, el proyecto es rentable en función de dichos indicadores económicos. Para una TIO del 10% el VPN dio de \$11.302.596.

Tabla 47. VPN para diferentes tasas de descuento

TASA	VPN
0%	\$ 325.233.605
5%	\$ 76.737.919
10%	\$ 11.302.596
15%	-\$ 12.229.128
20%	-\$ 23.305.342
25%	-\$ 29.630.410
30%	-\$ 33.729.143
35%	-\$ 36.613.159
40%	-\$ 38.759.197
45%	-\$ 40.421.358

Figura 31. VPN Vs. TIO

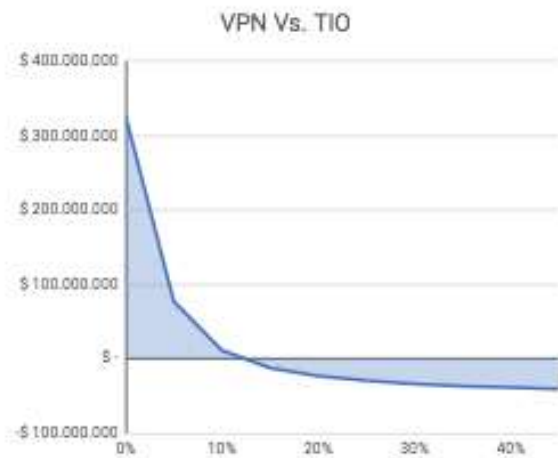


Tabla 48. VPN y TIR del proyecto

VPN	\$11.302.596,18
TIO	10%
TIR	12%

- **RBC (Relación beneficio costo)**

La relación beneficio costo es una correlación entre el valor presente de los beneficios del proyecto entre el valor presente de los costos dada una determinada tasa de descuento [12]. Como se había mencionado anteriormente la tasa de descuento a utilizar fue del 10%. La RCB dio de 1,21 lo que indica que los beneficios a pesos de hoy no alcanzan a recuperar los costos del proyecto.

Tabla 49. RCB del proyecto

VPB	\$64.959.178,67
VPC	\$53.656.582,50
RCB	1,21

- **PAYBACK**

Con el periodo de restitución (payback) se buscó medir la bondad del proyecto de inversión en términos del tiempo que se demora la recuperación de la inversión. Es decir, equivale al número de periodos requeridos para que los flujos de caja netos recuperen la inversión al 0% de interés. No tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo [53]. Para el proyecto se calculó un periodo de restitución de 9,014 años.

Tabla 50. Payback del proyecto

PAYBACK	
Ult periodo con FA negativo	9
Valor Absoluto ultimo FA negativo	\$85.205
Valor del flujo de caja del periodo siguiente	\$5.952.375
PB	9,014

3. CONCLUSIONES

El último piso del edificio Álvaro Beltrán de la UIS presenta un consumo energético anual por uso de aires acondicionados de 21336 Kwh.

El edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la UIS cuenta con condiciones arquitectónicas óptimas para implementar un techo verde en la cubierta. Estructuralmente se cuenta con limitantes que reducen el área de implementación, sin embargo, no se hizo necesario el diseño de refuerzo para la edificación.

El techo verde diseñado es de tipo extensivo, autorregulado, con un espesor que no supera los 35 cm. Sus capas están conformadas por cobertura vegetal, sustrato, agregado de drenaje, láminas de drenaje, geotextiles de protección y filtro e impermeabilizante. El principal objetivo del proyecto de reducir la temperatura en el último piso, las condiciones climatológicas y la poca accesibilidad determinaron el uso de pastos como cobertura vegetal. La poca pendiente de la cubierta hizo necesaria la utilización de una capa de agregado para garantizar un correcto drenaje del agua. Se adoptó, además, un sistema de irrigación para ocasiones excepcionales donde haya sequía y sea necesaria la irrigación adicional. La propuesta de techo verde no requiere un régimen de mantenimiento durante toda su vida útil; los primeros meses del proyecto requieren supervisión y mantenimiento mientras la cobertura vegetal se establece.

