



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Geomática

**CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS
CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN
EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO
CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DE
VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)**

Ing. Kevin Waldemar Nufio Martínez

Asesorado por la Mtra. Licda. Sara Michelle Catalán Armas

Guatemala, junio de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS
CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN
EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO
CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DE
VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. KEVIN WALDEMAR NUFIO MARTÍNEZ

ASESORADO POR LA MTRA. LICDA. SARA MICHELLE CATALÁN ARMAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN GEOMÁTICA

GUATEMALA, JUNIO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Turk
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 23 de mayo de 2020.



Ing. Kevin Waldemar Nufio Martínez



Facultad de Ingeniería

Decanato

24189101-

24189102

secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.511.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)**, presentado por: **Ing. Kevin Waldemar Nufio Martínez**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada



Decana

Guatemala, junio de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, junio de 2023

LNG.EEP.OI.511.2023

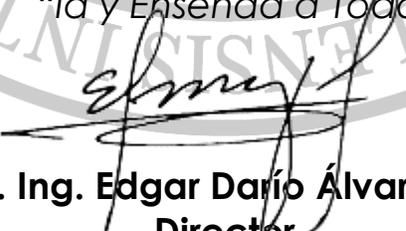
En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SI SISTEMA FOTOGAMÉTRICO DE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)”

presentado por **Ing. Kevin Waldemar Nufio Martínez** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 05 de septiembre 2020.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: "CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)" del estudiante Kevin Waldemar Nufio Martínez quien se identifica con número de carné 200610487 del programa de **Maestría en Geomática**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

MARLON ANTONIO PEREZ TURK
INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS
COLEGIADO No. 4492

MSc. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
Coordinador

Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 25 de agosto de 2020

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, Kevin Waldemar Nufio Martínez, quien se identifica con carnet 200610487, procedo a dar el aval correspondiente a la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE FIRMAS ESPECTRALES PARA LOS TIPOS CONSTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE GUATEMALA, CONTENIDAS EN EL PROYECTO RESIS II EN LAS BANDAS R, G, B, INFRARROJO (IR) E INFRARROJO CERCANO (NIR), UTILIZANDO ESPECTRÓMETRO CON SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DEVEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO CIVIL (VANT)”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Geomática en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Atentamente,

“Id y Enseñad A Todos”



MSc. Licda. Sara Michelle Catalán Armas

Asesora

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la oportunidad de la vida y del saber.
Mis padres	Waldemar Nufio Reyes y Kary Lorena Martínez Pinelo, mis mejores amigos y mi mayor ejemplo de vida, los amo.
Mis abuelos	Carlos Martínez, Guillermo Nufio, Lucia Reyes y Marta Pinelo, que me han enseñado el amor desinteresado de vivir por el bien de los demás.
Mi esposa	Julissa Reyes Quiroa, por ser mi otra mitad y por tu apoyo incondicional, te amo.
Mis hermanas	Nandy Lorena y Lilian Carlota, por ser siempre un ejemplo de vida y por ser una inspiración de superación personal.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi segundo hogar y permitirme ser un profesional de éxito en la vida.
Facultad de Agronomía USAC	Por haberme dado tanto conocimiento no solo de estudios si no de vida.
MSc. Michelle Catalán	Por su amistad, su paciencia y sus conocimientos aportados a este documento y en mi carrera profesional
MSc. Miguel Ávila	Por su amistad, ser una persona desinteresada con el conocimiento que posee y por sus aportes a este documento.
MSc. Eduardo Morales	Por su amistad y por el compromiso con mi tema y el apoyo brindado durante la experimentación.
Ing. Daniel Gamboa	Por todo el apoyo brindado en la realización de mi experimento y su paciencia, muchas gracias.
Msc. Yuri Castro	Por toda su ayuda y por guiarnos en la finalización de este documento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXV
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Estudios previos	1
1.2. Alcances	4
1.2.1. Perspectiva investigativa	5
1.2.2. Alcance (descriptivo/explicativo/correlacional).....	5
1.2.3. Perspectiva técnica.....	6
1.2.4. Perspectiva de resultados.....	7
1.3. Justificación	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Teledetección	9
2.2. Geomática	9
2.3. Fotogrametría	10
2.4. Fotointerpretación.....	10
2.5. Reflectancia.....	11

2.6.	Vehículo aéreo no tripulado	12
2.7.	Uso de VANT (vehículo aéreo no tripulado).....	12
2.8.	Firmas espectrales.....	13
2.9.	Firmas multibanda.....	13
2.10.	Imagen <i>raster</i>	14
2.11.	Tratamientos en preproceso de materiales.....	14
2.12.	Sistematización de la información.....	15
2.13.	Modelo digital de elevación.....	16
2.14.	Número digital de píxel.....	16
2.15.	Cartografía	17
2.16.	Sistema de información geográfica	17
2.17.	Parámetros de drones.....	18
2.18.	Espectro electromagnético de firmas espectrales.....	19
2.19.	Restitución catastral.....	19
2.20.	Método de clasificación árbol de decisiones	20
2.21.	Proyecto RESIS II	20
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	23
3.1.	Experimento 1 cuantificación de firmas espectrales de materiales de construcción.....	24
3.2.	Experimento 2 vuelos de extracción de bandas multiespectrales a 3 alturas distintas, para determinación y reconocimiento de los materiales de construcción en las bandas R, G, B, IR y NIR, con VANT de uso civil	33
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
4.1.	Experimento 1 cuantificación de firmas espectrales de materiales de construcción delimitados como principales de estructuras primarias de viviendas en Guatemala.	41

4.2.	Experimento 2 vuelos de extracción de bandas multiespectrales a 3 alturas distintas, para determinación y reconocimiento de los materiales de construcción en las bandas R, G, B, Ir y Nlr, con VANT de uso civil	44
4.2.1.	Resultados a diferentes alturas:	44
CONCLUSIONES		49
RECOMENDACIONES		53
REFERENCIAS		55
APÉNDICES		61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de ubicación de vuelos VANT para análisis	XXIII
2.	Imagen de materiales de construcción en bandas espectrales	25
3.	Imagen de tendencia central de banda azul.....	26
4.	Tendencia central banda azul sin tratamiento.....	30
5.	Tendencia central banda azul tratamiento repello.....	31
6.	Tendencia central banda azul tratamiento pintura de agua.....	32
7.	Tendencia central banda azul tratamiento pintura de aceite	33
8.	Fotografías aéreas tomadas a 50, 75 y 100 metros de izquierda a derecha respectivamente	34
9.	Resultados de la dispersión de datos de respuesta espectral en la banda azul para los materiales de construcción, obtenidos a través de vuelo fotogramétrico de VANT de uso civil a 50 metros.....	35

TABLAS

I.	Materiales de construcción.....	23
II.	Rangos de firmas espectrales en no digital por material de construcción en día nublado.	27
III.	Rangos de firmas espectrales en no digital por material de construcción en día soleado.....	28
IV.	Comparación de la clasificación de números digitales de materiales de construcción	36
V.	Cuadro comparativo rangos y desviaciones estándar.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
Q	Quetzales

GLOSARIO

ARCGIS	Software que se utiliza para crear, visualizar, analizar y compartir datos espaciales.
B	Banda azul.
Espectrómetro	Dispositivo que mide la intensidad de la luz en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.
G	Banda verde.
Geomática	<i>Disciplina que combina la geografía y la tecnología de la información para capturar, analizar y visualizar datos geoespaciales.</i>
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
m	Metros.
ND	Número digital.
NIR	Banda infrarroja cercana.
Píxel	Menor unidad homogénea de una imagen digital.

R	Banda roja.
Reflectancia	Capacidad de un objeto para reflejar la luz.
UAS	Sistema de aeronaves no tripuladas (por sus siglas en inglés <i>unmanned aircraft system</i>).
UAV	Vehículo aéreo no tripulado (por sus siglas en inglés <i>unmanned aerial vehicle</i>).
UAVS	Sistema de vehículos aéreos no tripulados (por sus siglas en inglés <i>unmanned aircraft vehicle system</i>).
VANT	Vehículo aéreo no tripulado.

RESUMEN

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT), son herramientas tecnológicas que se han utilizado para distintas tareas de recolección de información cartográfica y fotogramétrica, incorporando distintas maneras de obtener la información a través de sensores remotos especializados como las cámaras multiespectrales, destinados a recabar datos específicos para el análisis de datos en campo. La identificación georreferenciada de información catastral es muy importante para la gestión de riesgo y por ende para el ordenamiento territorial, la posibilidad de realizar muestreos de las zonas habitadas por el ser humano y de sus condiciones constructivas, se hace necesario como información de análisis de diferentes riesgos, así como para estudios de uso socioeconómico para recaudación fiscal entre muchas otras cosas importantes para la toma de decisiones.

Este estudio se realizó con la finalidad de investigar la capacidad de vehículos aéreos no tripulados de uso civil, para la captación de información de firmas espectrales, representadas en números digitales de píxel, para la identificación de materiales de construcción típicos de Guatemala. Para esto se utilizó un sensor multiespectral, con la capacidad de recabar información de las bandas azul, verde, roja, infrarrojo e infrarrojo cercano, con el propósito de realizar una identificación de los números digitales de cada banda de 4 materiales de construcción entre los que se encuentran el block, adobe, ladrillo y la madera, detallados en el cómo los tipos constructivos más comunes del país. Además de detallar estos valores de píxel en su número digital, se realizaron vuelos de VANT de uso civil con drones de la empresa IDI a los cuales se les adaptó el sensor

multiespectral para determinar la posibilidad de este en la identificación de materiales de construcción a distintas alturas de vuelo.

Los análisis estadísticos de dispersión de datos extraídos de las imágenes de los vuelos multiespectrales permitieron identificar los rangos de la información recabada en comparación con los datos detallados de cada uno de los materiales, con la finalidad de realizar una comparación de los números digitales identificados en las fotografías aéreas obtenidas en los vuelos fotogramétricos. A partir de esta información se evidenció que la cámara multiespectral en las bandas detalladas a utilizar, no obtuvo resultados positivos para la identificación de los materiales de construcción tanto en la extracción de firmas de los materiales como en la identificación de las mismas en los vuelos fotogramétricos, esto debido a que se hace difícil diferenciar entre materiales de construcción y a que los VANT de uso civil tienen una capacidad limitada para la toma de información en ángulos, que durante los vuelos permitieran la clasificación exacta de los materiales de construcción en su número digital de píxel.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Guatemala, por su ubicación geográfica y la interacción de 3 placas tectónicas dentro del territorio, tiene una alta recurrencia de eventos sísmicos, por lo cual es uno de los países que se consideraron en el estudio RESIS II de identificación de tipos constructivos en Centro América; además se cuenta en Guatemala, con estudios que determinan matemáticamente la interacción de las curvas de atenuación sísmica con estos materiales de construcción. Por lo tanto es imperativo conocer la distribución y ubicación geográfica de estos materiales con exactitud y así poder realizar cálculos detallados del daño que estas ondas sísmicas pueden generar en interacción con los materiales constructivos, sin embargo en la actualidad, los muestreos de materiales de construcción utilizan metodologías que no son exactas, al tener que interpolar muchos datos dado que los muestreos pueden alcanzar solo pequeñas porciones del territorio, debido a la inaccesibilidad de las áreas donde se encuentran las más altas vulnerabilidades, o que conllevan una temporalidad extendida para poder tener resultados detallados en las grandes ciudades, por la forma tan agresiva y desordenada con la que se desarrollan las áreas urbanas, donde los daños y las pérdidas de vidas pueden llegar a tener sus más altos valores.

- Descripción del problema

La creciente vulnerabilidad constructiva en Guatemala y la alta probabilidad de la existencia de eventos sísmicos que como amenaza, aumenta exponencialmente el riesgo en nuestros territorios urbanos y rurales hacen

necesario mejorar las técnicas de muestreo. Es por esto que se hace importante determinar una manera viable de obtener información, para la identificación de las tipologías constructivas más comunes, en edificaciones destinadas a viviendas en Guatemala por lo que es imperativo evaluar la posibilidad de poder identificarlas a través de la caracterización espectral con métodos geomáticos. Esta técnica se utiliza vastamente en el campo agrícola y forestal pudiendo identificar de manera separada especies forestales y cultivos con los valores de la respuesta espectral de cada variedad, llegando incluso a poder analizar variables de salud y necesidades de cultivos o plantaciones forestales gracias a poder identificar variabilidad en la respuesta espectral de cada especie, sin embargo en los materiales constructivos, se desconocen estos valores espectrales lo que imposibilita el reconocimiento de los mismos utilizando técnicas parecidas, que acelerarían el proceso de muestreos de áreas vulnerables a sismos y otros riesgos.

- Formulación del problema

Actualmente en Guatemala se utilizan indiscriminadamente los vehículos aéreos no tripulados (VANT) de usos civil, que normalmente cuentan con espectrómetros sencillos que pueden medir las respuestas en las bandas R, G, B y algunos otros cuentan también con las bandas del infrarrojo (Ir) e infrarrojo cercano (Nir), para obtener ortofotos, imágenes, fotografías y videos; los cuales son utilizados para muchas metodologías de muestreo. Además estas técnicas geomáticas de muestreo con sensoramiento remoto, no cuentan, en muchas ocasiones, con validación de la calidad y precisión de la información y en el caso de la identificación de tipos constructivos de vivienda, se hace prácticamente imposible la identificación de materiales constructivos en una fotografía aérea, debido a que el ojo humano tiene limitantes en la interpretación de los materiales a simple vista, en las resoluciones y escalas que se trabajan estas ortofotos, por

lo complejo de la distribución espacial así como la heterogeneidad de aparición de los materiales en áreas que han contado con poca implementación de ordenamiento territorial.

- Delimitación del problema

Aplicar técnicas geomáticas, como las que se utilizan para el reconocimiento de especies en las áreas agrícolas, en la identificación de materiales de construcción definidos en el estudio RESIS II es prácticamente imposible, al no contar con la caracterización de las firmas espectrales en dichos materiales por lo que cualquier metodología que se plantee deberá contar con estos datos antes de poder plantear la calidad de la técnica de muestreo implementada.

En ese caso debemos identificar como pregunta principal ¿Cuál es la respuesta espectral de los materiales constructivos tipificados en el Proyecto RESIS II, madera, block, adobe y ladrillo; utilizando métodos de sensoramiento remoto con los VANT de tecnología civil y sus respectivos sensores multiespectrales? De la cual se derivan las siguientes preguntas secundarias:

- ¿Cuál es el rango de fiabilidad en la diferenciación de materiales de construcción típicos en Guatemala según el proyecto RESIS II, a través de la extracción de respuesta espectral utilizando los números digitales de *raster* en imágenes de espectrómetro de VANT de uso civil?
- ¿Qué tipo de variables afectan el reconocimiento de la caracterización espectral definida con espectrómetro, con fotografías tomadas con cámara de VANT de uso civil?

- ¿Qué precisión tiene la caracterización remota de materiales constructivos, en su respuesta espectral en las bandas R, G, B, IR y NIR para identificación con VANT, de los tipos constructivos típicos en Guatemala, madera, block, ladrillo y adobe; según el Proyecto RESIS II?

OBJETIVOS

General

Caracterizar la respuesta de la firma espectral utilizando números digitales de pixel en los materiales de construcción, con los que se elaboran las estructuras primarias de viviendas en Guatemala, definidos dentro del proyecto RESIS II, en las bandas R, G, B, Infrarrojo (IR) e infrarrojo cercano (NIR), a través de espectrómetro, con la finalidad de poder identificarlas en vuelos de VANT de uso civil.

Específicos

1. Cuantificar los valores de números digitales de la caracterización, obtenidas a través de métodos directos con espectrómetro.
2. Determinación de 3 alturas dentro de los rangos permisibles dentro de las regulaciones de aeronáutica civil para determinar la altura a la que se encuentra un mejor reconocimiento de las bandas R, G, B, IR y NIR con VANT de uso civil, en las pruebas de campo.
3. Determinar la precisión del reconocimiento, con la cámara de VANT de uso civil, de la respuesta en las bandas R, G, B, Ir y NIR, de los materiales constructivos de Guatemala, definidos en el Proyecto RESIS II.

HIPÓTESIS

La caracterización espectral en las bandas R, G, B, NIR e IR, realizada a través de métodos fotogramétricos de VANT de uso civil con cámara multiespectral, es una metodología que permite realizar muestreos de materiales constructivos, para las viviendas de Guatemala con la finalidad de realizar análisis de vulnerabilidad estructural.

Esta hipótesis es la esperada, dado que se han hecho diferentes estudios de reconocimiento de elementos constructivos, como zonas urbanas. Estas delimitaciones se realizan utilizando satélites como el Landsat 8 el cual tiene 30 metros de resolución espacial; con esa resolución se pierde mucha información por lo que se espera que las imágenes de VANT de uso civil, que se vuelan a alturas mucho menores que las imágenes de satélite, provean información que tiene una resolución espacial de centímetros, las cuales tienen mejores aptitudes para poder realizar los reconocimientos de materiales de construcción que se planean idéntica, a través de los métodos de clasificación de programas especializados.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Esta investigación en su propósito se enfocó en la determinación de las cantidades numéricas definidas para las firmas espectrales de los materiales de construcción más prominentes para Guatemala, determinando de esta manera las cantidades que se deben reconocer en las fases de campos con VANT de uso civil para identificar la presencia de materiales de construcción, en la búsqueda de realizar muestreos más efectivos de las características constructivas del país.

- Muestreo

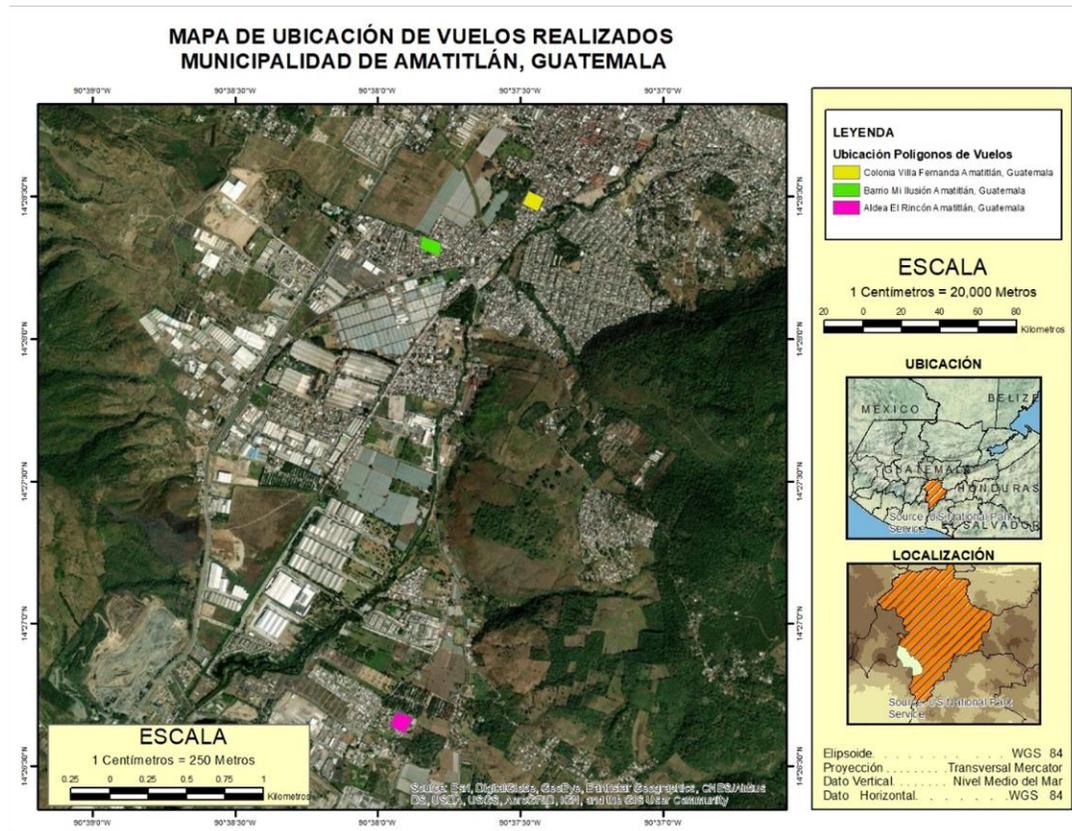
Dado que el muestreo se centra en las características de los materiales de construcción predominantes en Guatemala, los cuales fueron escogidos debido a la previa delimitación realizada por los proyectos RESIS, se decidió utilizar como zona de dicho muestro a un municipio que pudiera contener dentro de sus límites los 4 tipos constructivos escogidos.

Amatitlán es un municipio de la Ciudad de Guatemala, que por su ubicación geográfica y por sus aspectos socioeconómicos, contiene todos los tipos de vivienda que cumplen con las especificaciones de los tipos constructivos seleccionados. Esta característica permite encontrar zonas extremadamente rurales y zonas de desarrollo urbanístico como residenciales privadas, en las cuales prevalecen tipos constructivos de manera homogénea, además cuenta con áreas urbanas de desarrollo con poco ordenamiento territorial, donde se pudo encontrar zonas con presencia de viviendas construidas a partir de distintos materiales de construcción, donde se pudo evaluar la presencia de los materiales

de una forma heterogénea. Estas condiciones generaron facilidades logísticas para la ubicación cercana de los distintos tipos constructivos, por lo que las muestras se definieron en distintos puntos dependiendo de las necesidades de investigación.

Los vuelos de VANT de uso civil se realizaron con un dron de la empresa IDI de Guatemala con la cámara multispectral *Micasense Rededge*, proporcionados por la misma empresa. En el caso de las alturas de vuelo, se buscó realizar los muestreos a 3 alturas representativas para la identificación de objetos en el aspecto fotogramétrico, siendo estas 50, 75 y 100 metros, la diferencia de 25 metros entre cada toma, nos permite definir los datos en parámetros homogéneos de altura manteniendo variaciones controladas. No se optó por realizar vuelos más allá de los 100 metros, debido a que las restricciones de aeronáutica civil en Guatemala no lo permiten por seguridad.

Figura 1. Mapa de ubicación de vuelos de VANT para análisis



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Postproceso de imágenes

Para el post proceso de las imágenes obtenidas por el VANT de uso civil, se utilizó el *software* ArcGIS, para definir las firmas espectrales extraídas de los materiales de campo y se compararon con los valores de las firmas espectrales obtenidas en la fase de laboratorio. Este procedimiento se realizó analizando con estadística, las variaciones entre las lecturas numéricas de las firmas correspondientes a cada material, lo que permite comparar si la lectura de la cámara multispectral contiene los mismos rangos de valores en las imágenes

tomadas en laboratorio y en los análisis de campo, con la finalidad de identificar la posibilidad de utilizar estas herramientas, como tecnología de muestreo de viviendas, conformadas por los tipos constructivos delimitados.

- Técnicas de análisis de información

La técnica principal para el análisis estadístico de esta investigación es univariado, cuantitativo, dado que se contó con diferentes características de respuesta espectral, que se determinaron a través de análisis cuantitativo, individual, de cada una de las muestras que se definieron a través de análisis de dispersión y comportamiento de datos de tendencia central y se realizó una comparación cualitativa, entre la respuesta espectral obtenida mediante la cuantificación de la respuesta del número digital contra la cuantificación de la respuesta espectral de campo realizada con VANT de uso civil.

INTRODUCCIÓN

La Geomática engloba las geociencias en general aplicando métodos de las tecnologías de sensoramiento remoto, lo que incide en la posibilidad de capturar mejores datos y poder procesar esos datos de manera más eficiente y mejorar la interpretación de la información geoespacial, que el ser humano necesita para desarrollar sus actividades en los campos de la ingeniería, agronomía, medicina, geografía y otras ciencias afines.

Parte de estas mejoras en la interpretación, nos lleva más allá de lo que actualmente comprendemos en muchas aristas de nuestras materias de estudio, dentro de las cuales la gestión de riesgo juega un papel preponderante en la planificación y ejecución del desarrollo humano, ya sea en infraestructura o bienestar económico y social. Sin embargo, en países en vías de desarrollo no contamos con estudios e investigaciones que se apeguen a nuestros niveles de avance, haciendo que cada paso que dan las nuevas tecnologías hacia un futuro más automatizado, dentro de las ramas de la información digital nos aleje más de la disponibilidad a la información necesaria para nuestro desarrollo.

La importancia de estudiar la geomática y de generar información a través de esta ciencia se ve implicada en casi todos los aspectos de crecimiento de nuestro país, permitiendo a los investigadores crear buenas y eficientes herramientas con mejores datos de análisis espacial, estadístico y productivo.

Esta investigación tiene como objetivos cuantificar y cualificar la respuesta de materiales de construcción en diferentes bandas del espectro visual, que nos permitirá estudiar cómo los desastres afectan estructuralmente a Guatemala,

partiendo de una base técnica de datos que sirvan de control, para la identificación de tipos constructivos y técnicas de construcción. Para lo cual utilizando un espectrómetro y VANT de uso civil, se estima obtener resultados que permitan identificar estas características de una manera más eficiente y exacta en las bandas R, G, B, infrarrojo e infrarrojo cercano.