Mediante el análisis multi-criterio se realizó una matriz de selección, donde se evaluaron las 4 opciones de techo verdes que se tenían, dando como prioridad a la finalidad de disminuir la temperatura en el piso inferior del ABP. Cada uno de los diseños cumplía los requisitos mínimos técnicos para asegurar el buen

funcionamiento de todo el sistema; cada material fue especialmente pensado para que las funciones se cumplieran de manera óptima. Se seleccionó la propuesta de diseño No. 1, con un área de 266,7 m² y conformado por cobertura vegetal de pastos, pues dio un porcentaje de factibilidad del cien por ciento y el área afectada por el techo verde era mayor comparada con la propuesta No. 3, la cual también obtuvo un porcentaje de factibilidad del cien por ciento. En la ciudad de Bucaramanga se cuenta con la tecnología, los materiales y el personal necesarios para implementar un techo verde con las características descritas en el presente documento.

Mediante indicadores económicos como el VPN, la TIR, la TIO y la RBC se determinó la factibilidad económica del proyecto. La TIR del proyecto dio de 12%, superior a la exigida para proyectos de carácter social, 10%. El VPN para una TIO del 10% dio de \$11.302.596, es decir, se conseguirá maximizar la inversión inicial, la implementación del proyecto significará ganancias por \$11.302.596. La RBC dio de 1,21, lo que significa que por cada peso invertido se ganarán 0,21 pesos. El proyecto tiene un tiempo de retorno de la inversión de 9 años, 1 mes y 21 días y es rentable.

4. RECOMENDACIONES

Para mejorar la rentabilidad del proyecto se podría diseñar un plan de manejo de aguas lluvias, donde estas sean destinadas para uso de los usuarios del edificio lo que significaría ahorros por consumo de agua. Se recomienda que el gobierno adopte incentivos con los cuales se logre compensar la inversión inicial y se motive tanto a inversionistas privados como a inversionistas públicos, a implementar esta tecnología.

Dadas las limitaciones encontradas por las cargas adicionales que adquiere la estructura con un sistema de techos verdes, se proponen futuros trabajos investigativos para aliviar el peso de los materiales de las diferentes capas que lo componen.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CONFERENCIA DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO SOSTENIBLE RIO +20. (20-22, JUNIO, 2012: Rio de Janeiro, Brasil). ONU Hábitat, 2012.

[2] DELLEPIANE, Santiago. "Ciudades + verdes". Tesis de grado [Diseño Industrial]. Montevideo: Escuela Universitaria Centro de Diseño, 2014.

[3] MENÉNDEZ, Helena Granados. Rehabilitación energética de edificios. Tornapunta, 2010.

[4] NITTA, Yoshiteru, et al. New photovoltaic system exploited by the unique characteristics in thin film Si modules. En Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on. IEEE, 2003. p. 1903-1907.

[5] CIDELL, Julie. Building green: The emerging geography of LEED-certified buildings and professionals. The Professional Geographer, 2009, vol. 61, no 2, p. 200-215.

[6] CHANAMPA, Mariana, et al. Tecnologías verdes como instrumentos de rehabilitación arquitectónica. En Ponencias del Congreso SB10mad, Edificación sostenible, Revitalización y Rehabilitación de barrios(Madrid 28--30 de abril de 2010). ISBN. 2010.

[7] OSMA, Germán. Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el Edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. Tesis de maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.

[8] ALEXANDRI, Eleftheria; JONES, Phil. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, no 4, p. 480-493.

[9] KOSAREO, Lisa; RIES, Robert. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and environment*, 2007, vol. 42, no 7, p. 2606-2613.

[10] IDEAM. Tiempo y clima [en línea]. Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>> [Citado el 10 de octubre de 2017].

[11] UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Principios del Sistema de Gestión Integrado [en línea]. Disponible en: <<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/sistemaGestionCalidad/acreditacionUIS/principios.html>> [citado el 10 de octubre de 2017].

[12] COTES, Marlon y HOYOS, Ingrid. Estudio de vulnerabilidad sísmica del edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Monografía [Especialista en Estructuras]. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de físico-mecánicas. 2016.

[13] MINKE, Gernot. Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos. Primera edición. Kassel: Editorial.

[14] STATE OF VICTORIA. Growing Green Guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia. Victoria: National Library of Australia, 2014. 142 p. ISBN 978-1-74326-715-8.