En el capítulo 1 y 2 se tratan las temáticas del marco referencial en el cual se identificarán los estudios que se hayan realizado, los alcances de investigación y conceptos de fotogrametría, análisis espacial, espectrometría y temas relacionados al sensoramiento remoto, así como el planteamiento y enunciado de los problemas investigativos. En los capítulos 3 y 4 se presentan los resultados y se discuten respectivamente, en estos se encuentra la experimentación y los elementos de discusión.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Estudios previos

Actualmente no existe en Centroamérica un estudio que utilice los VANT de uso civil, como herramienta principal para identificación de tipos constructivos en un área determinada. Esto se evidencia al no haber encontrado alguna investigación o trabajo que se base en las caracterizaciones de materiales basados en el proyecto RESIS II, el cual es la base de los criterios del material constructivo que en esta tesis será evaluado.

La mayoría de texto consultado identifica las imágenes satelitales como las herramientas más importantes, para el establecimiento de estructuras o materiales primarios en ubicaciones alrededor de la tierra, pero con la aparición de nuevas tecnologías como los VANT de uso civil, esto cambiará a futuro, implicando un escalamiento distinto para los estudios realizados.

Lerma (1999) indica que:

La fotogrametría se viene utilizando en tareas de documentación y restauración desde hace más de un siglo. Sin embargo, la obtención automática y el análisis de los materiales que constituyen las fachadas, así como de las patologías inherentes a las mismas, es inicial en la mayoría de los equipos multidisciplinares que gestionan proyectos de documentación, conservación y restauración. (p. 25)

Al respecto de las bandas multiespectrales, se han realizado investigaciones, en las cuales se utilizan imágenes de satélite para la identificación de estructuras informales en la Ciudad de México.

Hernández (2015) afirma que para esto se utilizaron imágenes de Landsat 5 con una resolución espacial de 30 metros, en las bandas R, G, B en este análisis se buscaron materiales de lámina, madera, cartón, triplay, entre otros; dado que las viviendas informales de asentamientos cuentan con muy pocos materiales formales para su construcción.

En este procedimiento se realizaron clasificaciones supervisadas, basado en píxeles por medio de un catálogo de firmas espectrales, utilizando el programa ENVI, que para el caso de la investigación en este documento, será el mismo procedimiento pero a diferentes escalas, dado que se utiliza un vehículo aéreo no tripulado de uso civil, el cual da imágenes con resoluciones espaciales distintas y se utilizará una metodología distinta a la aplicada en la investigación de Hernández en el 2015, en la cual se obtuvo dos características de materiales distintos, los no consolidados y los consolidados, en los cuales se obtuvo la firma espectral.

Yépez-Rincón, Cavez Gómez, Farriño-Fierro, Aguilar-Durán y Sánchez-Gaytán (s.f.) realizaron un estudio, utilizando las muestras de muros de mampostería por ser el material predominante en construcciones de vivienda, en el cual analizan deformaciones de cargas, en dichos muros a través de evaluación de firmas espectrales.

Por lo antes expresado, se necesita recalcar que los análisis con sensores remotos son métodos no destructivos, necesarios en la temática de

determinación de variables distintas de estudio, en temáticas como el riesgo (Flores y Hongn, 2012).

En la universidad politécnica de valencia se han hecho avances, en la identificación de edificaciones de varios niveles con imágenes de satélite y de datos LIDAR.

Se han utilizado técnicas de nivel bajo de vista para detección de bordes y también, técnicas de nivel alto de visión en las cuales se detectan formas; esto como un medio de discriminación de diferentes tipos de estructuras. En el caso de esta investigación se utiliza una clasificación orientada a objetos, mediante la técnica de árboles de decisión. En estas técnicas se identifican y caracterizan las cualidades de las edificaciones basados en un umbral obtenido de técnicas de entrenamiento o muestreos, que permiten agrupar y seleccionar de manera automática distintos cuerpos analizados en las imágenes de satélites.

En otros casos se ha incorporado el análisis de técnicas no destructivas en elementos que son de importancia histórica para las localidades que ocupan Cusidó, Devant y Riba (1996) realizaron un análisis de los espectros de reflexión a una serie de 3 profundidades, en muestras de piedras de diferentes características, las cuales conforman distintas edificaciones de valor histórico y cultural, en estos casos los análisis no destructivos se hacen necesarios para no dañar el valioso patrimonio.

En esta investigación se toman los rangos espectrales de la banda visible y del espectro electromagnético del infrarrojo, utilizando imágenes y termogramas. El fin de esta investigación es observar las intervenciones que dichas obras presentan en diferentes periodos del tiempo de la historia, para poder determinar alteraciones en las mismas que pongan en riesgo la integridad

de los monumentos históricos. Como resultado, pudieron observar distintas inserciones de material, en reparaciones realizadas a las obras, lo que ayudará en un futuro a restaurar las partes incluidas utilizando los materiales correctos para evitar daños.

Previas investigaciones relacionadas con esta tesis, por la identificación de materiales utilizando el sensoramiento remoto, se han hecho a través de imágenes de satélites con resoluciones que pueden abarcar grandes porciones de territorio. Sin embargo, estas identificaciones no sólo pueden llegar a carecer de exactitud, por la escala de las imágenes, además pueden presentar errores en la identificación de los materiales por los ángulos de las imágenes en los cuales solo se puede identificar los techos de las mismas, que podrían llegar a ser de un material no correspondiente al resto de la estructura.

En este caso la investigación está enmarcada en aspectos constructivos de seguridad y ordenamiento territorial, por lo que es imperativo poder identificar de manera más certera el material de construcción de los tipos constructivos de las viviendas de Guatemala, utilizando VANT de uso civil, con la finalidad de generar imágenes de manera más rápida y precisa. Sin embargo, existe también la posibilidad que este estudio evidencie, que la precisión del método planteado no sea la óptima o inclusive que sea nula para la identificación de materiales utilizando los sensores de las bandas de R, G, B, infrarrojo e infrarrojo cercano, pero esto nos ayudará a tomar decisiones con una base técnica, en la mejor opción para realizar identificación de materiales por sensoramiento remoto.

1.2. Alcances

A continuaciones se explicarán los alcances de la investigación.

1.2.1. Perspectiva investigativa

La aparición de nuevas tecnologías de sensoramiento remoto, permite al ser humano evaluar estudiar y hacer más eficiente la identificación de cuerpos a distancia, sin la necesidad de tomar muestreos directos sobre los materiales de estudio. Esto se ha realizado con satélites de manera intra y extra terrestre analizando una nueva manera de explorar nuestro entorno.

El ser humano ha logrado aumentar la escala de muchos estudios, gracias a la información generada por métodos novedosos y ha dejado de depender de las grandes y complicadas máquinas especiales para la obtención de información, gracias a la aparición de los vehículos aéreos no tripulados, los cuales son muchas veces de uso civil. Esta interacción nos ha permitido el estudio de problemáticas antiguas a escalas más modernas, sin embargo, para calibrar estos análisis se necesita de información base, que permita realizar comparativas de identificación

1.2.2. Alcance (descriptivo/explicativo/correlacional)

La investigación pretende determinar si el método a utilizar es o no viable, según las precisiones con las que se logre identificar cada una de las áreas mapeadas, con la finalidad de validar o descartar este método que podría ser de alto beneficio para el manejo de territorios construidos en Guatemala.

La selección de los materiales se hace en base al proyecto RESIS II, el cual es de suma importancia para la evaluación en la región Centroamericana, ya que ha permitido identificar a través de métodos cuantitativos los materiales de construcción predominantes para cada país de la región.

1.2.3. Perspectiva técnica

Los métodos utilizados al momento de esta investigación implican el uso de imágenes gratuitas, cuya periodicidad puede variar entre los 7 y los 21 días para obtener imágenes de las áreas de interés, además de tener menos resolución de la necesaria para estudios a escalas muy grandes en algún territorio. Otras imágenes de satélites cuyos servicios son de paga cuentan con precios bastante elevados y pese a que la calidad de la resolución aumenta, estudios cuya extensión contempla áreas pequeñas pueden sufrir de uso inapropiado de fondos, debido a que se compra un tamaño preestablecido de imagen satelital que puede abarcar mucha más área que la del estudio.

En este caso se plantea la utilización de VANT de uso civil y para el caso en específico, se analizan las imágenes del VANT Inspire 1 Pro con la cámara multiespectral (REDEDGGE), los cuales son asequibles para proyectos a grandes y pequeñas escalas pero que dentro de su relación precio/ utilidad, cuentan con la capacidad de adaptar distintas cámaras para la detección.

Dentro del análisis de las firmas espectrales, se cuenta con muchos y variados sensores que permiten observar la mayoría de las bandas dentro del espectro fotogramétrico, sin embargo, tecnologías como el LIDAR u otras que miden las ondas de cada una de dichas bandas tienen su limitante en el precio para la adquisición, generando nichos de mercado muy específico. En el caso de este estudio se utilizará la cámara multiespectral REDEDGGE, la cual permite visualizar el espectro visible del R, G, B y el espectro de los infrarrojos, tomando en cuenta que el precio de este sensor es menos costoso que otros más especializados.

Dentro de las condiciones, es importante tomar en cuenta que analizar la precisión podría ayudar a comprender la relación entre las variables de tiempo y distancia. En Guatemala no existen investigaciones sobre cómo comprender las precisiones obtenidas utilizando receptores GNSS, lo cual lleva a la inexistencia de métodos prácticos para mejorar la precisión obtenida en campo, para hacer uso eficiente del tiempo de observación y su incidencia en la distancia a la base más cercana. Sumado a eso, falta una red geodésica activa que esté distribuida en todo el territorio. Actualmente la red geodésica activa no tiene cobertura en la mayor parte del territorio nacional, y como consecuencia se utilizan métodos alternos de posicionamiento, lo cual tiende a llevar mediciones erróneas, especialmente en los casos en donde se requiere de alta precisión.

1.2.4. Perspectiva de resultados

Para la investigación se espera obtener el detalle de las firmas espectrales en el espectro de lo visible y en el espectro infrarrojo, determinando así el comportamiento de las frecuencias resultantes del rebote del haz de luz sobre los materiales de interés con sus respectivos tratamientos. Esto será analizado por un *software* que permite la lectura y clasificación de firmas espectrales. El otro resultado y no menos importante es la posibilidad de evaluar la capacidad de estos sensores para reconocer las mismas firmas obtenidas en la etapa de laboratorio.

La importancia de obtener estos datos se debe a la necesidad de encarar nuevos métodos para realizar muestreos de viviendas de forma remota o para desestimar el uso de estos VANT y sensores como método de identificación de estas y así buscar métodos más robustos de obtención de información.

1.3. Justificación

Esta investigación pertenece a la línea de investigación de SIG aplicados a estudios de vulnerabilidad y gestión de riesgo, cuya importancia para un país como Guatemala, radica en las condiciones altamente sísmicas en la que nos encontramos, al estar ubicado en la convergencia de 3 placas continentales y aunado a la vulnerabilidad que se tiene en el territorio nacional, se evidencia la aparición de riesgo considerable por la amenaza sísmica al no contar con suficiente estructura constructiva sismo resistente en el país. Pese a que es sumamente complicado cambiar las condiciones de vulnerabilidad, es importante estudiar las mismas por lo que el mapeo de las áreas habitacionales de nuestro territorio es de suma importancia para entender los daños que se pueden presentar en eventos de origen geológico.

La importancia de estas mediciones se define por las cualidades de las estructuras y una evaluación directa de estas características. Dicha actividad actualmente es extremadamente lenta y costosa, por lo que, al considerar al riesgo como un fenómeno dinámico, se necesitan datos que permitan realizar estos reconocimientos en forma eficaz y constante. Es aquí donde toma importancia las ciencias geomáticas en específico los sensores remotos, que servirían para identificar condiciones de vulnerabilidad de tal manera que se haga fácil el mapeo, por lo se vuelve imperativo la determinación de la efectividad de estos métodos, para definir de esa manera, la viabilidad de la realización de actividades de muestreos con esta tecnología.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Teledetección

Según Chuvieco (1995), “La teledetección es una técnica aplicada y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento” (p.35). En la gestión de riesgo, esta cumple un papel preponderante en la identificación y caracterización de firmas espectrales de materiales de construcción, para la realización de muestreos; esto con la finalidad de identificar las zonas de riesgo, que derivan de las diferentes vulnerabilidades de la interacción de estos materiales con las ondas sísmicas. Reconocer estos materiales de construcción a través de las técnicas de teledetección, aumenta en gran manera el éxito de la realización de planes de respuesta para las áreas que pueden ser afectadas por estos eventos.

2.2. Geomática

La geomática es una ciencia aplicada que apoya los conocimientos de muchas otras ciencias, al darle un sentido espacial a la información que se genera de estudios específicos en campos de interés para el ser humano. Dentro de algunas de las definiciones de la geomática encontramos que algunos científicos la mencionan como:

“Un término científico moderno que sirve para expresar la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada.” (Garzon y Rincon, 2017).

Dentro de la gestión de riesgo la geomática nos sirve para el análisis de datos geoespaciales que se desean analizar, en este caso el estudio utiliza los datos de los valores extraídos de las imágenes en cada uno de sus píxeles, los cuales se almacenan, procesan y analizan geográficamente para identificar materiales de construcción a través de la reflectancia solar.

2.3. Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que nos permite fotointerpretar imágenes obtenidas por vía remota. Según Pozuelo (2003), “Se entiende por fotogrametría el conjunto de técnicas, instrumentales y matemáticas, que permiten obtener coordenadas tridimensionales de un objeto, a partir de información bidimensional extraída de una o varias fotografías.”

Estas técnicas fotogramétricas nos permiten analizar áreas extensas, cuyo muestreo por vías convencionales podría tardar mucho tiempo. Por esto, la fotogrametría es de gran ayuda en la gestión de riesgo para la identificación de zonas de riesgo o zonas vulnerables. Claros Zelaya, Guevara Aguilar y Pacas Cruz (2016) afirman al respecto de esta técnica que:

“Permite obtener datos de la superficie del terreno en un corto lapso de tiempo, mediante la toma de fotografías aéreas con aeronaves de gran envergadura o el uso de las aeronaves no tripuladas (VANT o drones).”

2.4. Fotointerpretación

“Se trata de la observación directa de las fotografías, se pretende conocer la evolución y las características de cualquier objeto o fenómeno, tanto natural

como artificial, que haya sido registrado instantáneamente de la superficie de la tierra.” (Hernández, M., 2011).

La fotointerpretación también puede ser útil en la planificación de la gestión de riesgos. Al identificar y mapear las zonas de mayor riesgo en una zona determinada, los responsables de la gestión de riesgos pueden tomar decisiones informadas sobre la implementación de medidas de prevención y mitigación. En la gestión de riesgo se le puede dar muchos usos a la fotointerpretación, desde la identificación de áreas de riesgo, hasta la obtención de planificación territorial. En este caso se puede utilizar para identificar las áreas de muestreo y los puntos específicos de toma de números digitales.

2.5. Reflectancia

La reflectancia es un valor que se utiliza en la geomática, como el valor específico de la onda de la energía que alguna superficie no puede absorber, este valor es el que se utiliza para determinar la cantidad, que se extrae de cada pixel como numero digital, y es de vital importancia para la caracterización de las firmas espectrales. Esto se obtiene con el índice de reflectividad, Achapar, Cantolube y Garrido (2012) realizan una investigación donde determinan la obtención de este valor, en el que definen que, “El Índice de Reflectividad Solar se obtiene bajo la norma ASTM E1980. Éste es un indicador que incorpora la reflectancia y la emitancia en un único término que representa la temperatura de una superficial horizontal, o de baja pendiente” (p.42).

2.6. Vehículo aéreo no tripulado

De acuerdo con Escalante Torrado y Porras Días (2016), “Son aeronaves que vuelan autónomamente a través de un sistema de piloto automático que es monitoreado desde un centro de control en tierra”. Los vehículos aéreos no tripulados, se utilizan en muchas ciencias para la obtención de datos de manera poco costosa y rápida, ayudando a que no sea necesario en la actualidad, utilizar fotos satelitales o fotogrametría con vehículos aéreos tripulados. Esto disminuye el costo de los estudios, permite concentrar los análisis en áreas mas detalladas en escala y a hacer más efectivo el tiempo de trabajo. Según Barrientos et al. (2007), “Se entiende por una aeronave no tripulada (UAV: Unmanned Aerial Vehicle o también UAS: Unmanned Aircraft System o UAVS: Unmanned Aircraft Vehicle System) a aquella que es capaz de realizar una misión sin necesidad de tener una tripulación embarcada.”

2.7. Uso de VANT (vehículo aéreo no tripulado)

En su disertación doctoral, Claros Zelaya, Guevara Aguilar y Pacas Cruz (2016) sostienen que “El uso de vehículos aéreos no tripulados permite la toma de fotografías aéreas georreferenciadas que sirven para la creación de modelos digitales de terrenos y la representación cartográfica de estos”. Sin embargo, el uso indiscriminado de VANT, también puede incidir en datos que no son calculados con la rigurosidad adecuada, por lo que se debe contar con otro equipo de ortorectificación de imágenes para que la información sea correcta.

Los vehículos aéreos no tripulados pueden ser utilizados en varios aspectos de las evaluaciones de riesgo y en la geomática, en conjunto para estas ciencias se utilizan para que, a través de técnicas de teledetección, permitan facilitar la información que se desea analizar y luego expresarla de manera

geoespacial, por lo tanto, es importante que los VANT se utilicen con herramientas como GNSS para mejorar su precisión.

2.8. Firmas espectrales

La firma espectral tiene una importancia alta como herramienta de la teledetección, porque es lo que permite la caracterización de cualquier material u objeto que no son fáciles de detectar con métodos convencionales de fotointerpretación. Estas firmas difieren de un material a otro por su composición química o estructura molecular. Según Hernández, J., (2011), “La firma espectral se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético.”

2.9. Firmas multibanda

Las firmas multibanda son las huellas que los materiales u objetos tienen en todas las bandas del espectro electromagnético, dentro de las técnicas de teledetección para identificar estas firmas, se utilizan espectrómetros de sensoramiento remoto que pueden identificar varias bandas como la luz en las bandas R, G, B el infrarrojo y el infrarrojo cercano, entre otros. Cada banda tiene una longitud de onda única la cual le da su distinción a los materiales u objetos. En el caso de la gestión de riesgo se puede utilizar sensores multibanda para identificar distintas zonas de riesgo, desde áreas inundadas, hasta zonas afectadas por flujos de lava; también se pueden utilizar para identificar elementos constructivos al identificar materiales, a través de imágenes obtenidas con VANT o satélites. Según Andino (2009), “Están contenidas en varios canales caracterizados individualmente por la cobertura de un intervalo del ancho de onda

total. Otros satélites pueden ofrecer bastante más canales y los casos extremos son alguna toma en hiperfrecuencias activas alcanzando más de cien canales.”

2.10. Imagen *raster*

Las imágenes raster, son un tipo de imagen digital que se forma por una matriz de píxeles que cuentan cada uno con un valor determinado, al cual se le llama número digital. Estas imágenes tienen muchos usos en la ciencia desde cartografía, hasta medicina y sobre todo en la teledetección. En el caso del tema de la gestión de riesgo, las imágenes raster tienen mucha utilización porque los valores que se analizan dan como resultado la interpretación de pendientes, inundaciones, hundimientos, entre otros. Según Castañeda (2010), “La imagen raster es un valor asignado a un pixel de información, el cual se encuentra en una escala lumínica, en donde según su configuración los valores varían en la luminosidad o la coloración de los mismos.”

2.11. Tratamientos en preproceso de materiales

Los tratamientos de imágenes para el procesamiento de imágenes se utilizan para mejorar la calidad de los datos de raster que se van a utilizar dentro de las investigaciones, dentro de los que encontramos correcciones atmosféricas, georreferenciación, fusiones de bandas, normalización de datos espaciales, filtrados, entre otros. Algunos autores como Lerma (1999), opinan que otros tratamientos en bandas pueden ser, “mejora de las imágenes (con modificación de los histogramas), rectificación de las imágenes (en visible infrarrojo), extracción del conjunto de imágenes por bandas (azul, verde, roja e infrarroja) y, finalmente, generación del mosaico de imágenes rectificadas que presentan recubrimiento” (p.26).

2.12. Sistematización de la Información

En su sistematización de información estructural Balta y Meza (2015) definen los sistemas de la información como, “Un Sistema de Información Geográfica (SIG) provee un entorno ideal para hacer un comprensivo análisis de peligro y riesgo sísmico. Un SIG tiene la capacidad de almacenar, manipular, analizar y visualizar una gran cantidad de información de datos tabulares y espaciales requeridos. El sistema puede ser enlazado con programas externos, a base de datos y sistemas expertos basados en el conocimiento. Debido a todas estas capacidades que brinda esta herramienta, la investigación intenta mostrar la utilidad del SIG en Ingeniería Civil, especialmente, en la gestión de riesgos sísmico. El objetivo de la investigación fue el aplicar la metodología propuesta en el ATC36, el cual permite analizar el peligro y riesgo sísmico de una región a través del uso de Sistemas de Información Geográficas” (p.12). Sin embargo, los SIG no son los únicos sistemas de la información que existe, dado que se pueden encontrar diversas bases de datos de diferentes análisis, muestras y estudios, que son especializados y que pese a utilizar claramente la base de programación común de muchos software SIG, algunos solo serán gestores de datos y otros contarán con otras características en línea, consultas de datos espaciales, creación de mapas, análisis estadísticos específicos, procesamientos de imágenes o modelaciones de escenarios entre otros. Lo más importante para la realización de estudios es contar con el software indicado; en el caso de procesamiento de imágenes y extracción de números digitales de raster, se pueden utilizar software SIG y algunas herramientas especializadas en la fotointerpretación y teledetección.

2.13. Modelo digital de elevación

Los modelos de elevación se utilizan en prácticamente todas las ciencias que conllevan el análisis terrestre, dentro de los usos más comunes se puede encontrar, análisis de pendientes, análisis de zonas de riesgo, ordenamiento territorial, ingeniería civil, entre muchos otros. Es importante mencionar que estos modelos de elevación, deben contar con pre procesos de análisis, para que la información que se encuentra en ellos cuente con la calidad necesaria y los datos trabajados para los análisis específicos de cada estudio. En todo caso estos modelos no son más que rasters que cuentan en su número digital para cada píxel, con valores que representan en una escala de grises las alturas determinadas de un terreno. Según Fallas (2007), “la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura.”

2.14. Número digital de píxel

“El término genérico para los valores de píxeles es Número digital o DN. Se usa comúnmente para describir valores de píxeles que aún no se han calibrado en unidades físicamente significativas. Si solo desea ver una imagen y no tiene la intención de interpretar los valores de los píxeles en términos de algún valor cuantitativo y físicamente significativo como radiancia o reflectancia (o cualquier valor derivado de los valores de radiancia o reflectancia, como abundancia), entonces puede estar bien mantener su imagen en sus valores DN originales.” (Shippert, 2013, p.23).

En el caso de mantener los Números Digitales bajo sus valores originales, se debe entender que estos no son específicamente comparables con valores trabajados en investigaciones específicas, donde estos han sido sometidos a

tratamientos de normalización, a través de fórmulas específicas que han sido diseñadas matemáticamente para expresar valores según las variables de análisis. Algunos ejemplos de esto, son las fórmulas que se utilizan en el campo de la agricultura para medir la presencia de deficiencias de nutrientes en las plantas, o mediciones de turgencia. En el caso de la construcción estos modelos matemáticos se deben refinar, para poder obtener respuestas adecuadas según la textura la composición química y la coloración de materiales de construcción.

2.15. Cartografía

Según Maass y Valdez (2003), “Esta ciencia tiene por objeto el estudio de los mapas como método especial de representación de la realidad geográfica e incluye, desde el estudio multilateral de la esencia de los mapas”. Pese a que la cartografía se basa en la captura y análisis de datos obtenidos a través de métodos como la teledetección, el fin de esta ciencia es expresar de manera comprensible los fenómenos y representaciones terrestres, es decir, cualquier dato que se extrae de técnicas de fointerpretación y teledetección, no necesariamente es un dato entendible y representativo de un área, en este caso el papel vital de la cartografía, es colocar en el espacio y tiempo un evento específico para que el fenómeno expresado sea entendido por el público en general, o para modelar de manera referenciada un suceso de investigación en forma de mapa.

2.16. Sistema de información geográfica

Si bien es cierto que los Sistemas de Información Geográficos son herramientas sumamente poderosas, estas darán los resultados de calidad acordes a los datos que se provean para las investigaciones. En la teledetección los SIG, son sumamente importantes al ser la herramienta principal donde se le

da procesamiento a las imágenes raster de las cuales se extraen los valores de números digitales para la interpretación y reconocimiento de datos espaciales. Según Miguel (2004) en su investigación define a los SIG como “herramientas informáticas capaces de gestionar y analizar la información georreferenciada, con vistas a la resolución de problemas de base territorial y medioambiental.”

Además, los SIG son importantes por su capacidad para modelar el entorno. Mendivelso (2002) afirma que:

Los sistemas de información geográficos tienen una gran importancia en el análisis de variables múltiples, dentro de procesos que están adscritos específicamente a la interacción humana con su medio y este análisis se hace dentro de procesos geográficos que no serían posibles de realizar en otros sistemas, que no contemplan la georreferenciación de elementos evaluados como en este caso lo es el ordenamiento territorial y la distribución de tipos constructivos en poblados.

2.17. Parámetros de drones

Los drones o vehículos aéreos no tripulados, son herramientas utilizados ampliamente desde la toma de imágenes sencillas de forma recreativa, hasta la extracción de datos geoespaciales bajo técnicas de teledetección para el análisis de datos en distintos softwares SIG. Sin embargo, la calidad de esta información depende de variables paramétricas que preceden a los vuelos. Según Mitsikostas (2017), “Para lograr un resultado final con los datos de vuelo correctamente georreferenciados, requiere el uso de los puntos de control. Estos puntos, deben tener una buena dispersión en el espacio de la zona de trabajo para que se ajuste mejor el Orto mosaico”. (p.30).

Para que un vuelo con VANT tenga éxito es necesario hacer una correcta y extensa planificación del vuelo. La planificación del vuelo depende bastante con el Software que vamos utilizando y con la situación de la zona que vamos a trabajar. Además, depende de la computación de la altitud de vuelo, de los porcentajes del recubrimiento de capturas, del tamaño que corta el suelo para cada captura y de las líneas horizontales y verticales del vuelo, pero también de la elección de la mejor hora posible a base de condiciones meteorológicas. (Mitsikostas, 2017).

2.18. Espectro electromagnético de firmas espectrales

Distintos tipos de radiación componen el espectro electromagnético, los rayos x la luz visible, ultra violeta, entre otros. Según Hernández, J. (2011), “El espectro electromagnético (EE) es flujo continuo energía que se desplaza por el espacio o la atmósfera y que interactúa con los objetos que encuentra en su camino”. Cada uno de estos tiene diferentes características que apoyan diferentes ciencias por el propósito que se tenga a investigar, en el caso de la identificación de materiales de construcción se puede utilizar varios tipos de espectro y comúnmente se utilizan los rayos x y la luz visible para la identificación de los mismos.

2.19. Restitución catastral

Según Caballero Zoreda, Arce y Feijoo (1996), “La restitución fotogramétrica elabora dibujos tridimensionales, con la posibilidad de conseguir proyecciones y perspectivas impensables de obtener por los métodos tradicionales. Esta representación puede utilizarse también como un instrumento de interpretación de superficies”. Este proceso puede utilizarse en investigaciones de obtención de materiales y técnicas constructivas, de tal

manera que se pueda identificar a través de imágenes tridimensionales los muros de construcción de las viviendas evaluadas, que planimetricamente pueden resultar en muestreos erróneos al analizar los datos obtenidos únicamente de lozas constructivas.

2.20. Método de clasificación árbol de decisiones

En los procesos de creación de modelos de árbol de decisiones toman en cuenta todas las variables que lleva a decisiones posibles, en la geomática esta técnica se utiliza para definir la metodología de clasificación basándose en números digitales o en los datos normalizados y corregidos que analicen específicamente el espectro de lo investigado en cada caso de estudio.

Ruiz (2006) afirmó que:

Un árbol de decisión es un conjunto de condiciones organizadas en una estructura jerárquica, de tal manera que la clase a asignar a un objeto se puede determinar siguiendo las condiciones que se cumplen desde la raíz del árbol hasta alguna de sus hojas.

2.21. Proyecto RESIS II

En el área de Centroamérica, existe una alta posibilidad de ocurrencia de sismos, aunado a una alta vulnerabilidad se presenta un riesgo sísmico alto en la zona. El proyecto RESIS II fue realizado con la finalidad de estudiar la sismicidad de Centroamérica, utilizando una metodología de cooperación entre países, para lo cual se realizaron estudios específicos en cada país, para luego

unir los esfuerzos en un solo estudio regional. Este estudio se realizó en dos fases, la primera fue la creación de la Cartilla de Sistemas Constructivos, la cual contiene todos los tipos constructivos que existen en Centroamérica, dentro de esta cartilla se encuentra Guatemala país en el cual se denota variados sistemas constructivos sin embargo, hay 4 sistemas que sobresalen de los demás, mampostería de block, mampostería de ladrillo, adobe y madera; esta caracterización se realizó con la finalidad de determinar como la onda sísmica afecta cada uno de estos tipos constructivos. La otra fase del estudio se realizó analizando la sismicidad en el espectro de las ondas sísmicas y cómo se comporta el traslado de esta en los tipos geológicos de cada país, esta energía calculada se empata con los tipos constructivos para poder comprender el riesgo que se tiene en los países, a sufrir grandes desastres por sismos. (Molina et al., S.f.).

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para el estudio presentado se escogieron los materiales de construcción basándose en el proyecto RESIS II en el cual se categorizan las viviendas típicas para la zona de Centroamérica, dentro de la cual se encuentra Guatemala cuyos materiales predominantes para la construcción son el block, el adobe, el ladrillo y la madera.

Dentro de las muestras de los materiales que se escogieron se decidió aplicar distintos tratamientos a cada uno como se observa en la Tabla I, en la que se muestra esta distinción de clases.

Tabla I. **Materiales de construcción**

Muestra	Sin tratamiento	Con repello	Repello y pintura de agua	Repello y pintura de aceite	Solo pintura
Block	x	x	x	x	//
Adobe	x	x	x	x	//
Ladrillo	x	x	x	x	//
Madera	x	//	//	//	x

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

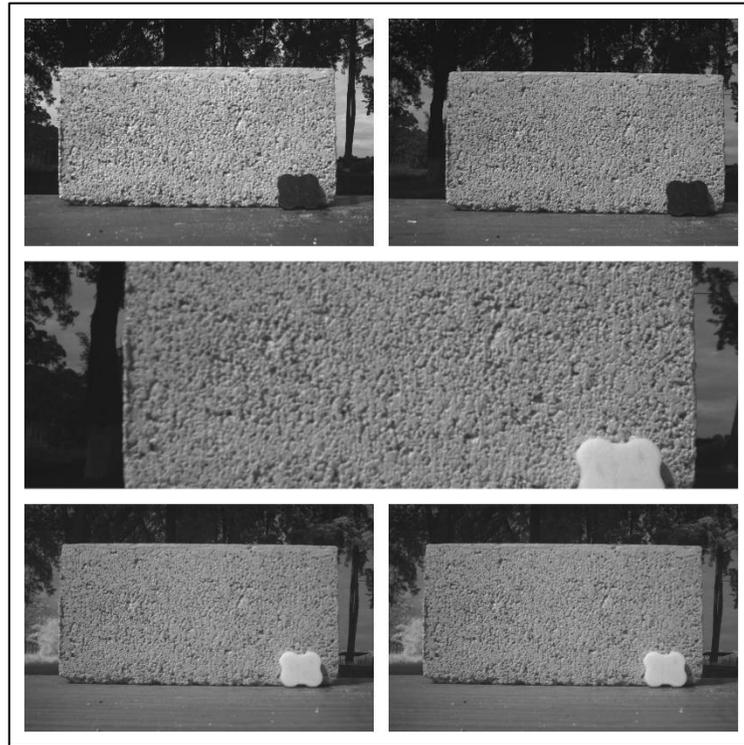
Como se puede observar en la tabla I, sólo los materiales como el block, adobe y ladrillo cuentan con tratamientos que incluyen al repello dentro de las muestras y la madera le fue aplicado solamente pintura de agua y pintura de aceite, esto se decidió debido a que no es una técnica común aplicar repello a estructuras de madera en la construcción.

El experimento se dividió en 2 fases, en la primera se extrajeron las firmas espectrales de los materiales de construcción en las muestras de control y con cada uno de sus tratamientos aplicados, esto se realizó de forma en que las variables estuvieran controladas para permitir la extracción de las fotografías multiespectrales, la segunda fase se realizó en campo a través de vuelos fotogramétricos de VANT de uso civil en una zona donde se pudieran ubicar todas las muestras y sus tratamientos.

3.1. Experimento 1 cuantificación de firmas espectrales de materiales de construcción

De los resultados obtenidos se obtuvieron fotografías multiespectrales de cada material específico con sus tratamientos, estas fotografías muestran cada material de construcción en una escala de grises en la que se encuentran los valores de la reflexión de la luz del sol, los cuales se encuentran representados por el ND de cada uno de los píxeles que conforman la imagen y cada imagen multiespectral contiene 5 fotografías que representan cada una de las bandas de R, G, B, IR y NIR.

Figura 2. **Imagen de materiales de construcción en bandas espectrales**

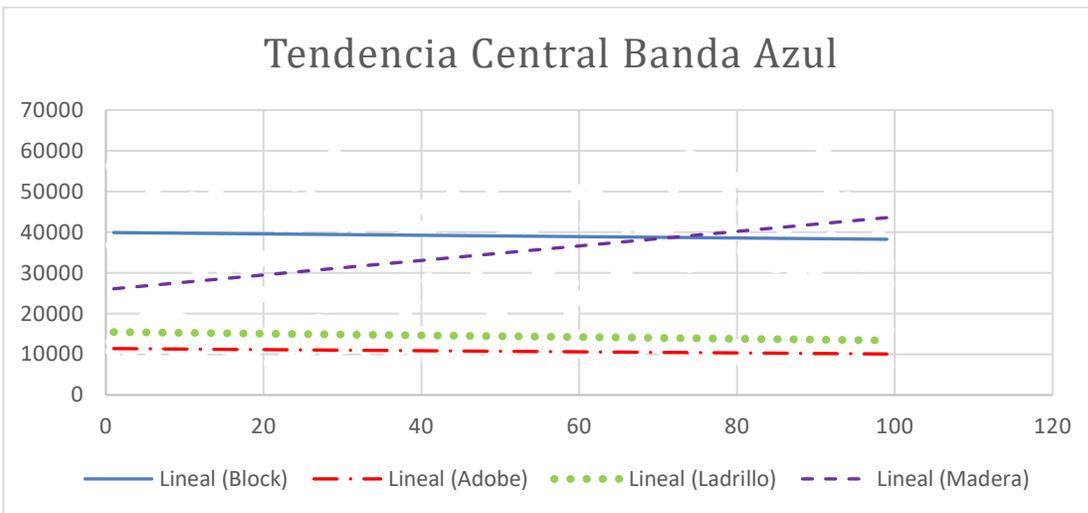


Fuente: [Fotografía de Kevin Nufio]. (Amatitlán. 2022). Colección particular. Guatemala.

En la figura 2 se observa que al separar cada una de las lecturas de los materiales se puede diferenciar las respuestas que se obtiene de estos al reflejar la energía solar que por su composición no se puede absorber, en la lectura del valor de los píxeles de su número digital (ND), que conforman una imagen multibanda con cada una de las bandas que la componen siendo estas el R, G, B, IR y NIR.

Los resultados se obtuvieron realizando un análisis de gráficas de dispersión a los cuales se les aplicó una regresión lineal con la finalidad de identificar los rangos que los conforman, teniendo resultados como los que se presentan en la gráfica mostrada en la figura 3.

Figura 3. **Imagen de tendencia central de banda azul**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 3 se puede observar la gráfica de la tendencia central con los comportamientos de cada una de las muestras sin tratamiento en día soleado de la banda azul, en la que se identifica que existe traslape entre las tendencias de madera con ladrillo indicando dispersiones de datos de ND que tienen un comportamiento idéntico para algunos de estos valores. También se puede observar que el block y el ladrillo tienen rangos diferentes pero que los comportamientos de las líneas de tendencia son muy parecidos.

Tabla II. **Rangos de firmas espectrales en número digital por material de construcción en día nublado**

Rangos de materiales luminosidad día nublado					
***		Sin tratamiento	Repello	Pintura agua	Pintura aceite
Material	Bandas	Rango ND	Rango ND	Rango ND	Rango ND
Block	Azul	(30,000--32,000)	(48,000--51,000)	(45,000--49,000)	(51,000--53,000)
	Verde	(35,000--38,000)	(49,000--52,000)	(43,000--44,000)	(43,000--48,000)
	Rojo	(37,000--38,000)	(46,000--51,000)	(41,000--42,000)	(43,000--48,000)
	IR	(35,000--41,000)	(42,000--48,000)	(49,000--50,000)	(44,000--48,000)
	NIR	(37,000--41,000)	(45,000--50,000)	(43,000--46,000)	(48,000--53,000)
Adobe	Azul	(7,000--8,000)	(34,000--37,000)	(47,000--50,000)	(47,000--49,000)
	Verde	(10,000--10,500)	(41,000--41,500)	(44,000--49,000)	(46,500--47,000)
	Rojo	(11,000--12,000)	(45,000--46,000)	(39,000--43,000)	(39,000--43,000)
	IR	(19,000--20,000)	(40,000--44,000)	(41,000--47,000)	(42,000--45,000)
	NIR	(18,000--19,000)	(42,000--43,000)	(41,000--48,000)	(42,000--43,000)
Ladrillo	Azul	(11,000--12,000)	(45,000--46,000)	(50,000--54,000)	(41,000--42,000)
	Verde	(17,000--20,000)	(41,000--41,500)	(50,000--51,000)	(43,000--48,000)
	Rojo	(21,000--24,000)	(41,000--42,000)	(41,000--43,000)	(41,500--42,000)
	IR	(29,000--30,000)	(48,000--49,000)	(47,000--54,000)	(45,000--49,000)
	NIR	(25,000--37,000)	(45,000--46,000)	(50,000--53,000)	(41,000--45,000)
Madera	Azul	(31,000--39,000)	//	(50,000--54,000)	(52,000--53,000)
	Verde	(36,000--42,000)	//	(46,000--49,000)	(50,000--51,000)
	Rojo	(36,000--37,000)	//	(47,000--52,000)	(52,000--57,000)
	IR	(45,000--50,000)	//	(48,000--51,000)	(50,000--52,000)
	NIR	(40,000--41,000)	//	(51,000--54,000)	(52,000--56,000)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Como se puede observar la tabla II cuenta con los resultados de la investigación del experimento 1 para datos de ND en clima nublado, esta tabla representa los rangos de todos los valores que fueron extraídos de los materiales de construcción y los tratamientos aplicados.

Los datos que aparecen en esta tabla contienen información que muestra el comportamiento de los rangos de los ND, como se observa en la tabla II, los valores presentan datos de tendencias similares entre los tratamientos de repello, pintura de agua y pintura de aceite, siendo los materiales sin tratamiento los que contienen datos en los rangos de ND distintos. Además, se puede observar que los datos de block y madera contienen rangos muy parecidos, de igual manera los datos de adobe y ladrillo presentan el mismo comportamiento de similitud en los rangos que ocupan sus ND.

Tabla III. **Rangos de firmas espectrales en número digital por material de construcción en día soleado**

Rangos de materiales luminosidad día soleado					
***		Sin tratamiento	repello	Pintura agua	Pintura aceite
Material	Banda	Rango ND	Rango ND	Rango ND	Rango ND
Block	Azul	(38,000--41,000)	(42,000--44,000)	(42,000--44,000)	(42,000--42,500)
	Verde	(32,500--33,500)	(43,000--47,000)	(46,000--48,000)	(39,500--40,000)
	Rojo	(32,000--33,000)	(48,000--50,000)	(48,000--49,000)	(40,000--40,500)
	IR	(31,000--31,500)	(46,000--51,000)	(46,000--50,000)	(43,000--43,500)
	NIR	(37,000--38,000)	(49,000--41,500)	(49,500--50,000)	(44,000--44,500)
Adobe	Azul	(10,000--11,000)	(41,500--42,000)	(47,000--50,000)	(41,000--41,500)
	Verde	(12,000--15,000)	(42,000--43,000)	(37,000--39,000)	(41,000--41,500)
	Rojo	(12,000--12,500)	(41,000--43,000)	(37,000--39,000)	(39,000--39,500)
	IR	(14,000--15,000)	(42,000--43,000)	(43,000--44,000)	(39,000--41,000)
	NIR	(12,000--13,000)	(42,000--43,000)	(41,000--43,000)	(39,000--41,000)

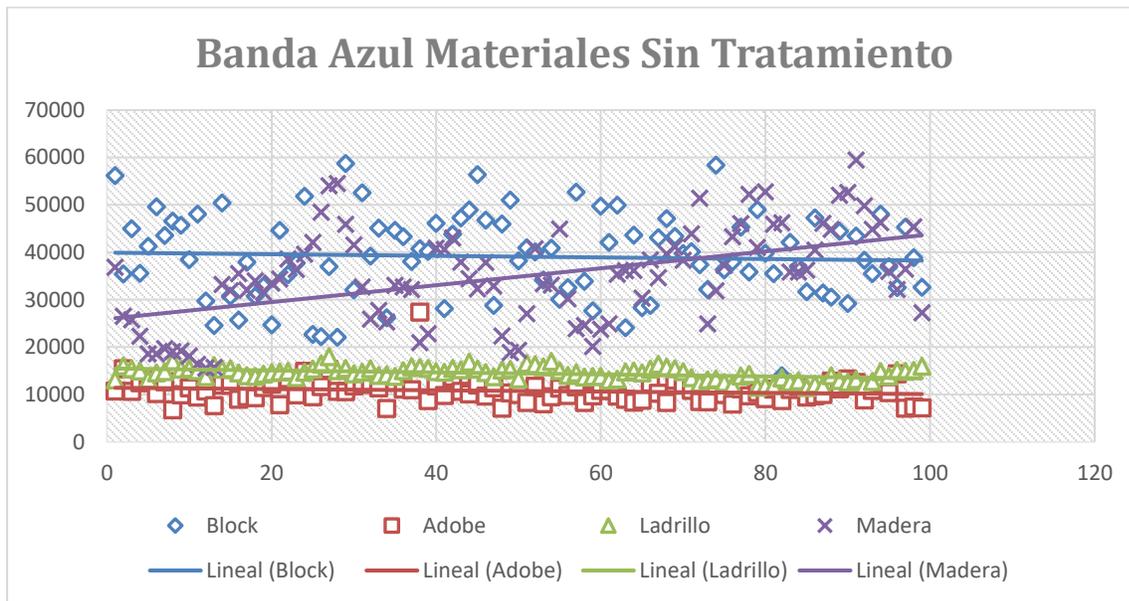
Continuación tabla III.

Ladrillo	Azul	(14,000--16,000)	(45,000--46,000)	(43,000--44,000)	(44,000--45,000)
	Verde	(15,000-20,000)	(41,000--41,500)	(48,000--42,000)	(45,000--46,000)
	Rojo	(21,000--24,000)	(41,000--42,000)	(49,000--51,000)	(41,500--42,000)
	IR	(21,000-23,000)	(48,000--4,9000)	(44,000--45,000)	(42,000--43,000)
	NIR	(18,000--20,000)	(45,000--46,000)	(48,000--49,000)	(44,000--45,000)
Madera	Azul	(27,000--43,000)	//	(50,000--52,000)	(50,000--51,000)
	Verde	(29,000--44,000)	//	(52,000--52,500)	(46,000--49,000)
	Rojo	(33,000--48,000)	//	(52,000--53,000)	(48,000--51,000)
	IR	(42,000--52,000)	//	(53,000--54,000)	(46,000--50,000)
	NIR	(39,000-52,000)	//	(53,000--58,000)	(47,000--51,000)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En la tabla III se presentan los resultados de los rangos de ND extraídos de las fotografías multiespectrales para el experimento 1 correspondientes a la prueba en clima soleado. Al igual que las fotografías del día nublado los datos presentados en la tabla III tienen un comportamiento parecido en los rangos correspondientes a los tratamientos de repello, pintura de agua y pintura de aceite, siendo el dato que difiere en los rangos el sin tratamiento. Además, se puede observar comparando ambas tablas que los comportamientos entre materiales sin y con tratamientos tienen parecido en su comportamiento entre datos de clima nublado y clima soleado, con la diferenciación en que todos los datos son más altos en los ND del día soleado.

Figura 4. **Tendencia central banda azul sin tratamiento**

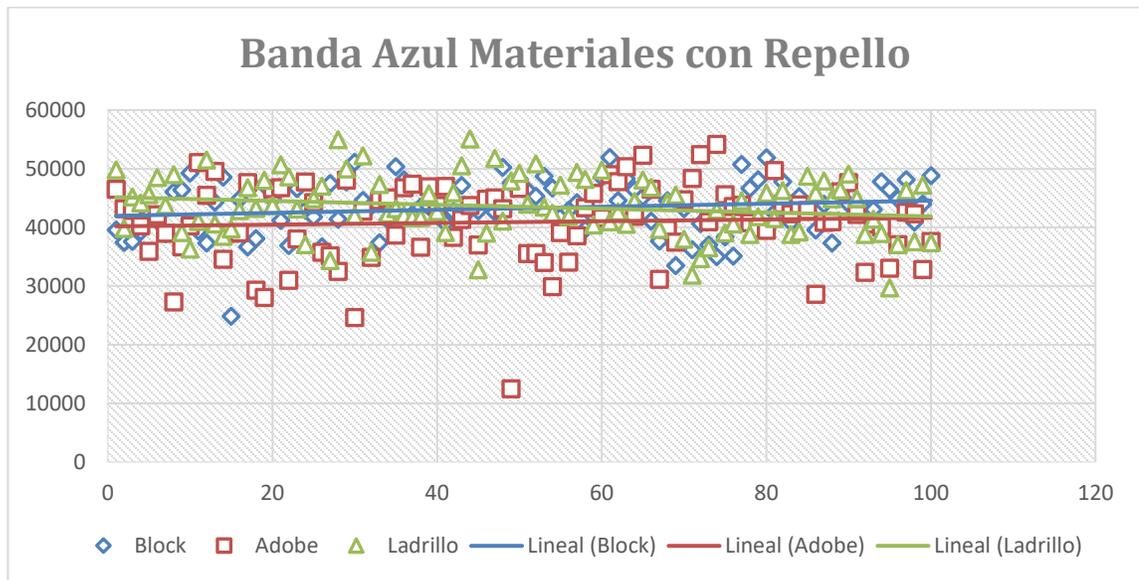


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Según los resultados que se observan en la figura 4, para datos de número digital de los píxeles, se puede observar que los materiales que no presentan un tipo de tratamiento de repello o pintura contienen diferencias significativas en los rangos de las bandas multiespectrales tanto entre materiales como entre tratamientos.

En la banda azul se puede observar de igual manera el comportamiento de las firmas espectrales del ND para materiales repellados (figura 5), en la que se puede observar como la línea de tendencia se marca entre los 40,000 y los 60,000 ND.

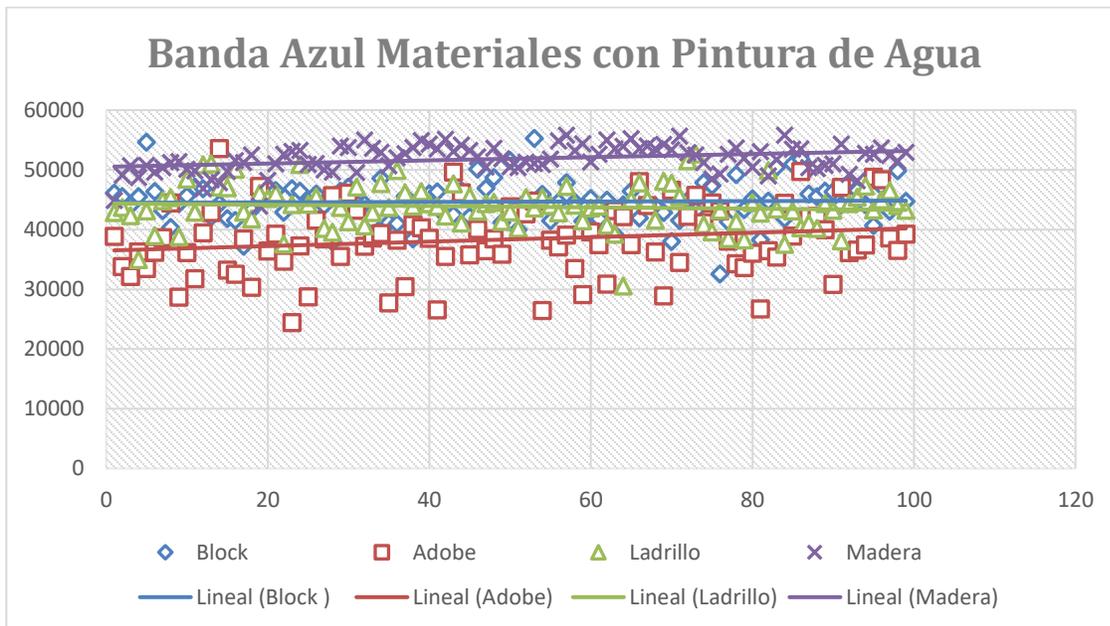
Figura 5. **Tendencia central banda azul tratamiento repello**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Además, se puede observar en la banda azul para materiales con el tratamiento de pintura de agua la misma agrupación de datos y comportamiento de línea de tendencia central entre los rangos de 40,000 y 60,000 ND que muestra una dificultad en la cámara multispectral, para diferenciar estos materiales con recubrimientos sobre su superficie (figura 6).