[15] IBAÑEZ, Ricardo. Techos vivos extensivos: una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. En: Alarife: Revista de arquitectura. N°. 16, 2008; 16 p. ISSN 1657 – 61.

[16] SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Guía de techos verdes en Bogotá [En línea]. Disponible en: <http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=f807042d-064e-4a7a-adf1-75e1e4b7aaaa&groupId=10157> [Citado en 20 de octubre del 2017]

[17] OFFICE OF THE CHIEF BUILDING OFFICIAL, TORONTO BUILDING, CITY OF TORONTO. Toronto Green Roof Construction Standard: Supplementary Guidelines [En línea]. Disponible en: <https://www1.toronto.ca/city_of_toronto/city_planning/zoning__environment/files/pdf/GreenRoof-supGuidelines.pdf> [Citado el 20 de octubre del 2017].

[18] LUCKETT, Kelly. Green Roof Construction and Maintenance. Saint Louis: McGraw Hill Professional, 2009. 208 p. ISBN: 978-0-07-160881-7

[19] CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. Recomendaciones técnicas para proyectos de cubiertas vegetales. Santiago: Publicaciones CDT, 2010. 84 p. ISBN: 978-956-7911-14-1

[14][20] WARK, Christopher. WARK, Wendy. Green Roof Specifications and Standards: Establishing an emerging technology. En: The Construction Specifier. Vol. 56, No. 8(Agosto, 2003); 12 p.

[21] AYUNTAMIENTO DE BARCELONA. Guía de azoteas vivas y cubiertas verdes. Barcelona: Área de Ecología urbana, 2015. 41 p.

[22] FLL. "Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing." Forschungsgesellschaft

Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Bonn, Germany, 119 p.

[23] NASA. NASA & GREEN ROOF RESEARCH: Utilizing New Technologies to Update an Old Concept [En línea]. <https://www.nasa.gov/pdf/665642main_NASA_and_Green_Roof_Research_Revise_9_6_2012.pdf> [Citado el 20 de octubre del 2017].

[24] THE NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL (NRDC). Looking Up: How Green Roofs and Cool Roofs Can Reduce Energy Use, Address Climate Change, and Protect Water Resources in Southern California [En línea]. Disponible en: <<https://www.nrdc.org/sites/default/files/GreenRoofsReport.pdf>> [Citado el 20 de octubre del 2017].

[25] KÖHLER, Manfred, et al. Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate. En 38th International Federation of Landscape Architects World Congress, Singapore. 2001.

[26] GARRISON, Noah; HOROWITZ, Cara; LUNGHINO, Chris Ann. Looking up: how green roofs and cool roofs can reduce energy use, address climate change, and protect water resources in Southern California. Natural Resources Defence Council, 2012.

[27] RIVERA DE LA ROSA, Chanely. Cubiertas vegetales en la región del Caribe. Caso de estudio: República Dominicana. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya. 2015

[28] CARPENTER, S. Growing Green Guide: A Guide to Green Roofs, Walls & Facades in Melbourne and Victoria, Australia. Australia: State of Victoria, 2014.

[29] ORDÓÑEZ LÓPEZ, Eduardo Ernesto; PÉREZ SÁNCHEZ, María Milagrosa. Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. Acta universitaria, 2015, vol. 25, no 5, p. 11-19.

[30] CELIK, Serdar; RETZLAFF, William A.; MORGAN, Susan. Evaluation of energy savings for buildings with green roofs having different vegetation. 2010.

[31] NIACHOU, Aikaterini, et al. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. Energy and buildings, 2001, vol. 33, no 7, p. 719-729.

[32] PECK, Steven W.; KUHN, Monica. Design guidelines for green roofs. Ontario Association of Architects, 2003.

[33] ISLANDS, EPA Reducing Urban Heat. Compendium of strategies. Urban Heat Island Basics, 2011, p. 1-22.

[34] CHEN, Dong; WILLIAMS, Nicholas. Green Roofs as an Adaptation to Climate Change-Modelling the Green Roof at the Burnley Campus, the University of Melbourne. 2010.