Figura 6. **Tendencia central banda azul tratamiento pintura de agua**

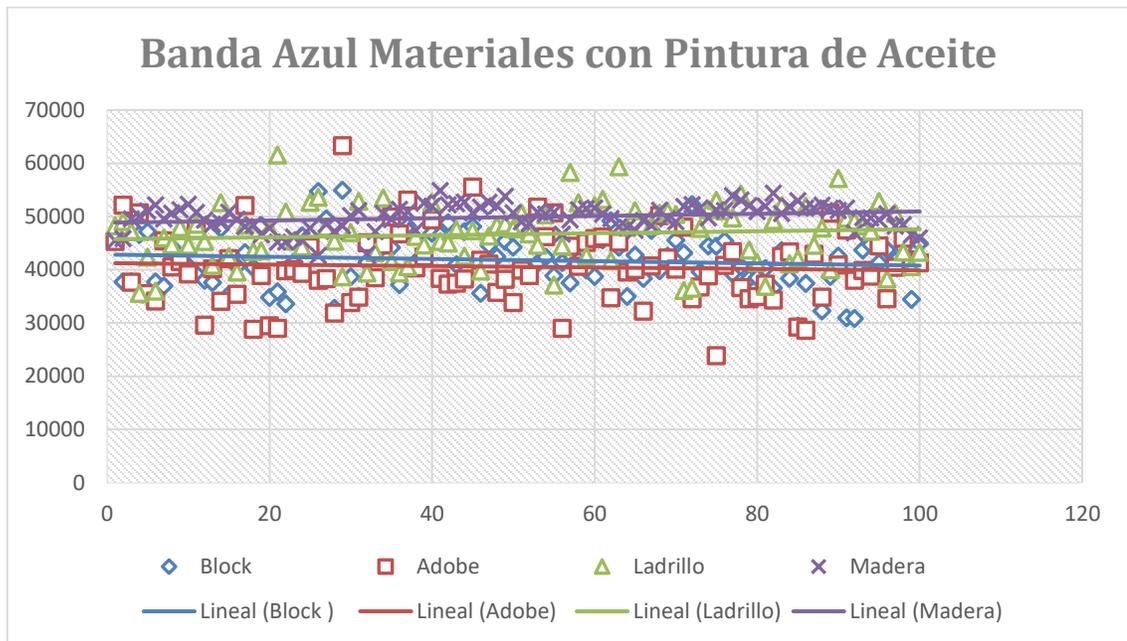


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los resultados muestran comportamientos similares en las muestras que se encuentran repelladas, con pintura de agua y con pintura de aceite. Esta condicionante en los resultados definió que las muestras de campo se realizarán buscando exclusivamente las viviendas que no contarán con los tratamientos, es decir, que se encontraran en el mismo estado constructivo que las muestras de la muestra de control.

De igual manera en la figura 7 se puede observar que la distribución espectral de ND en la banda azul para los materiales a los que se les aplicó el tratamiento de pintura de aceite, tuvo distribuciones similares al repello y pintura de agua.

Figura 7. **Tendencia central banda azul tratamiento pintura de aceite**

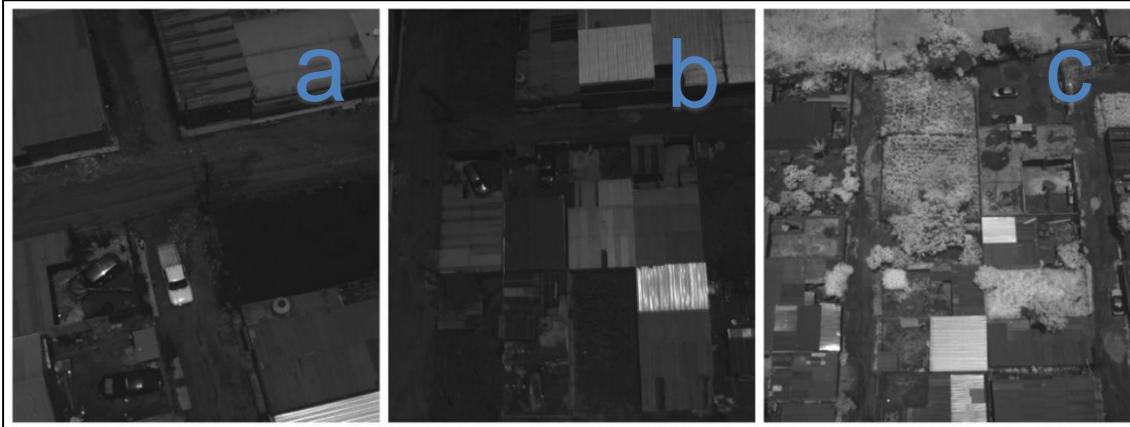


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.2. Experimento 2 vuelos de extracción de bandas multiespectrales a 3 alturas distintas, para determinación y reconocimiento de los materiales de construcción en las bandas R, G, B, IR y NIR, con VANT de uso civil

De los vuelos fotogramétricos realizados a 3 alturas distintas se obtuvieron, como resultado, fotografías aéreas oblicuas las cuales contienen la información de los números digitales de píxel para ser extraídos de las imágenes.

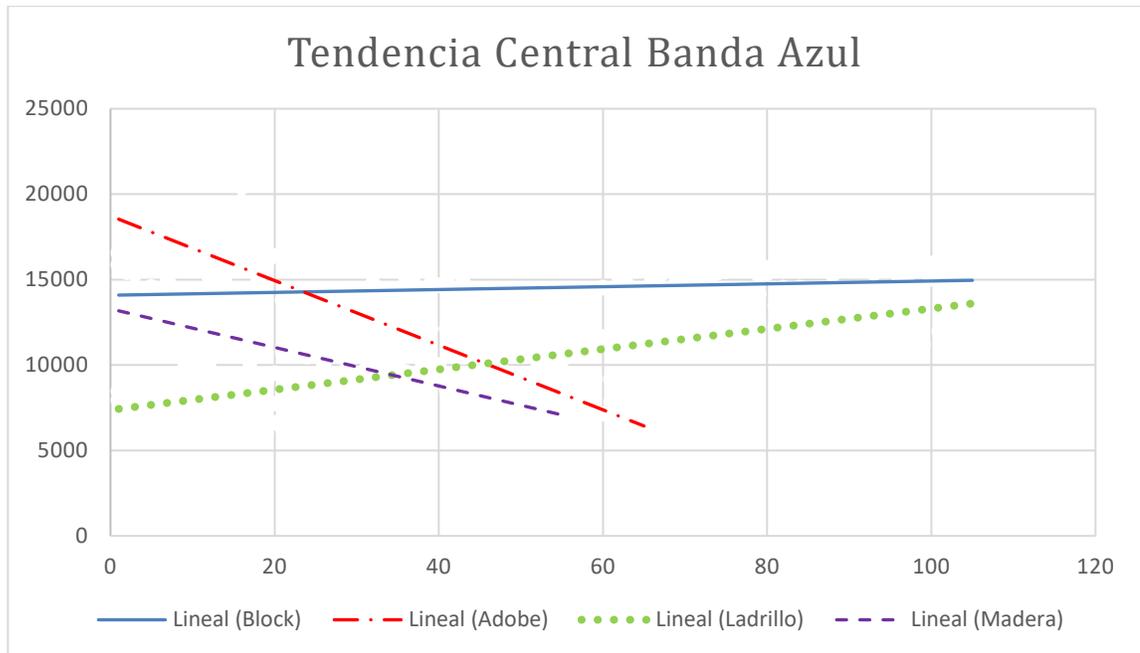
Figura 8. **Fotografías aéreas tomadas a a) 50 m, b) 75 m y c) 100 m de altura**



Fuente: [Fotografía de Kevin Nufio]. (Amatitlán. 2022). Colección particular. Guatemala.

Los resultados muestran la identificación de los rangos de datos tomados en vuelos de VANT de uso civil para lo que fue tomado en la fase de identificación de la respuesta espectral de números digitales realizados en el experimento 1 (figura 9).

Figura 9. **Resultados de la dispersión de datos de respuesta espectral en la banda azul para los materiales de construcción, obtenidos a través de vuelo fotogramétrico de VANT de uso civil a 50 metros**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para los resultados de estos vuelos se decidió mostrar solo lo obtenido en la banda azul a 50 metros (figura 9), con la finalidad de determinar los comportamientos de tendencia central observados durante la investigación. En estos se puede observar que existe traslape en las líneas de tendencia central, mostrando una dificultad en la distinción de materiales de construcción para la cámara multispectral durante el vuelo de VANT de uso civil.

Además, se puede observar en la figura 9, para la banda azul, que la interacción entre líneas de tendencia central tiene varias intersecciones que

demarcan una respuesta espectral que se encuentra en los mismos rangos para diferentes materiales de construcción, esta es una muestra ya que cada uno de los materiales cuenta con sus bandas correspondientes de donde fueron obtenidos los datos de las tablas I, II y III.

Tabla IV. **Comparación de la clasificación de números digitales de materiales de construcción**

Comparación de rangos					
***		50 metros	75 metros	100 metros	Testigo
Material	Banda	Rango ND	Rango ND	Rango ND	Rango ND
Block	Azul	(14,000--15,000)	(13,000--17,000)	(12,000--14,000)	(38,000--41,000)
	Verde	(11,000--15,000)	(20,000--20,500)	(13,000--27,500)	(32,500--33,500)
	Rojo	(10,000--16,000)	(14,000--33,000)	(12,000--26,000)	(32,000--33,000)
	IR	(14,000--20,000)	(23,000--28,000)	(12,500--26,000)	(31,000--31,500)
	NIR	(13,000--15,000)	(17,000--22,000)	(13,500--24,000)	(37,000--38,000)
Adobe	Azul	(6,000--20,000)	(7,000--12,000)	(7,000--10,500)	(10,000--11,000)
	Verde	(6,000--19,000)	(8,000--8,500)	(7,500--10,000)	(12,000--15,000)
	Rojo	(8,000--16,000)	(8,000--9,000)	(9,000--11,000)	(12,000--12,500)
	IR	(13,000--20,000)	(13,000--13,500)	(9,500--14,000)	(14,000--15,000)
	NIR	(11,000--14,000)	(10,000--11,000)	(10,000--14,000)	(12,000--13,000)
Ladrillo	Azul	(6,000--13,000)	(9,000--9,500)	(9,000--10,000)	(14,000--16,000)
	Verde	(11,000--14,000)	(10,000--10,500)	(12,500--14,000)	(15,000--20,000)
	Rojo	(12,000--16,000)	(10,000--11,000)	(13,000--15,500)	(21,000--24,000)
	IR	(10,000--19,000)	(15,000--19,000)	(14,000--15,500)	(21,000--23,000)
	NIR	(7,000--17,000)	(12,000--14,000)	(11,500--12,500)	(18,000--20,000)
Madera	Azul	(7,000--14,000)	(6,500--12,000)	//	(27,000--43,000)
	Verde	(11,000--14,000)	(7,000--8,000)	//	(29,000--44,000)
	Rojo	(9,000--16,000)	(7,500--12,000)	//	(33,000--48,000)
	IR	(12,000--19,000)	(15,000--19,000)	//	(42,000--52,000)
	NIR	(7,000--21,000)	(11,000--12,000)	//	(39,000--52,000)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En la tabla IV se puede observar los resultados para los vuelos de VANT a 3 alturas diferentes, entre los datos se observa que los rangos contienen valores de rangos más pequeños que los valores tomados con el testigo, además se puede observar que a diferentes alturas los rangos para cada material son parecidos para su mismo tipo, pero pocamente distinguibles de los demás materiales.

Debido a los resultados obtenidos del experimento 1, estos datos cuentan únicamente con las muestras para materiales sin tratamiento debido a que sería imposible realizar las muestras en tratamientos que no son diferenciables el uno del otro.

Estos datos se compararon con las firmas obtenidas de la misma metodología, ubicando viviendas de los materiales determinados según el proyecto RESIS II se identificaron viviendas con las características de materiales, que por los rangos obtenidos en la extracción de materiales mostrados en la tabla IV, cuya información contiene los rangos de las firmas espectrales obtenido a través de los vuelos fotogramétricos

Tabla V. Cuadro comparativo rangos y desviaciones estándar

Muestras		50 Metros		75 Metros		100 Metros		Testigo	
***		Rango	De%	Rango	De%	Rango	De%	Rango	De%
Material	Banda	***	***	***	***	***	***	***	***
Block	Azul	14500	9.63 %	15000	20.28 %	13000	11.96 %	(38,000--41,000)	22.77 %
	Verde	13000	26.56 %	20250	48.36 %	20250	40.16 %	(32,500--33,500)	20.75 %
	Rojo	13000	32.99 %	23500	44.06 %	19000	33.40 %	(32,000--33,000)	19.34 %
	IR	17000	45.25 %	25500	36.22 %	19250	37.19 %	(31,000--31,500)	16.43 %
	NIR	14000	22.17 %	19500	41.71 %	18750	36.90 %	(37,000--38,000)	16.56 %
Adobe	Azul	13000	53.98 %	9500	17.65 %	8750	18.50 %	(10,000--11,000)	23.40 %
	Verde	12500	55.81 %	8250	18.12 %	8750	27.44 %	(12,000--15,000)	21.30 %
	Rojo	12000	46.22 %	8500	11.38 %	10000	25.43 %	(12,000--12,500)	18.33 %
	IR	16500	46.37 %	13250	25.91 %	11750	24.37 %	(14,000--15,000)	17.05 %
	NIR	12500	39.59 %	10500	16.60 %	12000	26.32 %	(12,000--13,000)	17.97 %
Ladrillo	Azul	9500	22.86 %	9250	6.22 %	9500	6.43 %	(14,000--16,000)	9.36 %
	Verde	12500	35.60 %	10250	22.14 %	13250	30.04 %	(15,000--20,000)	29.36 %
	Rojo	14000	33.97 %	10500	20.89 %	14250	28.80 %	(21,000--24,000)	10.66 %
	IR	14500	34.27 %	17000	24.88 %	14750	23.03 %	(21,000--23,000)	27.54 %
	NIR	12000	34.74 %	13000	28.32 %	12000	19.30 %	(18,000--20,000)	11.38 %
Madera	Azul	10500	41.57 %	9250	16.69 %	0	///	(27,000--43,000)	20.18 %
	Verde	12500	45.85 %	7500	17.40 %	0	///	(29,000--44,000)	9.99 %
	Rojo	12500	42.66 %	9750	26.11 %	0	///	(33,000--48,000)	11.72 %
	IR	15500	25.63 %	17000	39.15 %	0	///	(42,000--52,000)	11.61 %
	NIR	14000	46.09 %	11500	20.86 %	0	///	(39,000--52,000)	15.50 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Para determinar la precisión con la que se está reconociendo los materiales de construcción en los vuelos de VANT de uso civil, se realizó un análisis de las desviaciones estándar de los datos evaluados, estos resultados se encuentran en la tabla V en donde se puede observar que entre menor es la altura de los vuelos de VANT, mayor es la dispersión de los datos.

Como se puede observar en la tabla V, de los 55 casos solo el 8 % de los casos (coloreados en verde), tuvo una respuesta positiva ante la identificación de las muestras con respecto a los rangos de las muestras de control para cada material sin tratamiento, pese que las desviaciones estándar de cada una de las muestras de campo a las 3 alturas distintas el 54 % de los datos no supera la desviación estándar permisible. También en el análisis se observa que la altura óptima para identificar datos sin desviaciones que varían más allá del 30 % es a partir de los 75 metros. Otro factor importante es la determinación de que en la mayoría de los casos las muestras que se tomaron de las 3 alturas distintas no varían tanto entre sí en sus medias de datos, pese a que si varían de los testigos.

De las alturas de vuelo como se demuestra en la tabla V, a una altura de 50 metros solo el 5 % de todos los datos extraídos para las firmas espectrales en las diferentes bandas cuentan con desviaciones estándar que no superan el 30 % definido como límite máximo, mientras que a 75 metros de altura el 75 % de los datos tuvieron desviaciones estándar, a 100 metros pese a que no se pudo encontrar muestras analizables de madera el 66 % de los datos de las firmas espectrales de los materiales restantes tienen una desviación que no supera los máximos permisibles.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Experimento 1 cuantificación de firmas espectrales de materiales de construcción delimitados como principales de estructuras primarias de viviendas en Guatemala

Dado que se ha realizado una distinción climática para obtener ND en día nublado contra el ND de día soleado como se puede ver en las Tablas II y III, se observa que los valores de estos son más intensos en el día soleado, esto se debe a que la cantidad de la reflexión de la luz solar es mayor resultando en mediciones que aumentan en el valor de ND para los rangos observados y el valor de píxel que se encuentra relacionado a este dato es por ende menor. Sin embargo, los resultados entre muestras con esta distinción climática se comportan de manera similar en los rangos, evidenciando que las lecturas de ND tienden a comportarse de la misma manera sin importar la cantidad lumínica que los impacte, esto indica que la cantidad de luz solar no incide en la distinción de materiales, pero si en los rangos que estos presentaron.

Según los datos observados en las tablas II y III, también se puede analizar que la cámara tiene dificultades para distinguir entre ciertas combinaciones de materiales. Se pudo identificar que la madera y el block contienen valores que en sus rangos de las bandas evaluadas cuentan con valores prácticamente sin distinción alguna. Así mismo, el adobe y el ladrillo presentan las mismas dificultades para diferenciarse entre sí, esto puede indicar que los materiales que tienen coloración parecida pueden presentar resultados de ND en los mismos rangos, al ser el block y la madera materiales claros y el adobe y el ladrillo materiales oscuros.

Esto también se puede evidenciar en la figura 3 donde se observa la distribución de datos y distribución de líneas de tendencia central, en la que los puntos indican una dispersión de datos muy parecida para madera y block, así como se muestran dispersiones parecidas entre el adobe y el ladrillo. Para ambos casos las líneas de tendencia central se intersectan entre block y madera, como para adobe y ladrillo, esto indica que en algún momento las medias de los materiales pueden llegar a ser los mismos, por lo que al analizarlos fue complicado diferenciar materiales solo por el valor resultante.

En la figura 3 también se puede observar que la dispersión de los datos es mayor en materiales que tienen colores claros (madera y block), así como las dispersiones de datos son menores en materiales con colores más oscuros (ladrillo y adobe), lo cual puede ser generado por imperfecciones en el material, las cuales son más distinguibles si los materiales claros presentan imperfecciones que crean pequeñas sombras por irregularidades en la superficie. Esta distinción no se puede observar tan claramente en materiales oscuros dado que a la cámara multiespectral le es más difícil diferenciar entre sombras por imperfecciones y el color real del material.

Este resultado demuestra que, con estas cámaras multiespectrales, no importando la banda que se utilice para esta identificación, será prácticamente imposible hacer una separación en los ND entre el material de block y de madera. La causa de este fenómeno está relacionada con la capacidad y las correcciones que se le puedan hacer a las imágenes en sus valores de ND, dado que el uso que se les da mayoritariamente es para la identificación de aspectos de firmas espectrales de plantas en cultivos, es posible que las correcciones radiométricas ayuden a mejorar la calidad de la identificación de las firmas dado que los materiales pueden presentar muchas dificultades a las cámaras multiespectrales para definir muestras. Otro factor importante a mencionar es la diferencia que

existe entre los tratamientos, estas respuestas se pueden dividir en dos clases según las tablas II y III, la primera es la de los materiales sin tratamiento y la segunda los materiales con cualquier tratamiento.

Debido a los resultados de los materiales de construcción para clima nublado y clima soleado en los que se puede observar que el comportamiento de los ND no se ve afectado por la cantidad lumínica aportada por el sol, se decidió utilizar los datos para comparaciones con vuelos de VANT de uso civil con los datos de la tabla III que corresponde al día soleado, dado que las imágenes obtenidas de los vuelos realizadas también fueron realizadas en día soleado y despejado de nubes. Dentro de este análisis de resultados se puede observar en la Tabla III que los datos de los tratamientos de repello, pintura de agua y pintura de aceite tienen rangos similares dentro de los valores de píxel de 40,000 a 50,000 en el ND. Estos tratamientos son aplicados por las personas a los materiales de construcción con la finalidad de impermeabilizar y mejorar la calidad de los materiales originales, además, estos cumplen la función de disminuir el calor que se transmite en el material hacia adentro de las estructuras, esto se logra reflejando mayor cantidad de luz solar por lo que las lecturas presentadas se elevan. Esto se puede evidenciar en las figuras 4, 5 y 6 en las que se puede observar que los valores de los tratamientos mencionados son más elevados que los datos de materiales sin tratamiento de la figura 3, además, las dispersiones de los materiales con tratamiento aplicado son pocas sin importar qué tratamiento o que material sea el aplicado, por lo que para este tipo de cámaras multiespectrales en esta configuración de bandas es posible la identificación de materiales que tienen tratamientos contra los que no tienen, pero no pueden diferenciar.

Según los resultados de este experimento se define que las firmas espectrales fueron extraídas de los materiales pero que por los resultados de la

cámara multispectral, se estima que los materiales claros tendrán más problemas de dispersión de datos que los materiales oscuros debido a la posibilidad de encontrar imperfecciones generadoras de sombras y que los materiales, que en su composición granulométrica tengan colores similares se dificultará la distinción de los elementos en los rangos de ND.

4.2. Experimento 2 vuelos de extracción de bandas multispectrales a 3 alturas distintas, para determinación y reconocimiento de los materiales de construcción en las bandas R, G, B, Ir y Nlr, con VANT de uso civil

Dados los resultados evidenciados en la tabla III, y que se demuestra según las figuras 4, 5 y 6 en las dispersiones de datos que las respuestas de los ND en los materiales con tratamiento de repello, pintura de agua y pintura de aceite, se encuentran agrupados en sus valores resultantes se decidió realizar solo muestras de campo reconocibles y diferenciables, por lo cual para la experimentación de campo se decidió evaluar únicamente de los materiales de construcción que no tienen tratamientos, es decir el block, ladrillo, adobe y la madera desnuda, para poder observar si existe una distinción entre materiales en el vuelo y si los materiales son reconocibles con respecto a lo que se realizó en el experimento 1, esto además, facilitó la identificación de los materiales de campo debido a que los valores de reflexión no generarían tanto ruido debido a que los materiales tienen colores opacos predominantemente permitiendo absorber más luz.

4.2.1. Resultados a diferentes alturas

Como se puede observar en la figura 8 los comportamientos de los vuelos en la línea de tendencia central, los materiales al igual que en el experimento 1

siguen presentando comportamientos similares lo que genera dificultad para reconocer materiales y distinguir los mismos, sin embargo, en la tabla IV se puede observar que entre las alturas distintas de vuelo los rangos de los materiales se comportan de manera parecida.

Entre los materiales se puede observar que el block y el ladrillo si se pueden separar en la dispersión de los datos al estar en rangos distintos, sin embargo, la madera y el adobe presentan sobre posición en su comportamiento de tendencia central con los otros dos materiales por lo que no se puede definir la diferencia entre materiales. No obstante, los materiales presentan una tendencia a comportarse de la misma manera entre muestras de alturas diferentes del mismo material por lo que se estima que se está reconociendo los mismos valores de ND entre muestras (figura IV). En el análisis que se realizó es evidente que ninguna de las bandas de manera individual puede separar la información para poder identificar de manera automática los materiales.

Otro problema que se observó en los vuelos es que entre más alto se vuela, se necesita que las viviendas sean al menos de dos niveles para poder contar con la información de las paredes de las mismas y así poder identificar las firmas espectrales en cualquier valor resultante, esto fue evidenciado en la tabla IV en la que se puede observar que no se cuenta con un dato para las casas de madera a un nivel de 100 metros de las muestras, debido a que no se pudo identificar las laterales de viviendas que solo cuentan con 1 nivel por lo que fue imposible extraer la información de estos datos para esa altura determinada.

De los 55 datos que representan el total de valores se genera que solo el 8 % contiene una concordancia con los rangos de firmas espectrales entre materiales de control y las muestras tomadas en los vuelos, esto representa un valor bajo de concordancia entre las firmas de cada material, con los que el VANT

de uso civil con la cámara multispectral puede analizar. Estos valores difieren de los datos del testigo por las diferencias de la distancia que la luz que se refleja de los materiales de construcción es mayor en los vuelos que al momento de su extracción, sin embargo, pese a que se puede realizar una corrección a los ND para que tomen valores más altos considerando estas distancias, los comportamientos entre los ND siguen siendo demasiado parecidos entre materiales por lo que la finalidad de identificarlos y diferenciarlos entre ellos sigue siendo inalcanzable para estos sensores, en las condiciones del experimento.

Una forma de corregir estos errores podría ser combinar las bandas espectrales de diferentes rangos para encontrar una alineación de fotografías que permita la identificación de materiales de forma automática, esto puede ser realizado a través de modelos tridimensionales para poder observar las laterales de las viviendas, sin embargo, esto queda fuera de los procesos de esta investigación, debido a que se debe realizar con otro tipo de sensores, como lo son las cámaras de ojo de pez, que permitan tomas oblicuas panorámicas para la creación de los modelos.

De igual manera, observando el comportamiento de las tendencias entre muestras de los mismos materiales a alturas distintas, se identificó la desviación estándar de los datos, para verificar que los mismos se encuentren con desviaciones que permitan comprobar que el comportamiento está dentro de los límites permisibles. Como se puede observar en la tabla V los datos de las desviaciones estándar del testigo obtenidos a partir de los resultados del experimento 1 no superan el 30 %, por lo que para los vuelos se destinó este rango de porcentaje como el mínimo que no debe de superar para ser considerados datos que están dentro de los rangos permisibles de cada banda que los materiales deberían de presentar en cada uno de los vuelos.

La causa de este fenómeno se debe a la resolución de las cámaras, entre más bajo vuela el VANT más alta es la resolución de las fotografías por lo que las imperfecciones del terreno generan ruido a los datos. En este caso las imperfecciones de terreno pueden generar que la luz solar rebote de maneras irregulares, lo que genera errores de dispersión de la información, además, las imágenes utilizadas deben ser analizadas de manera oblicua por lo que otros materiales de construcción distintos, en techos e inclusive los pisos de concreto y adoquín pueden generar lecturas que disminuyan la capacidad general de la imagen para transmitir los ND de los píxeles por errores de borde o por los mismos métodos estadísticos que se utilizan para generar la información de píxeles en las generaciones de modelos o imágenes.

Según los datos relacionados con las dispersiones de los análisis reflejados en la Tabla V y de los resultados de todas las gráficas de dispersión realizadas para el experimento, las bandas que contienen las respuestas más prometedoras para una futura calibración de búsqueda de los materiales son la banda azul y la banda del infrarrojo medio.

CONCLUSIONES

1. Según los resultados de la caracterización de la respuesta de la firma espectral en las bandas R, G, B Ir y Nlr, para los materiales constructivos definidos en el Proyecto RESIS II, se determina que en los resultados de Números Digitales, las bandas que cuentan con las respuestas más prometedoras para identificar materiales son la azul y la del infrarrojo, dentro de las cuales solo se puede diferenciar materiales de construcción sin tratamientos, dado que estos absorben y reflejan la energía lumínica de la radiación solar con mayor facilidad y diferenciación. Además, en el caso de muestras con aplicación de repello, se cubre el material original impidiendo la absorción de la radiación solar y esto no permite obtener un valor de reflectancia que se pueda diferenciar en Número Digital de pixel, dentro de los rasters analizados. Así también para las muestras con aplicación de pintura de agua y aceite se observan altos valores de reflectancia.
2. La cuantificación de los rangos de los números digitales con tratamientos se encuentra entre los 37,000 a 52,000 ND, sin diferenciación en cada uno de los materiales dado que la dispersión de esta respuesta de la reflectancia calculada en ND, es muy alta y homogénea entre muestras, por lo que solo es posible determinar diferencias entre materiales de construcción sin tratamiento, determinando así que los valores de reflexión en estos son menores, entre los 12,000 a los 50,000 ND, pero con diferenciación entre materiales, siendo el ladrillo, con el rango de 10,000 a 15,000 ND y el adobe, con el rango de 14,000 a 24,000 ND los que más se diferencian entre los materiales y con un poco más de dificultad de

diferenciación entre el block y la madera, debido a que sus rangos de respuesta espectral se encuentran entre los 31,000 a 40,000 ND y 31,000 a 50,000 ND respectivamente por lo que se determinó no utilizar las muestras con tratamientos para fase de vuelos de identificación de materiales de construcción.

3. De las alturas de vuelo, a través de los análisis de desviaciones estándar, se determina que, en el rango de 75 metros de altura de vuelo, es la mejor para la identificación de las firmas de los materiales de construcción con sensores multiespectrales en las bandas R, G, B Ir, y Nlr, en donde el 54% de los datos de desviación no superó la desviación estándar promedio del testigo y que se pueden obtener respuestas de todos los materiales. En las otras 2 alturas de vuelos determinadas se estima que, a pesar que a 100 metros de altura se tiene una correlación del 66% que no supera la desviación estándar promedio del testigo y mayor a la de 75 metros, puede observarse que por la altura de vuelo es prácticamente imposible obtener muestras de casas que solo cuentan con 1 nivel, por lo que todo el material de madera no se puede muestrear y para las muestras tomadas a 50 metros se obtuvieron valores con la menor similitud al testigo, con solo un 5% de correlación, esto debido a que el nivel de detalle de la resolución es más alto, lo que genera que la interferencia, introducida a través de los valores de reflectancia de otros elementos, distorsionan la respuesta de los materiales de construcción analizados.
4. Según los datos de rangos de firmas espectrales y de desviaciones estándar promedio, que se utilizaron para definir la precisión del reconocimiento de las firmas espectrales con VANT de uso civil y cámara Mikasense Rededge en las bandas R, G, B, IR y Nlr, se determina que de las 55 muestras de rangos analizadas contra el testigo solo el 8% de datos

dio una respuesta positiva por lo que es imposible identificar con certeza que la firma extraída en condiciones controladas es la misma que la extraída en vuelos con VANT esto debido a que el distanciamiento de las muestras, hace que la señal de la respuesta espectral llegue con menos fuerza al sensor y a que existen variables climáticas y de luminosidad solar que no son controlables por el investigador.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar, en futuras investigaciones con VANT de uso civil, para la identificación de los materiales típicos constructivos según el estudio RESIS II listados en este trabajo de investigación, las bandas azul e infrarroja, dado que estas presentaron mayor facilidad en diferenciación de todos los materiales constructivos, haciendo énfasis en posibles combinaciones de bandas para facilitar los procesos de identificación.
2. A los profesionales en geomática generar a través de estudios como el que se presentó, la realización de algoritmos matemáticos afinados que permitan la corrección de números digitales de pixel de los distintos materiales, que además de incurrir en el campo de la construcción también puedan afectar eventos y focos de contaminación de materiales de desecho o para investigaciones que correlacionan materiales constructivos con algunas plagas donde la identificación de estos permita determinar la locación de chinches picudas, relacionadas directamente con la transmisión de la enfermedad de Chagas.
3. Indagar en estudios más profundos utilizando otras variables como la contaminación ambiental y otros valores climáticos; así como también, utilizando fotografías oblicuas e incluso construyendo modelos tridimensionales que permitan la identificación de materiales en los elementos constructivos, utilizando sensores de cámaras de ojo de pescado las cuales facilitan la obtención de dichos modelos para el reconocimiento de firmas espectrales en materiales de construcción que no se pudieron identificar en las alturas más altas de este trabajo.

4. De igual manera se recomienda utilizar otro tipo de sensores como la tecnología LIDAR para identificar los materiales analizando la composición estructural pueda ser identificada a través de las texturas del material evaluado cuando tiene tratamientos de repello.

REFERENCIAS

1. Alchapar, N. L., Cantaloube, E. N. y Garrido, G. L. (2012). *Reflectividad solar de revestimientos horizontales en la envolvente urbana y su capacidad para mitigar la isla de calor*. Argentina: Universidad Nacional de Salta.
2. Andino, R. E. (mayo, 2009). Catálogo de firmas espectrales de especies florales, en la Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Fase 1. *Ciencias Espaciales*, 1(1), 1-12. Recuperado de <https://www.camjol.info/index.php/CE/article/view/610/435>.
3. Balta, J. J., y Meza, J. F. (2015). *Sistematización de la información estructural de edificaciones en una plataforma geomática para la elaboración de mapas de riesgo sísmico en el distrito de Huaral* (Tesis de licenciatura). Universidad Ricardo Palma, Perú.
4. Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., y Rossi, C. (2007). *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones* (Tesis de licenciatura). Universidad politécnica de Madrid, España.
5. Caballero, L., Arce, F., y Feijoo, S. (febrero, 1996). Fotogrametría y análisis arqueológico. *Revista de arqueología*, 186, 14-25.

6. Castañeda, M. B. (2010). *Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS: Un libro práctico para investigadores y administradores educativos*. Brasil: Edipucrs.
7. Chuvieco, E. (1999). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España: Rialp.
8. Claros, R. A., Guevara, A. E., y Pacas, N. R. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados* (Tesis de doctorado). Universidad de El Salvador, El Salvador.
9. Cusidó, J. A., Devant, M. V., y Riba, J. (marzo, 1996). Aplicaciones de la termografía infrarroja y la espectrorradiometría en el estudio del deterioro del patrimonio nacional. *Informes de la Construcción*, 48(443), 15-26.
10. Escalante, J. O., y Porras, H. (junio, 2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119-140.
11. Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. Costa Rica: Autor.
12. Flores, S. E., y Hongn, M. E. (enero, 2012). Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 25-32.

13. Garzon, R., y Rincon, J. (2017). *La geomática: definición, características, objeto y método de estudio* (Tesis de licenciatura). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
14. Hernández, I. E. (agosto, 2015). Identificación de asentamientos irregulares y diagnóstico de sus necesidades de infraestructura en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, (87), 88-101.
15. Hernández, J. (2011). *Procesamiento digital de imágenes*. Chile: Universidad De Chile. Recuperado de <https://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento%20Digital%20de%20Im%C3%A1genes%20-%20Jaime%20Hern%C3%A1ndez%202011.pdf>.
16. Hernández, M. Q. (2011). *Tecnologías de la Información Geográfica (TIG): cartografía, fotointerpretación, teledetección y SIG*. España: Universidad de Salamanca.
17. Lerma, J. L. (1999). *Reconocimiento de materiales y deterioros en fachadas arquitectónicas*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
18. Maass, S. F., y Valdez, M. E. (2003). *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
19. Mendivelso, J. C. (agosto, 2002). El trabajo del geógrafo y las nuevas tecnologías de la información y la comunicación: Entre la cartografía

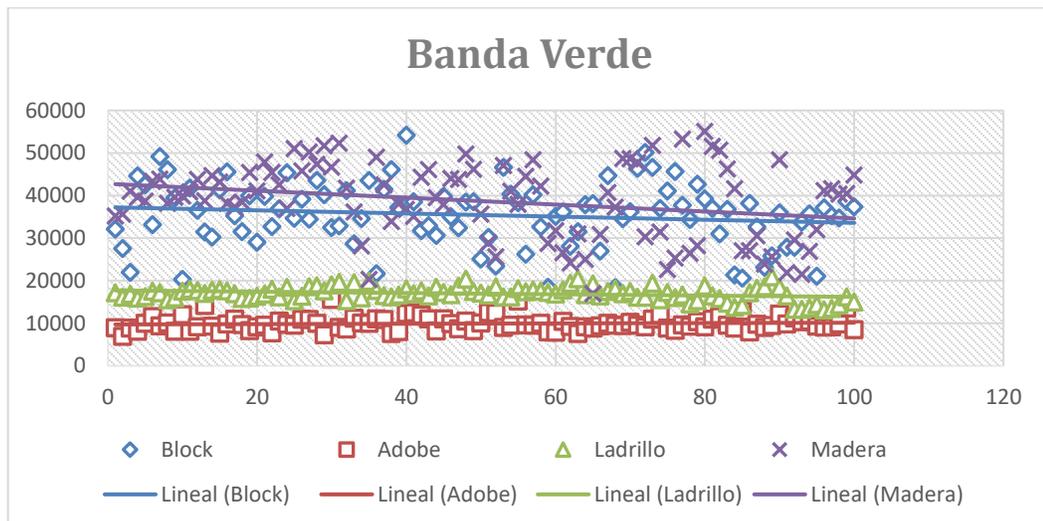
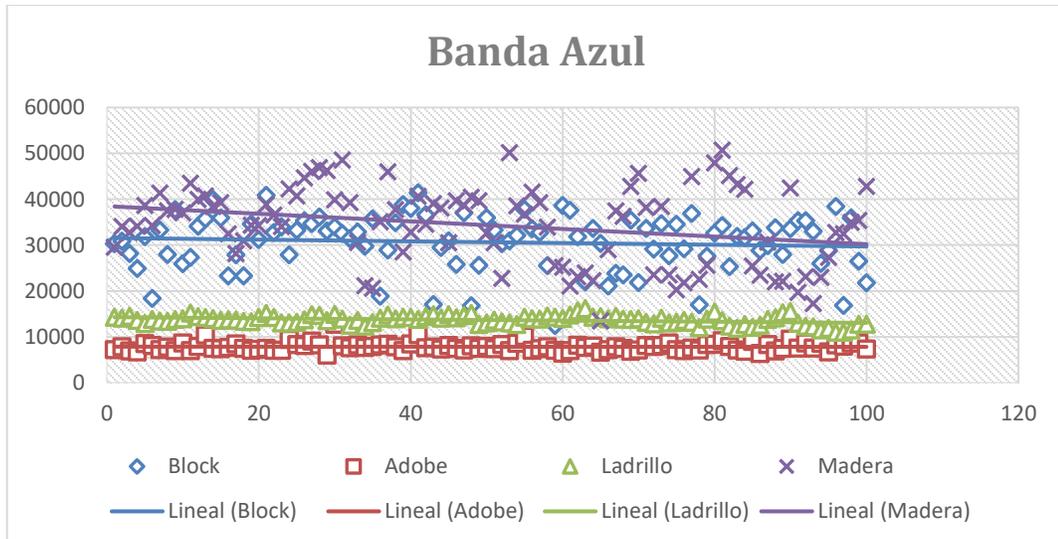
digital y la geografía virtual: una aproximación. *Scripta Nova*, 6(119), 1-16.

20. Miguel, S. P. J. (2004). *Sistemas de información geográfica*. España: Editorial UNED.
21. Mitsikostas, E. (2017). *Monitorización y optimización de tierras con drones y fotogrametría aérea para aplicaciones de precisión en agricultura* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España.
22. Molina, E., Escribano, J. M. G., Marroquín, G., Rodríguez, M. J. G., Escobar, J. J., Escalante, M. P. y Fernández, Y. T. (2009) *Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centroamérica AL09-PID-23*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
23. Pozuelo, F. B. (2003). *Fotogrametría analítica*. España: Universidad Politécnica de Catalunya.
24. Ruiz, W. S. (2006). *Técnicas de minería de datos aplicadas en la detección de fraude: estado del arte* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
25. Shippert, P. (2013). *Número digital, radiancia, y reflectancia*. Estados Unidos: Autor.
26. Yépez-Rincón, F. D., Chávez-Gómez, J. H., Ferriño-Fierro, A. I., Aguilar-Durán, J. J., y Sánchez-Gaytán, H. J. (s.f.) *Análisis espectral de*

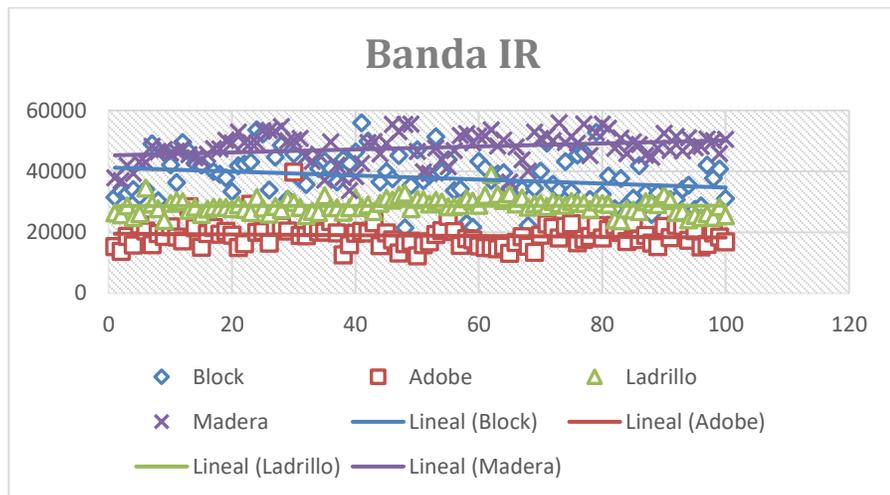
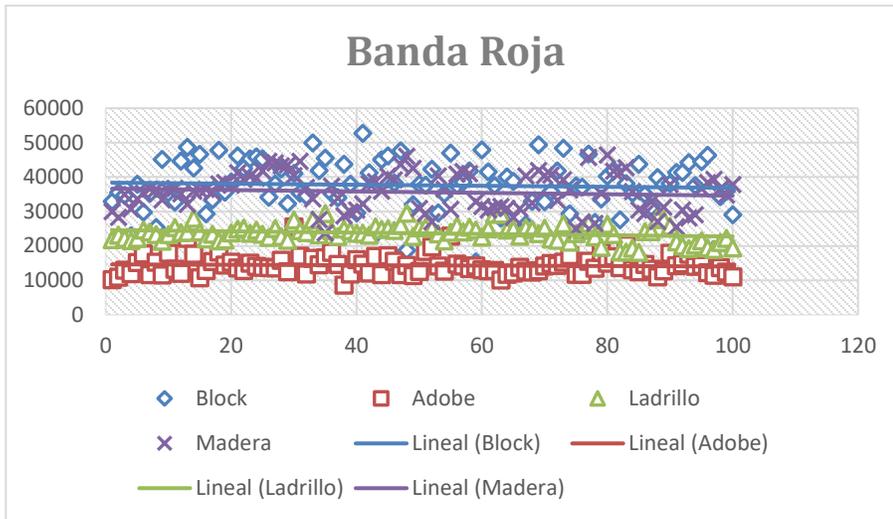
materiales y geometría de muros existentes previo a la aplicación de cargas. México: Universidad de Guanajuato.

APÉNDICES

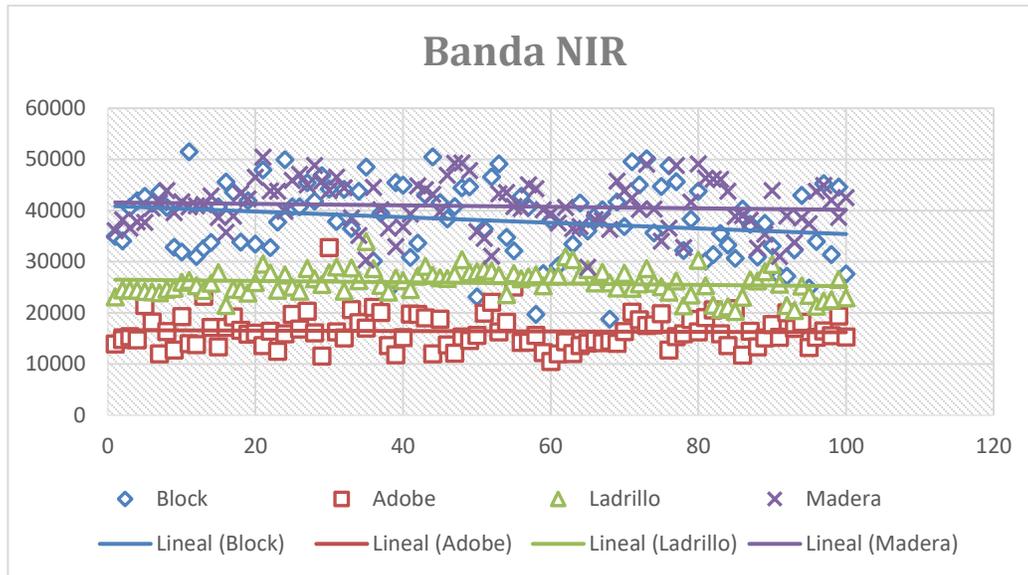
Apéndice 1. **Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día nublado tratamiento sin repello**



Continuación apéndice 1.

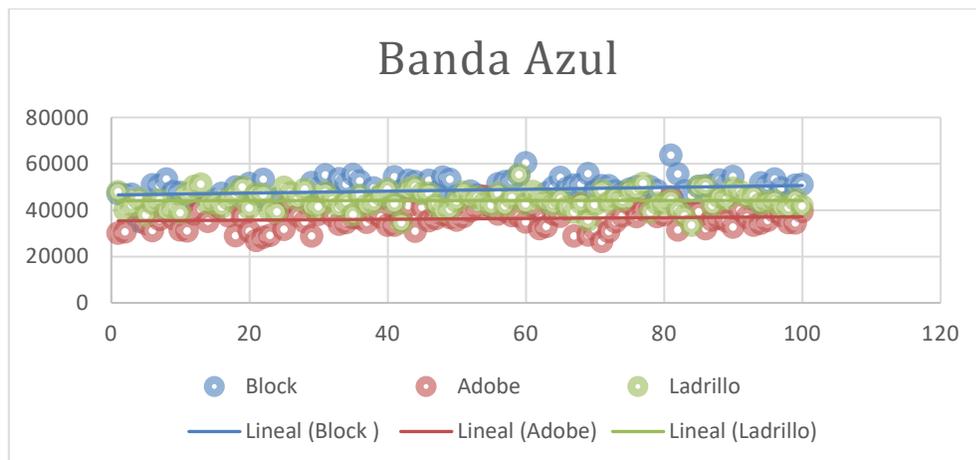


Continuación apéndice 1.

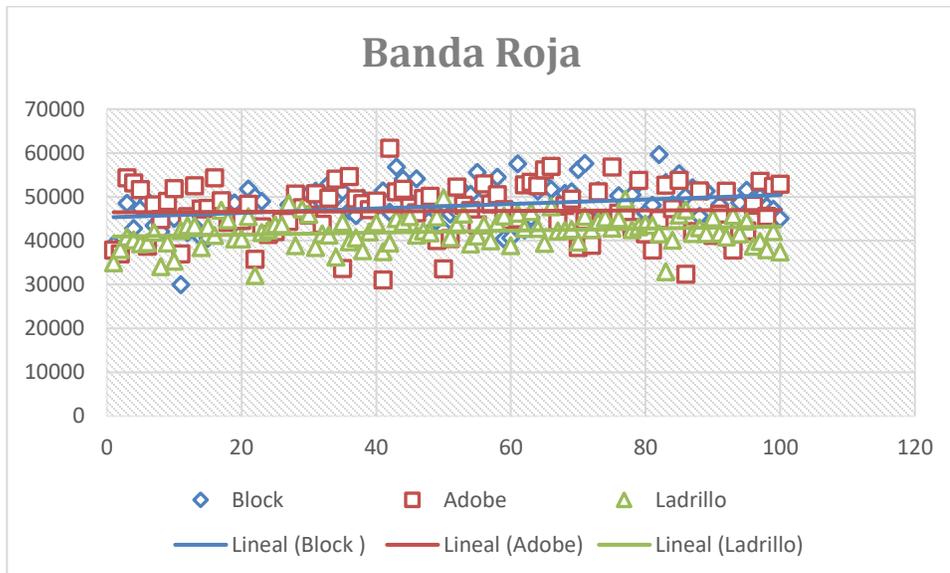
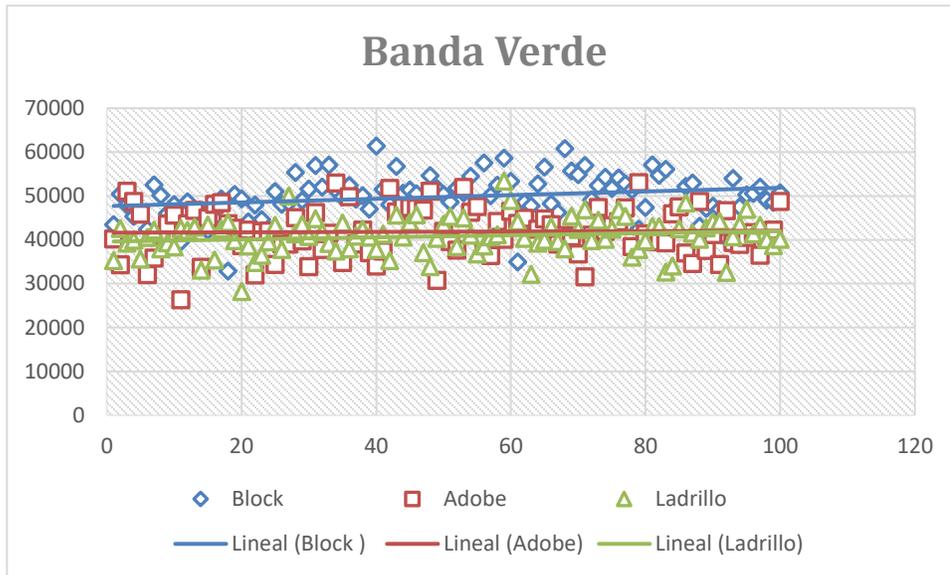


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

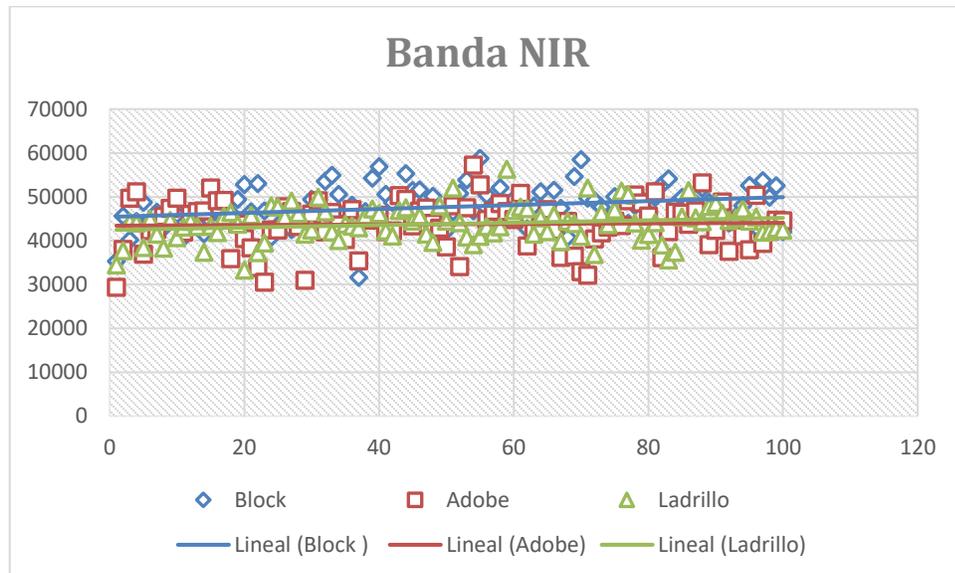
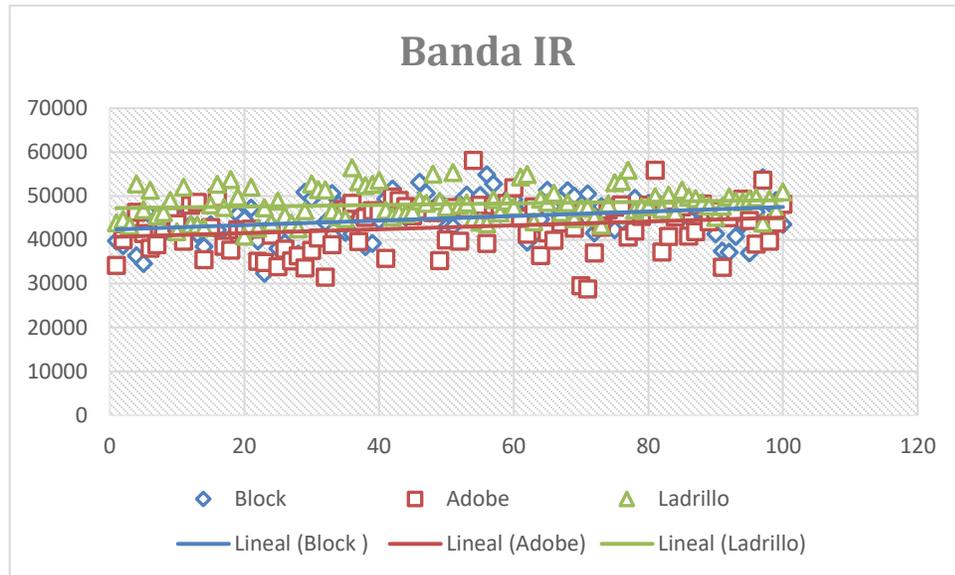
Apéndice 2. Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día nublado tratamiento repello



Continuación apéndice 2.