[35] ALEXANDRI, Eleftheria; JONES, Phil. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. Building and Environment, 2008, vol. 43, no 4, p. 480-493.

[36] MITCHEL, G. Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el Complejo E3T de la Universidad Industrial de Santander.

[37] SALDAÑA, Cristian y PRECIADO, Edgar. Caracterización energética de los edificios Álvaro Beltrán Pinzón y Laboratorio Hidráulica de la universidad industrial de Santander aplicando la metodología del sistema de gestión integral de la energía (SGIE). Ingeniero Electricista. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2016.

[38] FUNDACIÓ DE LA JARDINERIA I EL PAISATGE. NTJ11C, Normes tecnològiques d'enjardinaments especials. Barcelona, 2012.

[39] ZINCO. Cubiertas Verdes Extensivas. [En Línea]. Disponible en: <http://www.zincocubiertasecologicas.es/guias_tecnicas/guias/Cubiertas_verdes_extensivas.pdf> [Citado el 16 de Octubre del 2017]

[40] CARTER, Timothy; KEELER, Andrew. Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of environmental management*, 2008, vol. 87, no 3, p. 350-363.

[41] HANLEY, Nick. SPASH, Clive. *Cost-Benefit Analysis and the Environment*. St Andrews, 1993. University of St Andrews.

[42] FOLLETT, Ronald F.; KIMBLE, John M. (ed.). *The Potential of U.S Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. CRC Press, 2005. ISBN 1-56670-554-1

[43] CENTRAL MINNESOTA. A Landowner’s Guide to Carbon Sequestration Credits [En Línea]. Disponible en: <<http://www.myminnesotawoods.umn.edu/wpcontent/uploads/2009/10/landowner-guide-carbon-seq1-5-12.pdf>> [Citado el 16 de octubre del 2017]

[44] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. Best Practices for: Terrestrial Sequestration of Carbon Dioxide. [En línea] <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Carbon-Storage/Project-Portfolio/BPM_Terrestrial.pdf> [Citado el 16 de Octubre del 2017]

[45] ARES, Elena; DELEBARRE, Jeanne. The Carbon Price Floor. [En Línea]. Disponible en: <[www. parliament.uk/commons-library](http://www.parliament.uk/commons-library)> [Citado el 16 de Octubre del 2017]

[46] WORLD BANK GROUP. ECOFYS. Carbon Pricing Watch 2016. [En Línea]. Disponible en: <https://www.ecfys.com/files/files/world-bank-group_ecofys-carbon-pricing-watch_160525.pdf> [Citado el 16 de Octubre del 2017]

[47] SENDECO. [En Línea]. Disponible en: <<http://www.sendeco2.com/es/precios-co2>> [Citado el 16 de Octubre del 2017]

[48] ROJAS, Miguel. Gerencia de la construcción. Guía para profesionales. Ecoe Ediciones. Bogotá, 2008. ISBN: 9789586485487.

[49] CÓRDOBA, Marcial. Formulación y Evaluación de Proyectos. Ecoe Ediciones. Bogotá, 2011. ISBN: 9789586487009.

[50] MORENO, Tercila. Emprendimiento y Plan de Negocio. Ril Editores. Santiago, 2016. ISBN: 9789560102768.

[51] CABEZA DE VERGARA, Leonor. CASTRILLÓN CIFUENTES, Jaime. Matemáticas Financieras. Quinta Edición. Universidad del Norte. Barranquilla, 2012. ISBN: 9789587413038.

[52] LAVANDA, D. Evaluación económico y financiero del proyecto. Universidad Inca Garcilaso de la Vega. Perú, 2005.

[53] TORO, Francisco. Costos ABC y Presupuestos. Herramientas Para la Productividad. Ecoe Ediciones. Bogotá, 2016. ISBN: 9789587713046.

[54] VALBUENA, Steven. TIBASOSA, Adriana. Estudio de pre-factibilidad técnica, ambiental y económica para la implementación de terrazas verdes en el centro empresarial la Castellana de Bogotá. 2016, 96 h. Trabajo de grado (Administrador ambiental). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de medio ambiente y recursos ambientales. Disponible en la biblioteca en línea de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas: <<http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3341>> [citado en 20 octubre del 2017]