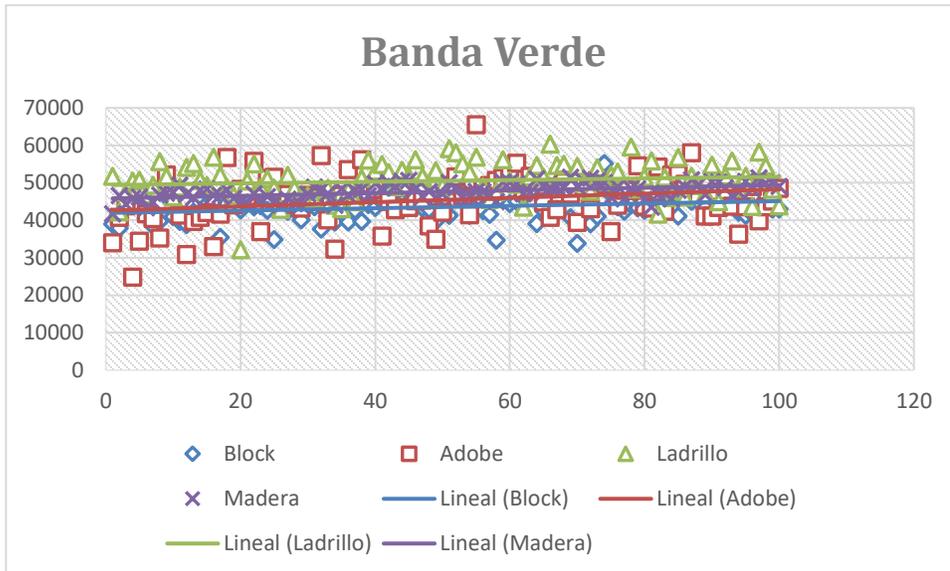
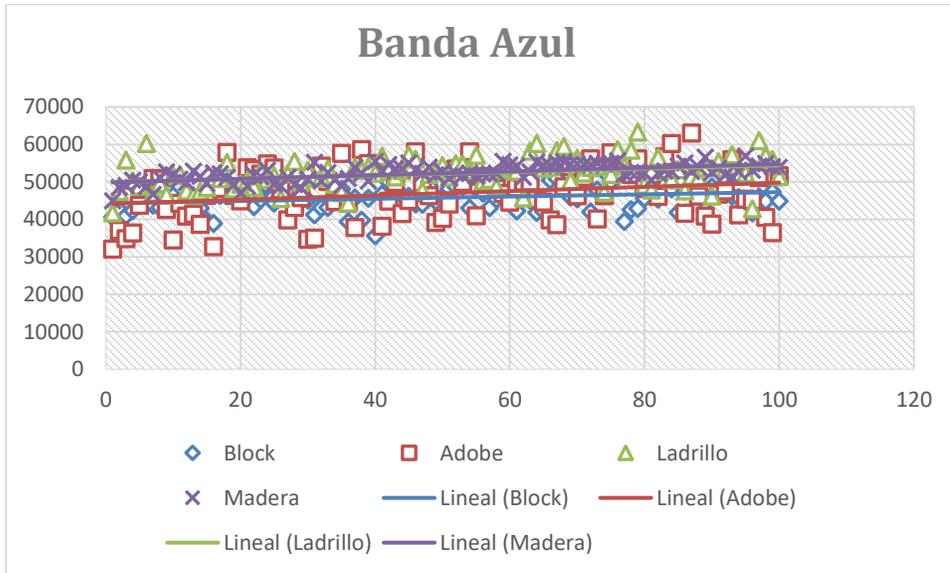


Continuación apéndice 2.

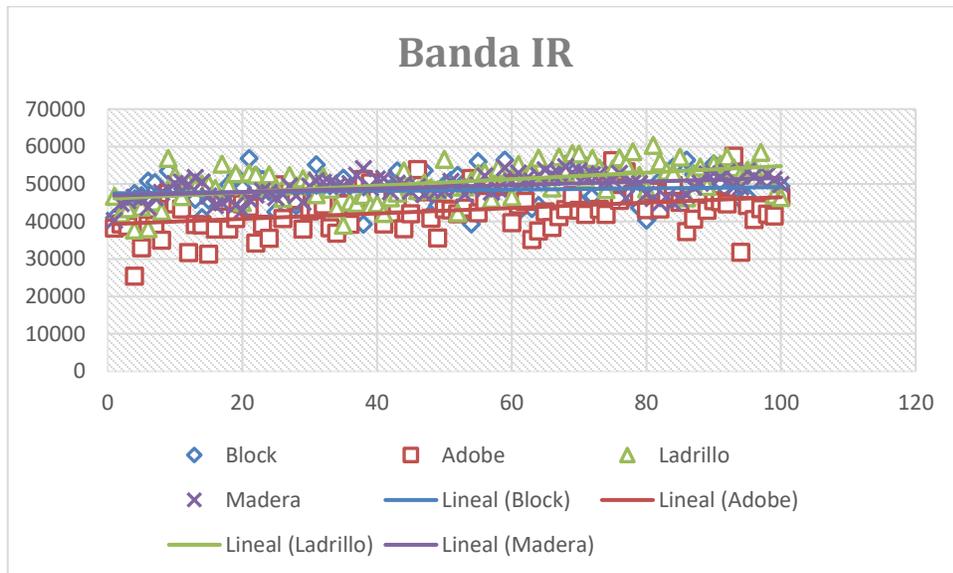
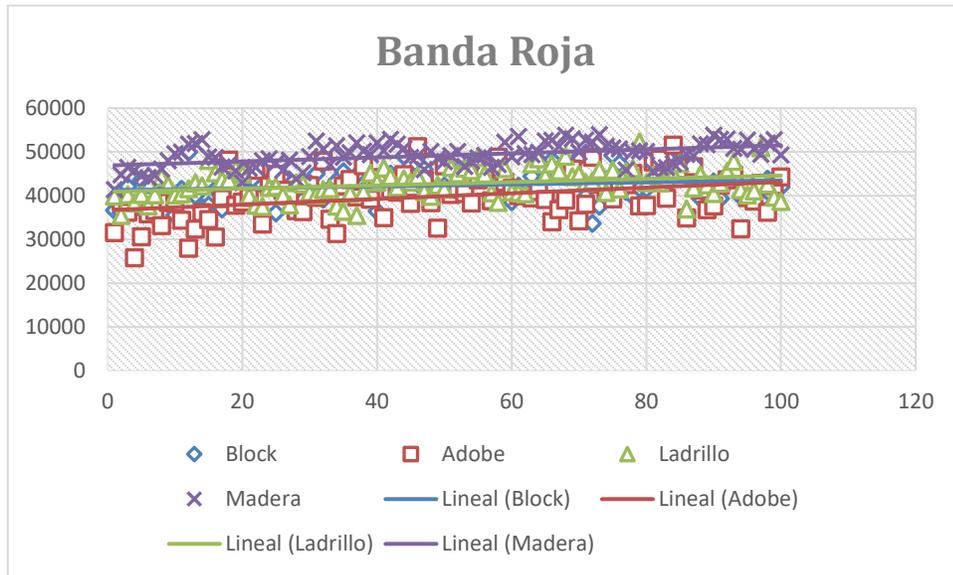


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

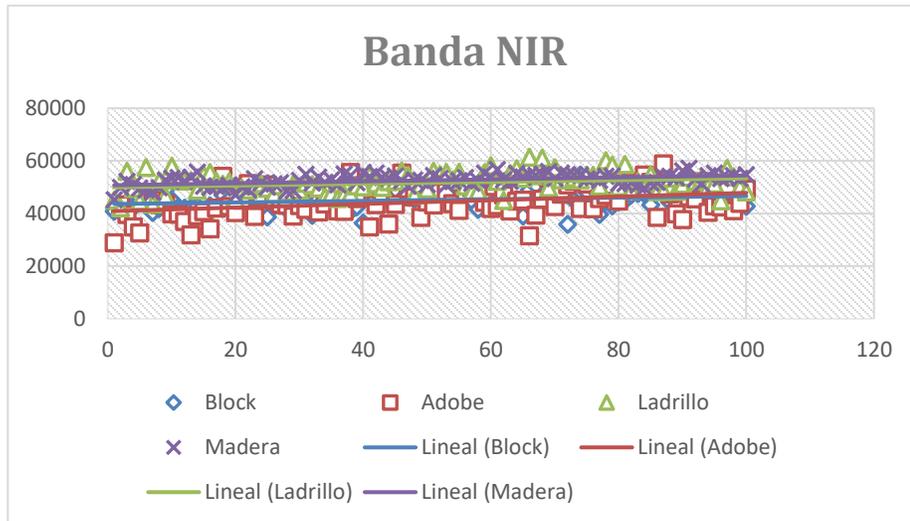
Apéndice 3. **Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día nublado tratamiento repello pintura de agua**



Continuación apéndice 3.

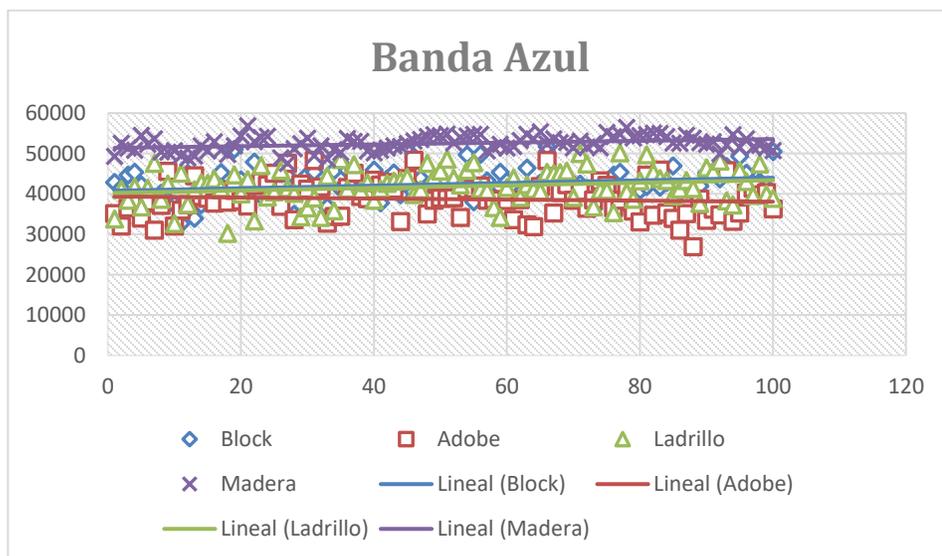


Continuación apéndice 3.

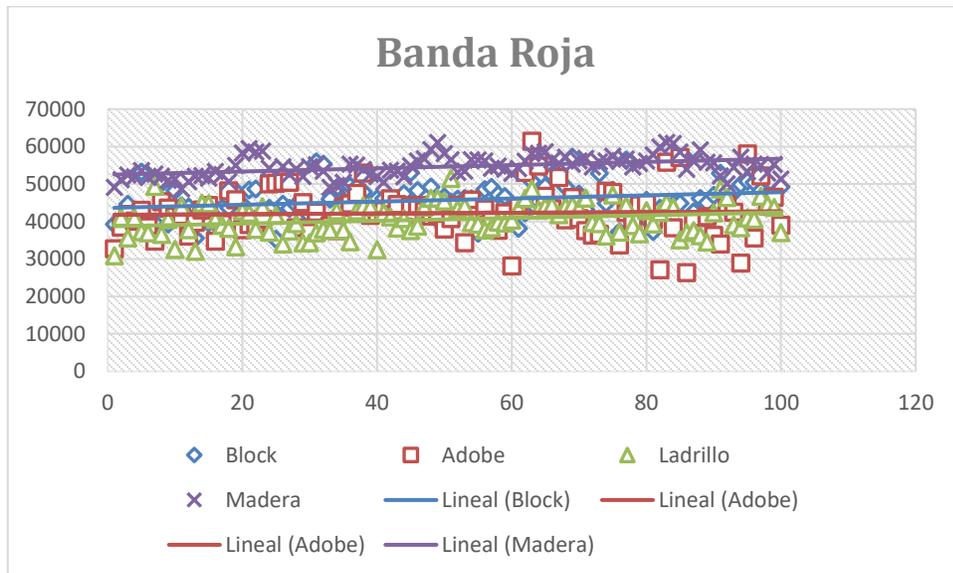
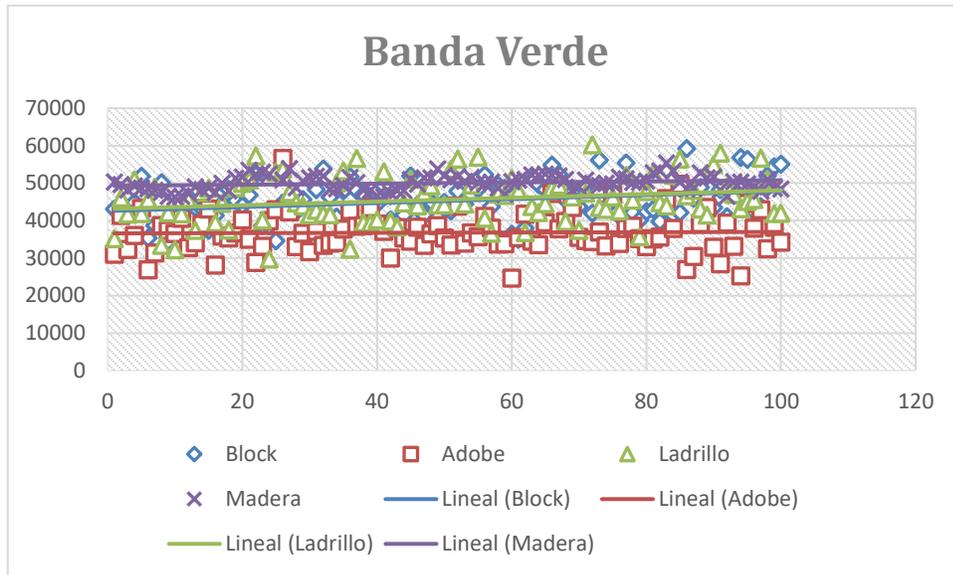


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

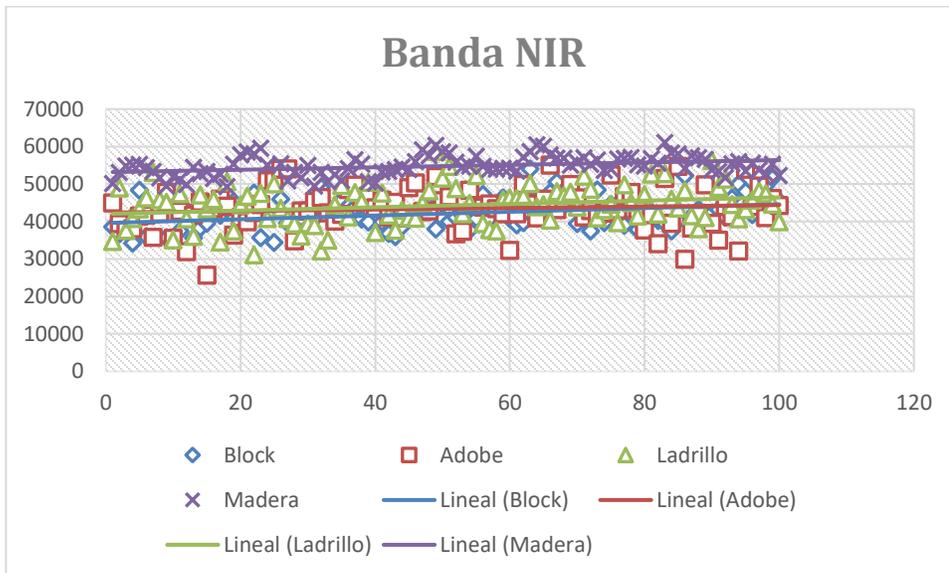
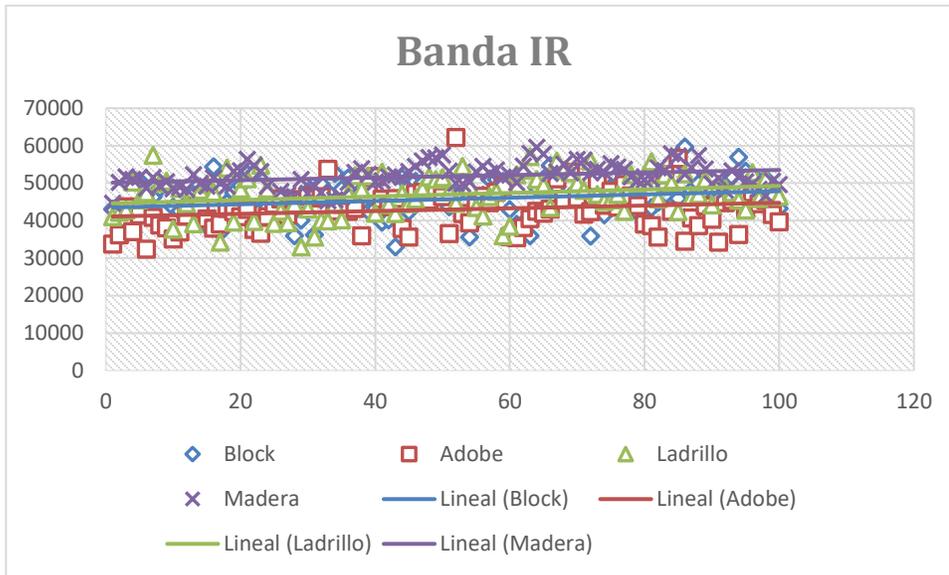
Apéndice 4. Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día nublado tratamiento repello pintura de aceite



Continuación apéndice 4.

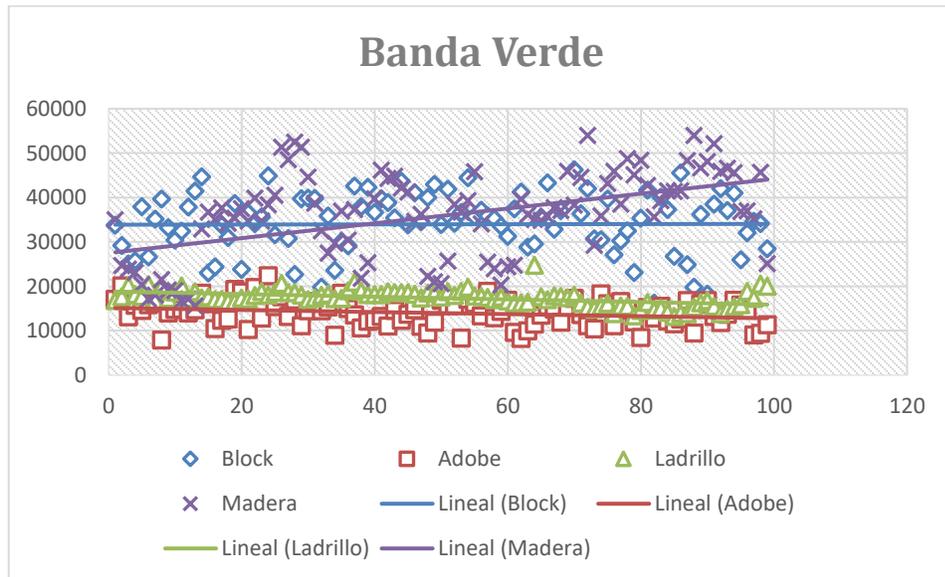
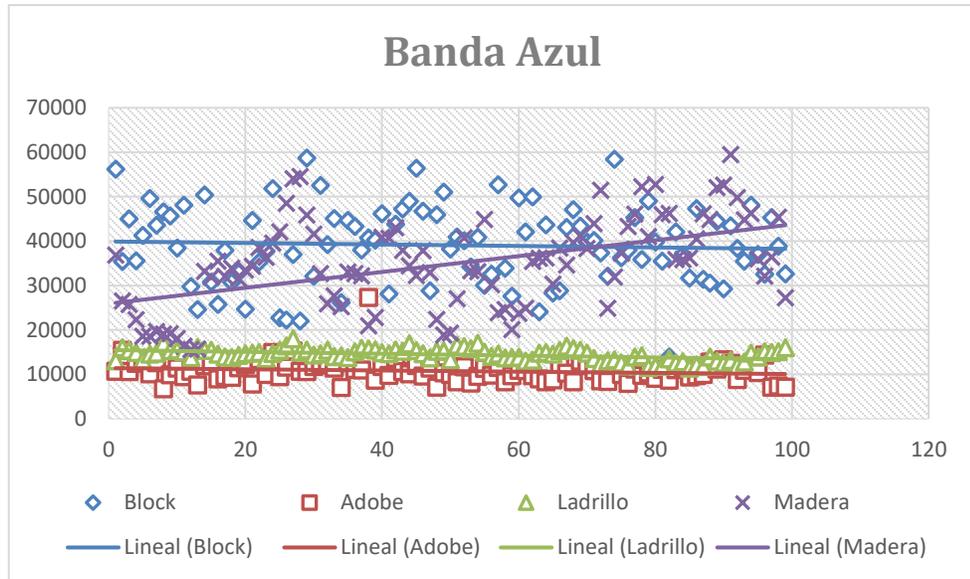


Continuación apéndice 4.

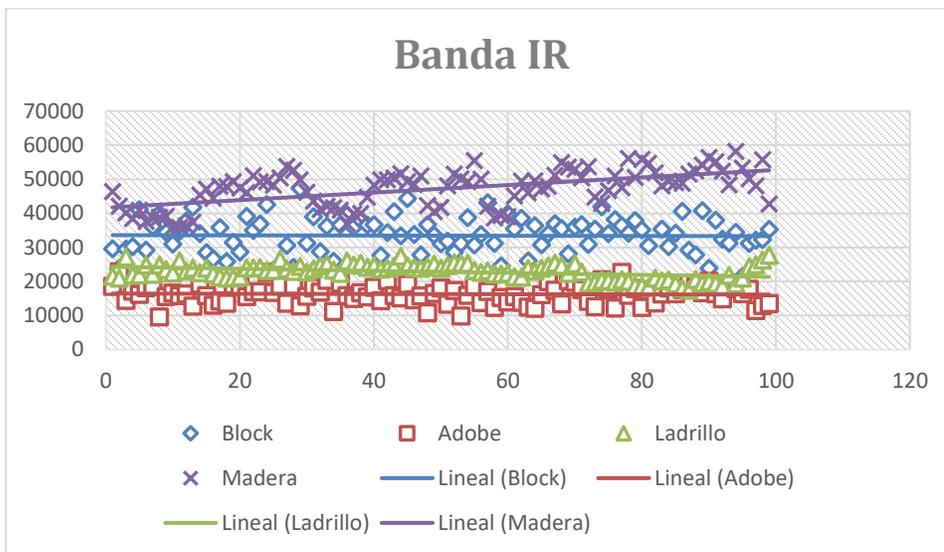
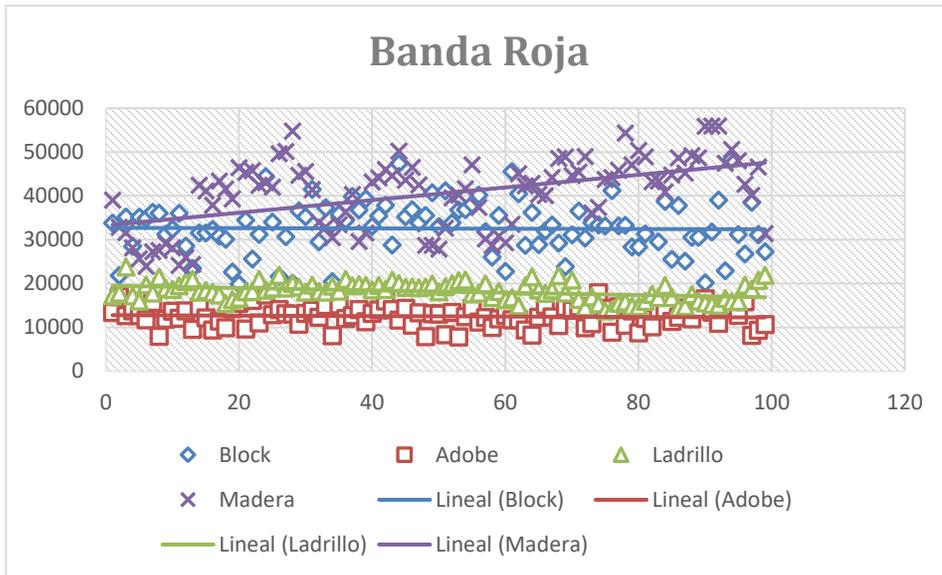


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

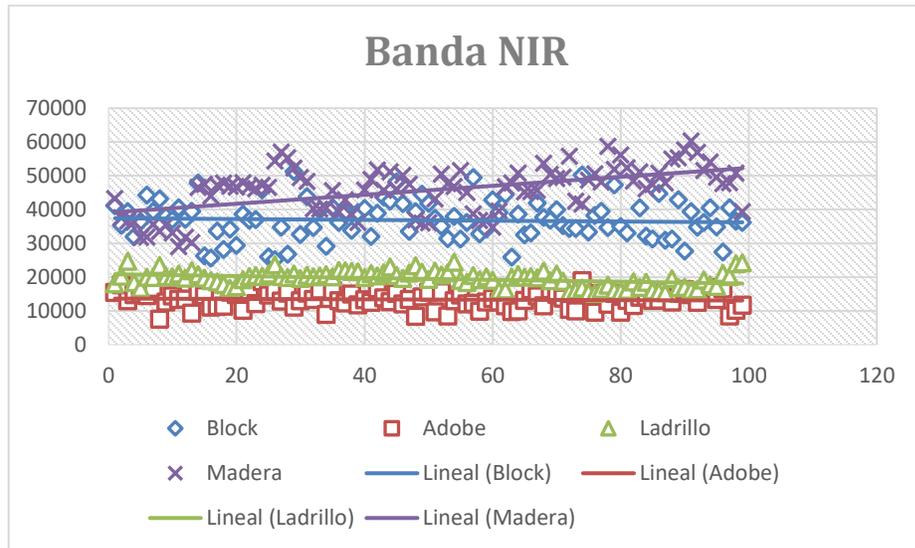
Apéndice 5. **Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día soleado sin tratamiento**



Continuación apéndice 5.

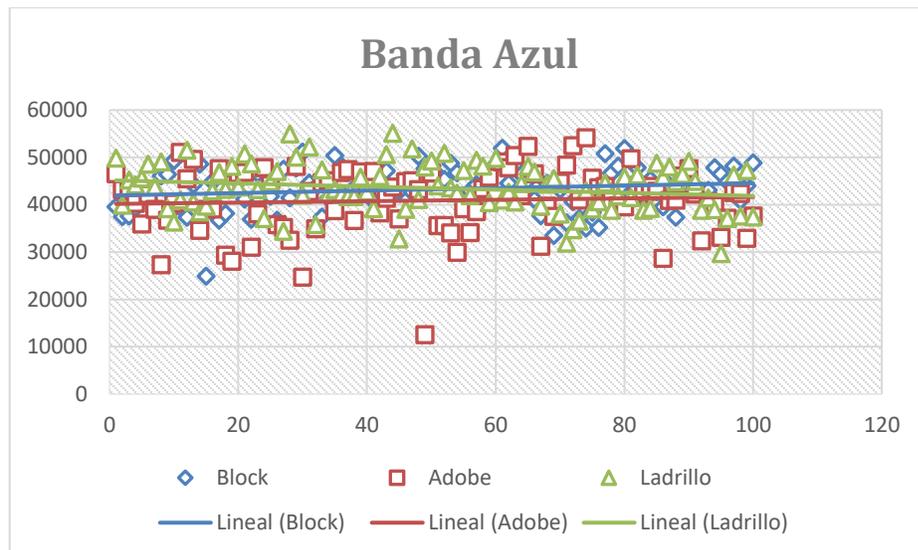


Continuación apéndice 5.

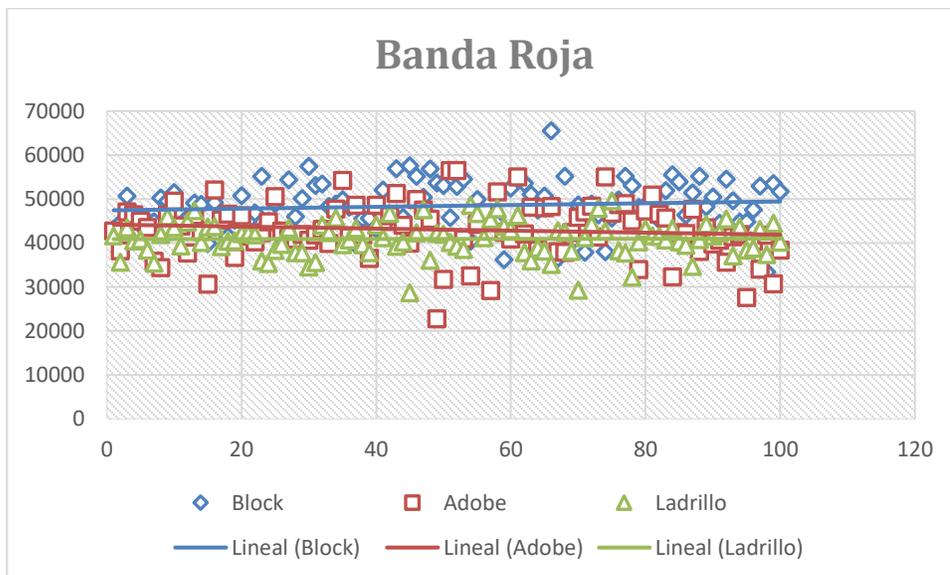
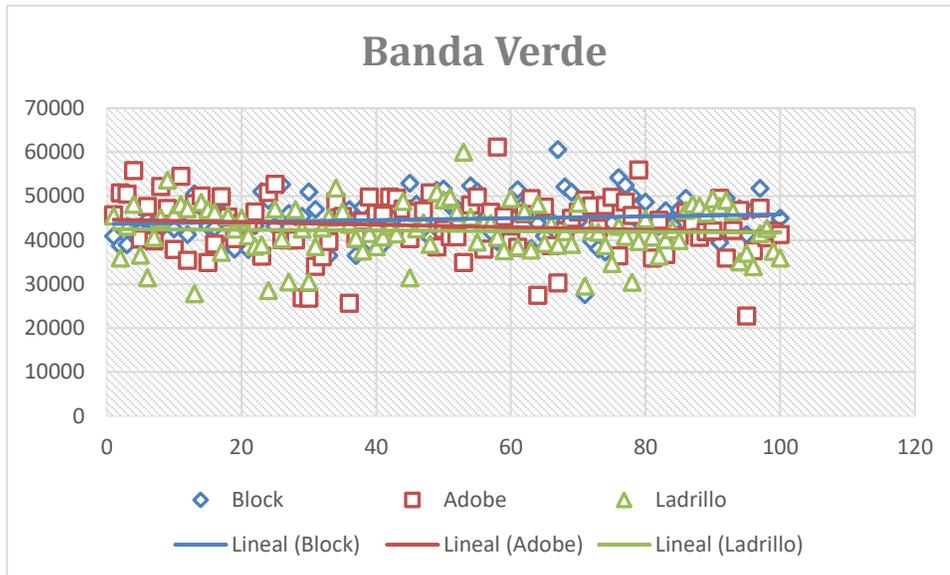


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

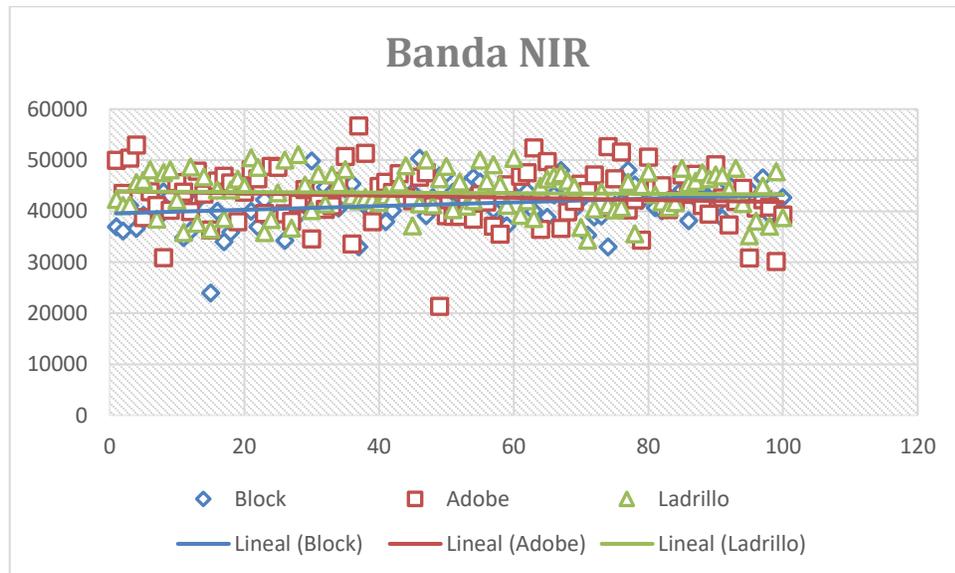
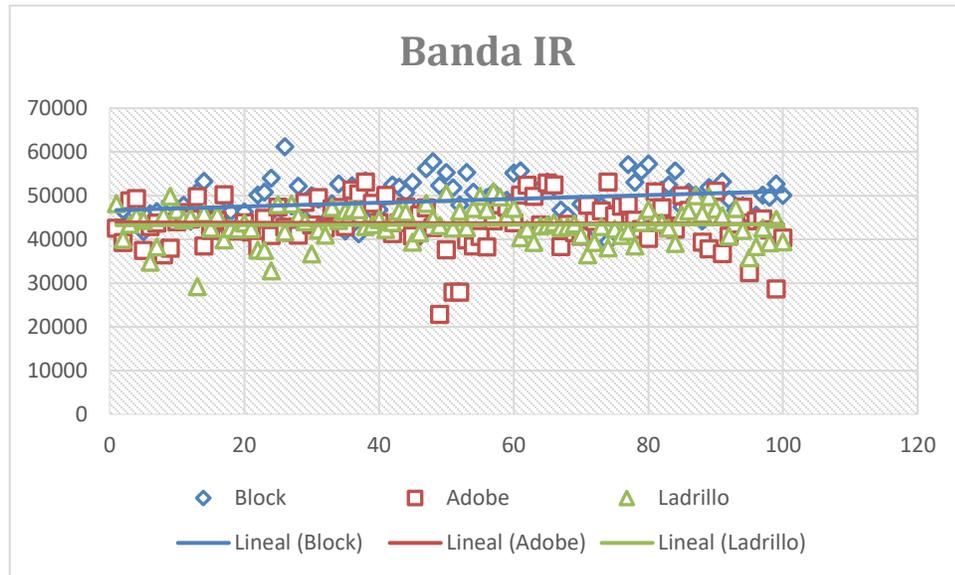
Apéndice 6. Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día soleado tratamiento repello



Continuación apéndice 6.

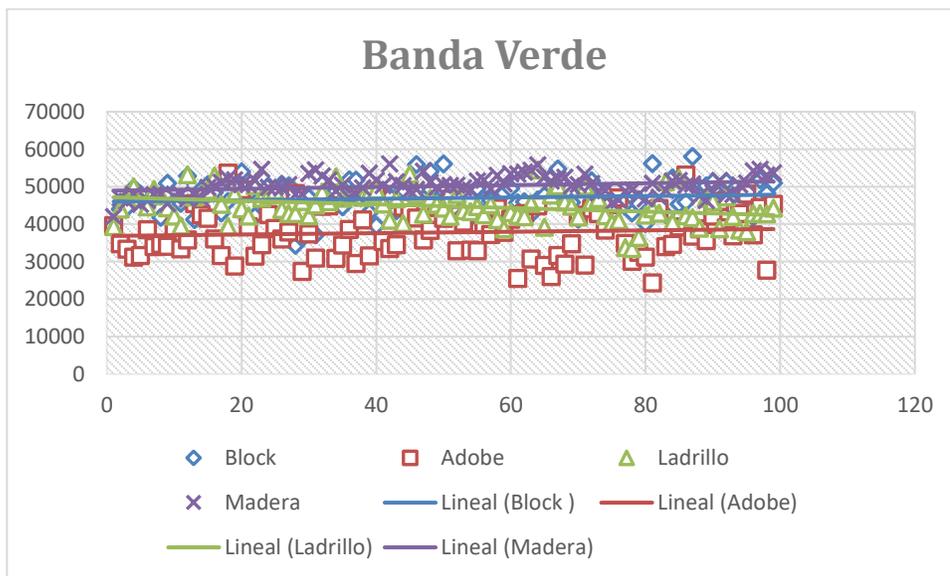
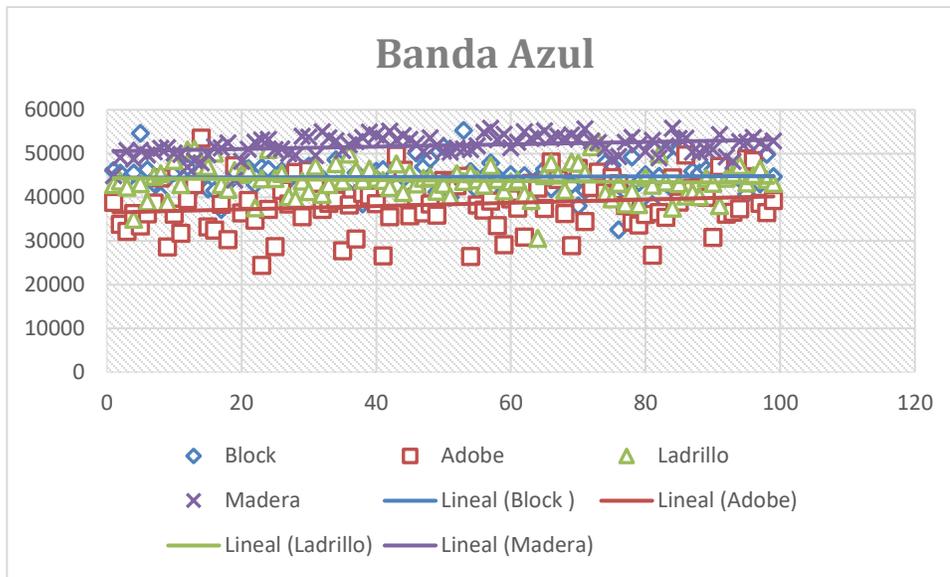


Continuación apéndice 6.

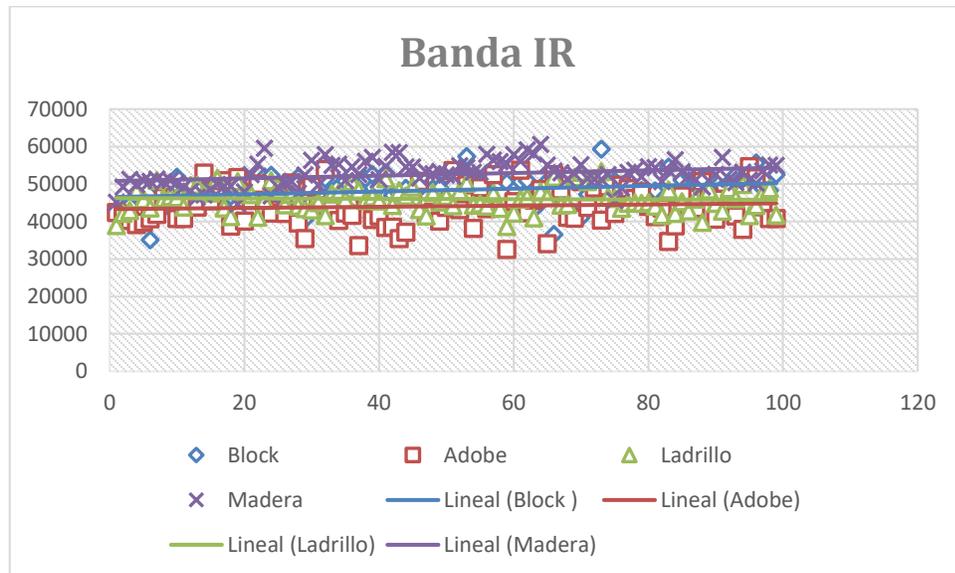
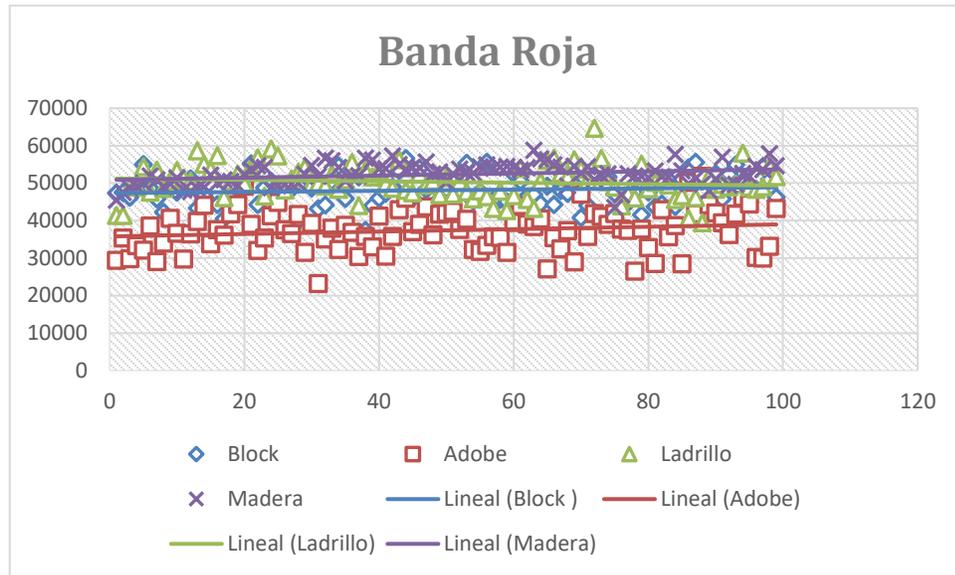


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

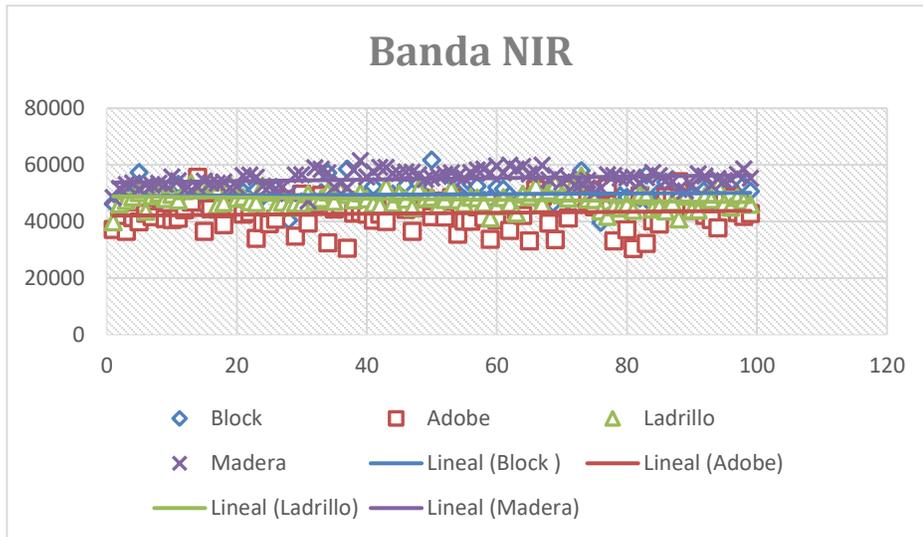
Apéndice 7. **Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día soleado tratamiento repello pintura de agua**



Continuación apéndice 7.

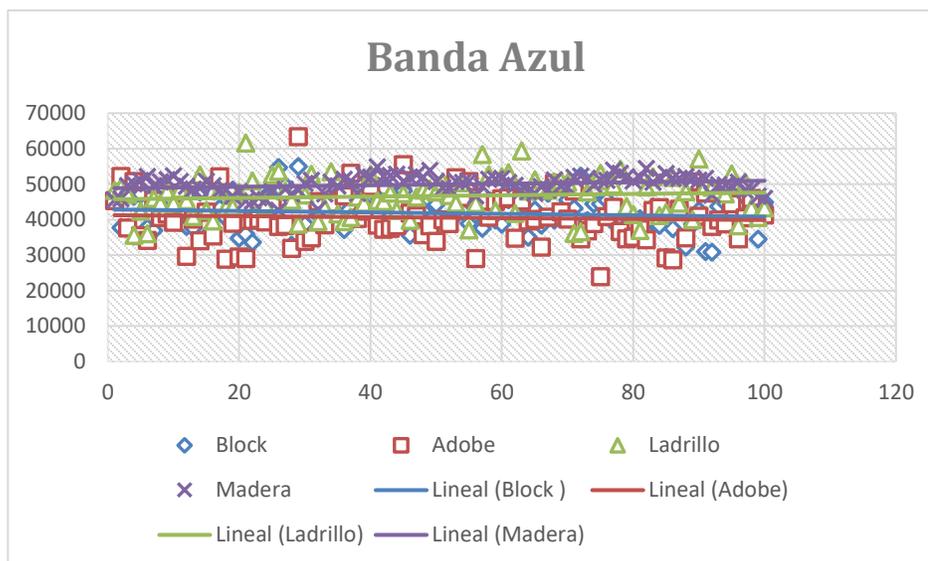


Continuación apéndice 7.

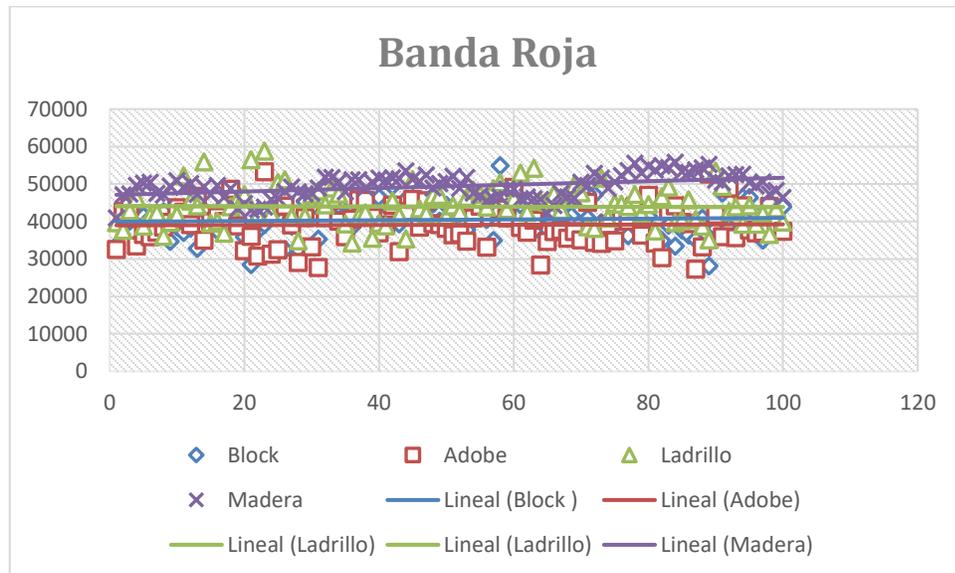
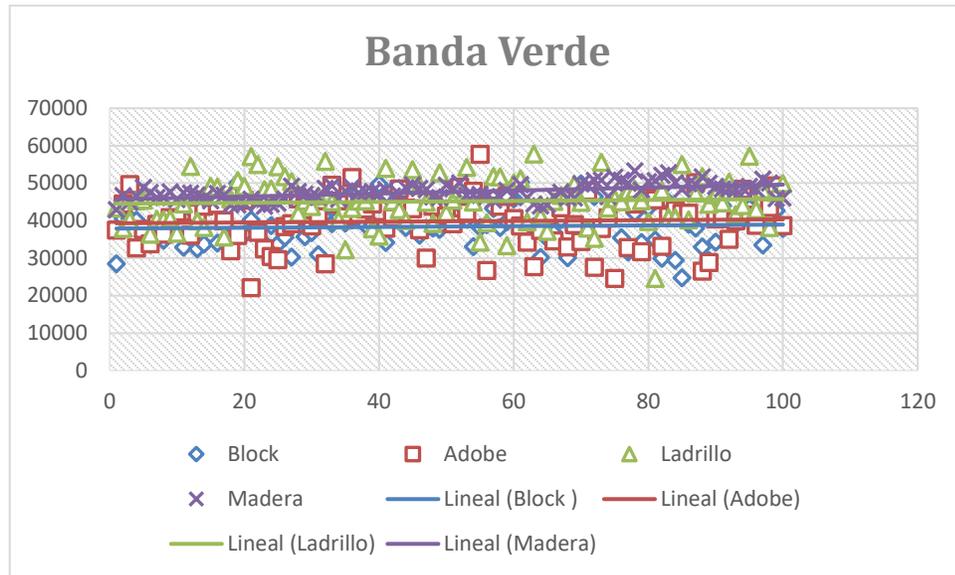


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

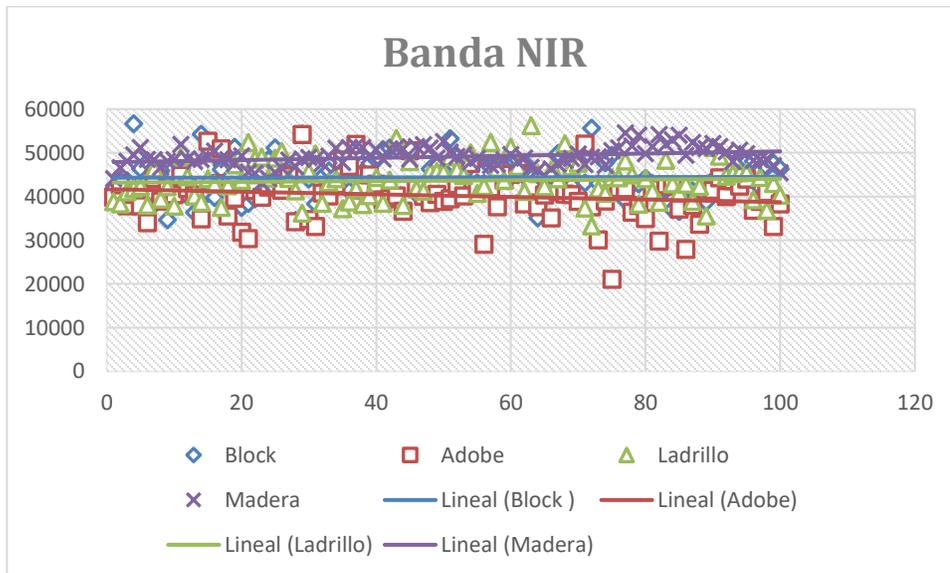
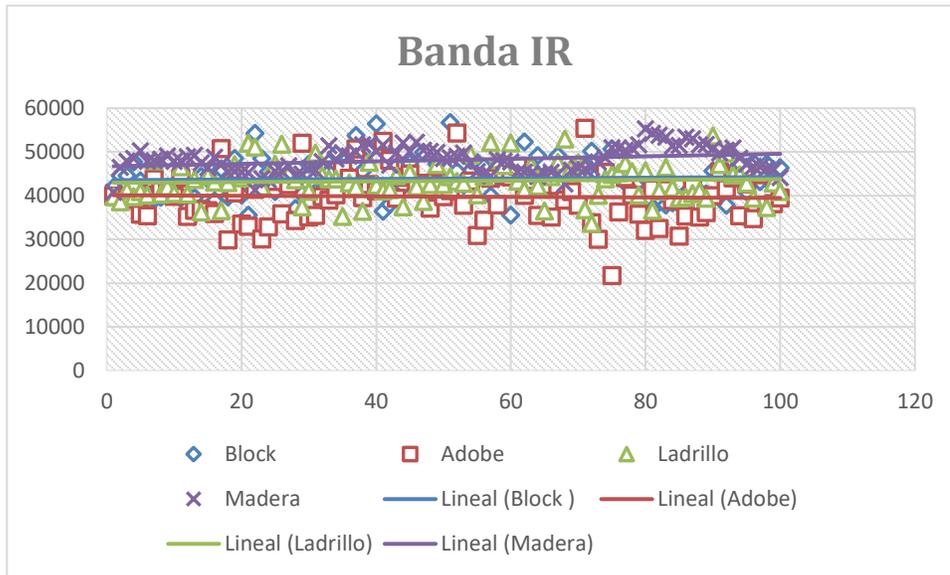
Apéndice 8. Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción en día soleado tratamiento repello pintura de aceite



Continuación apéndice 8.

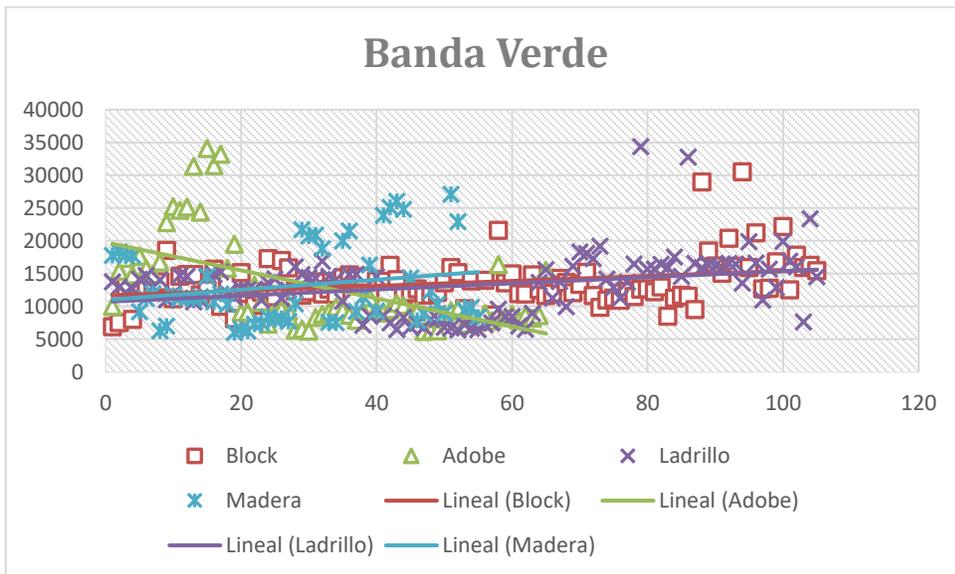
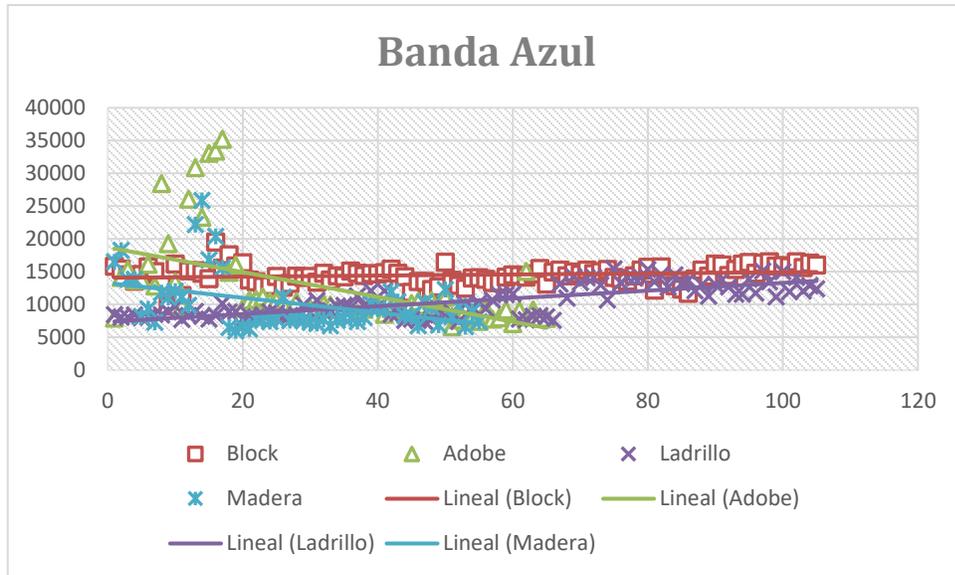


Continuación apéndice 8.

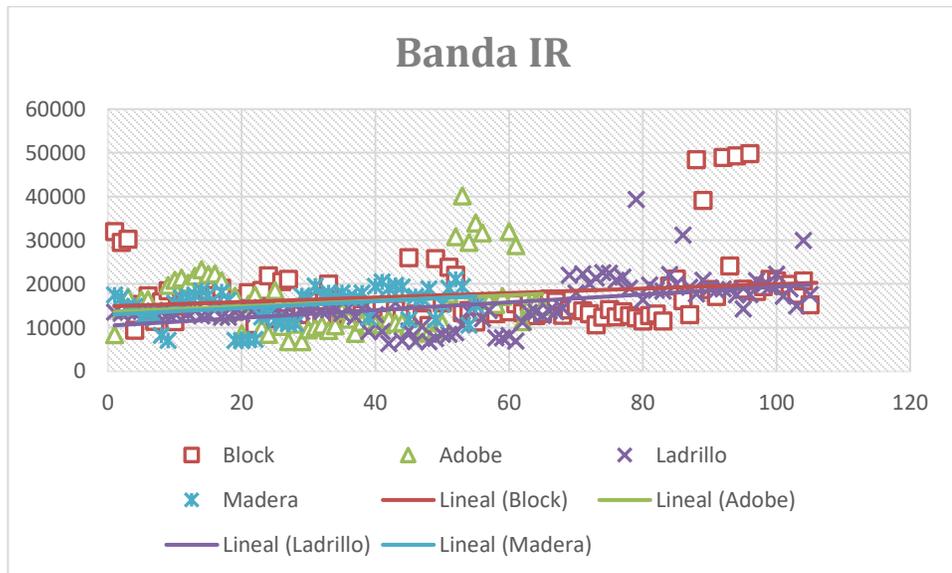
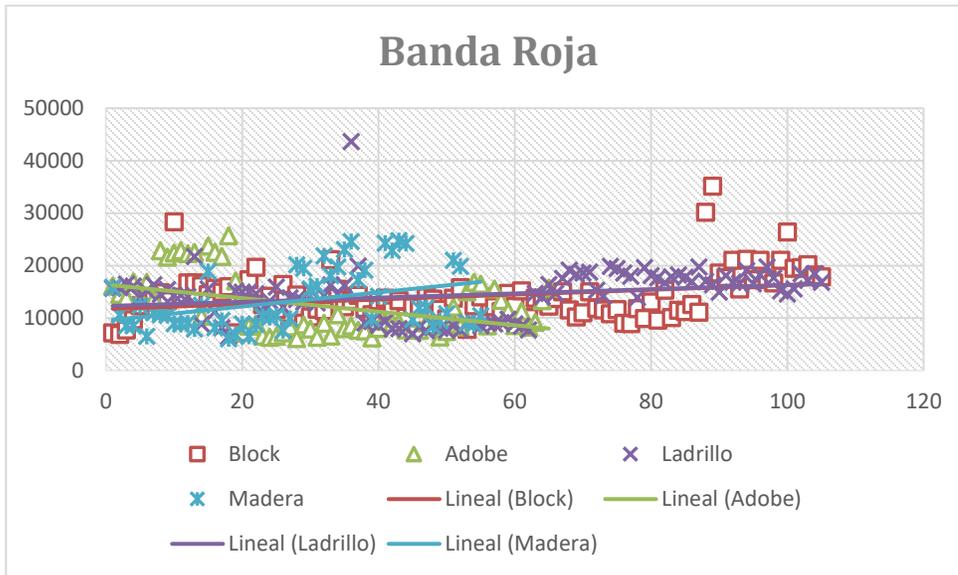


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

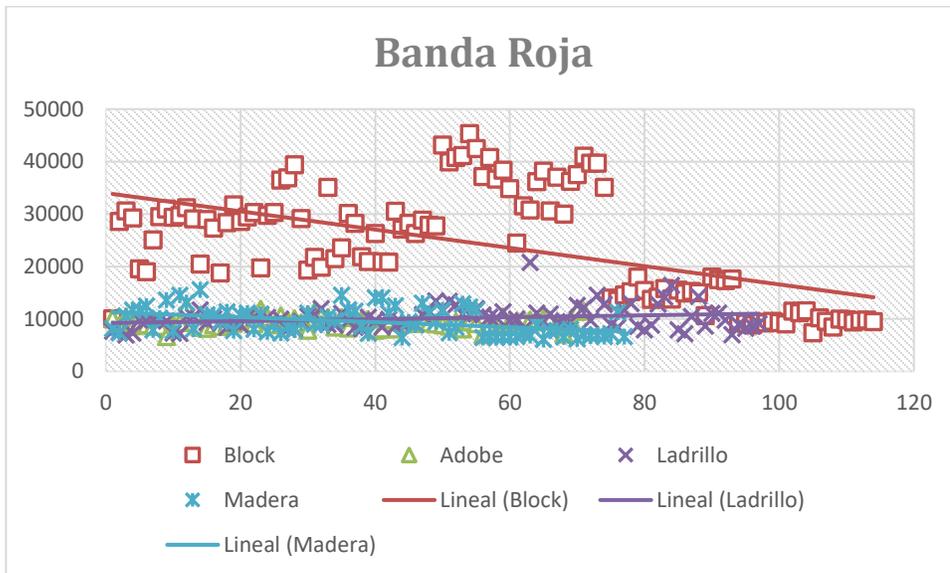
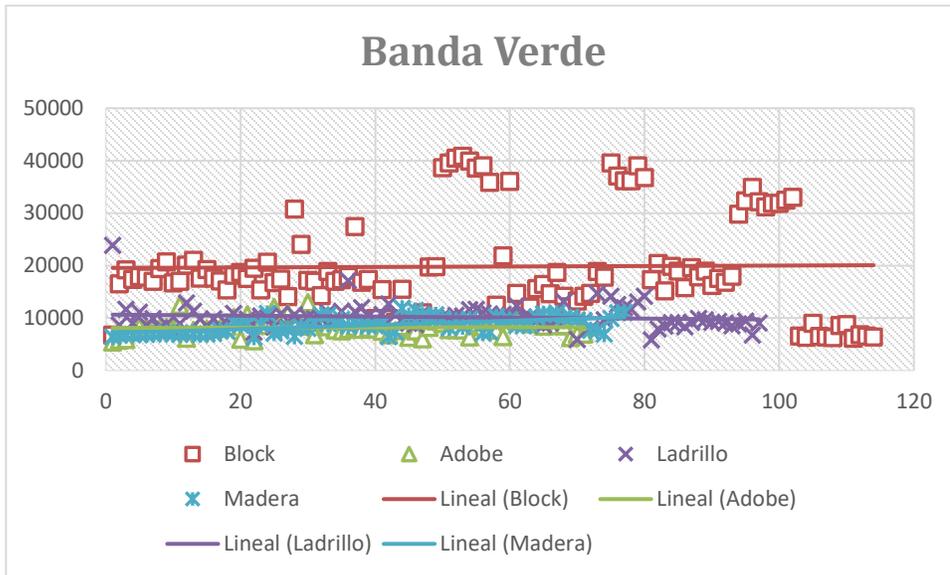
Apéndice 9. **Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción sin tratamiento vuelo 50 metros**



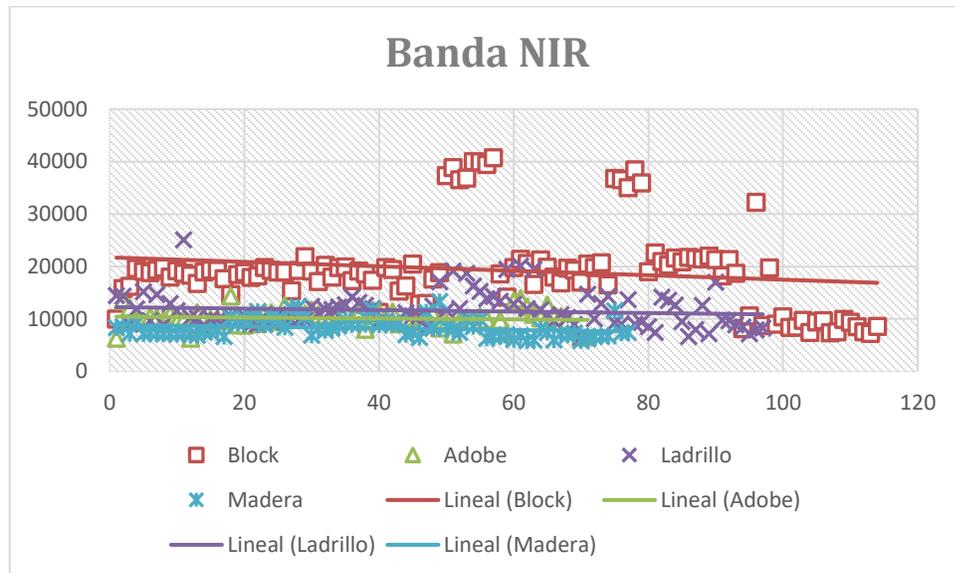
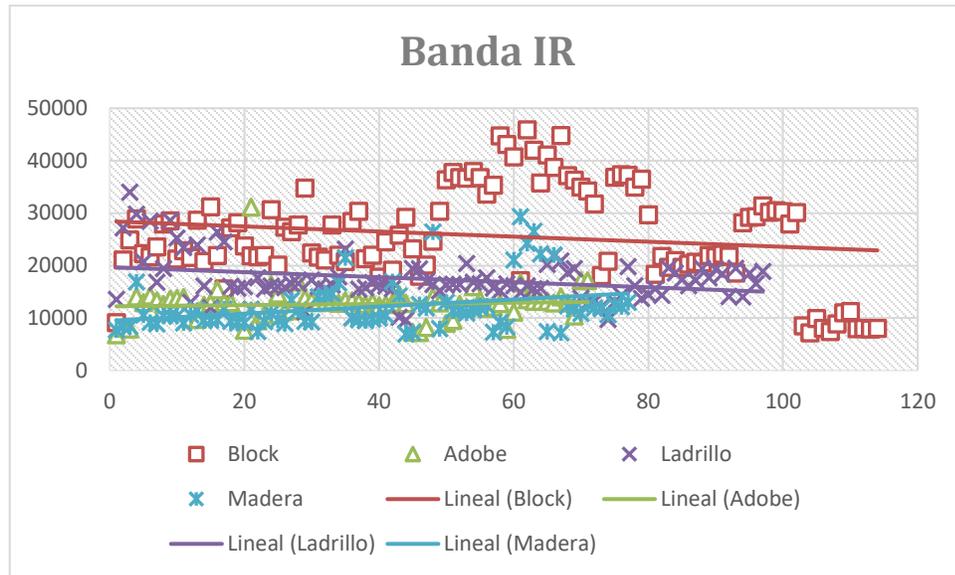
Continuación apéndice 9.



Continuación apéndice 10.

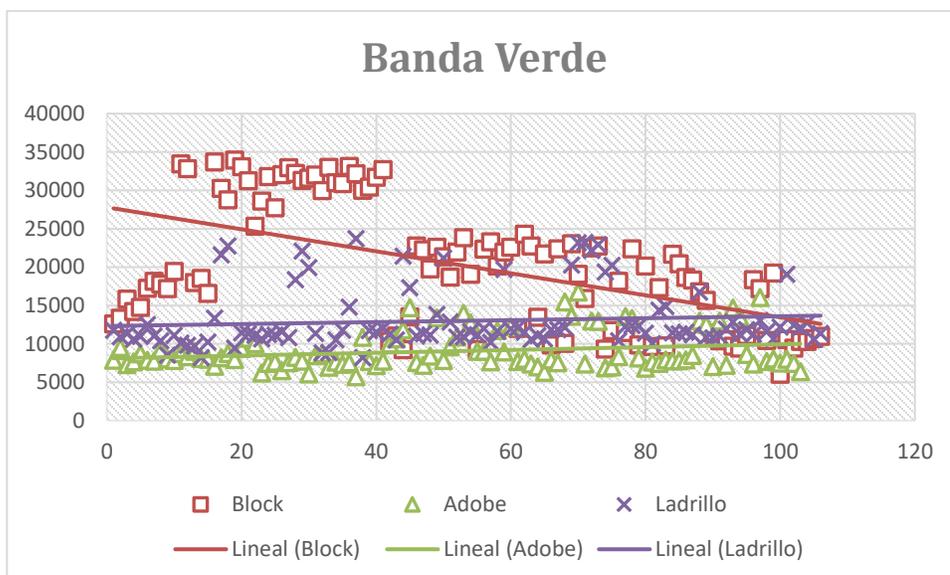
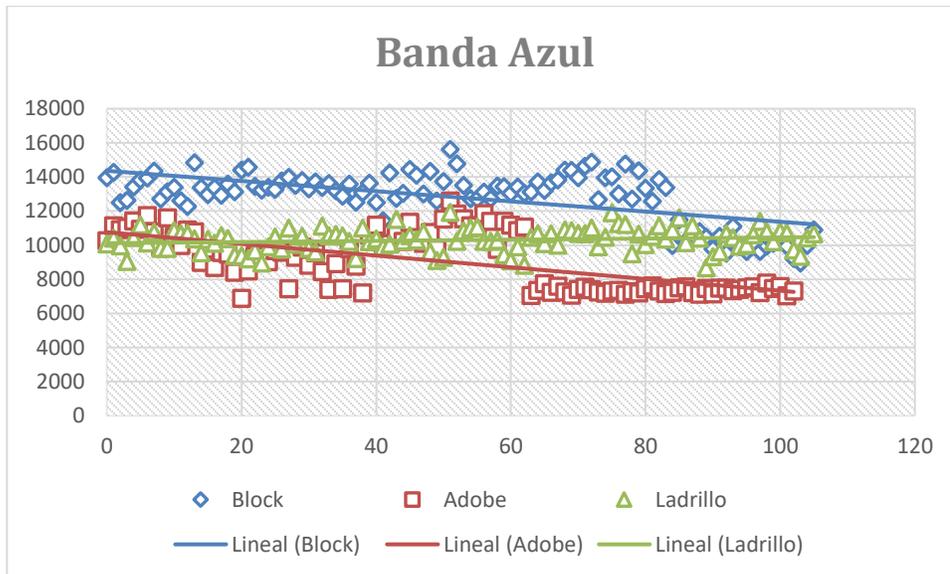


Continuación apéndice 10.

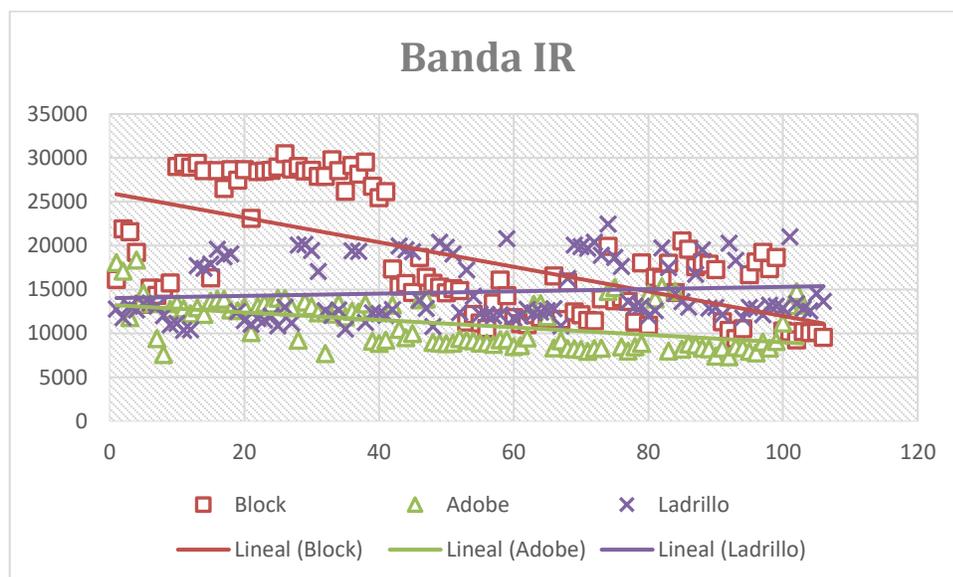
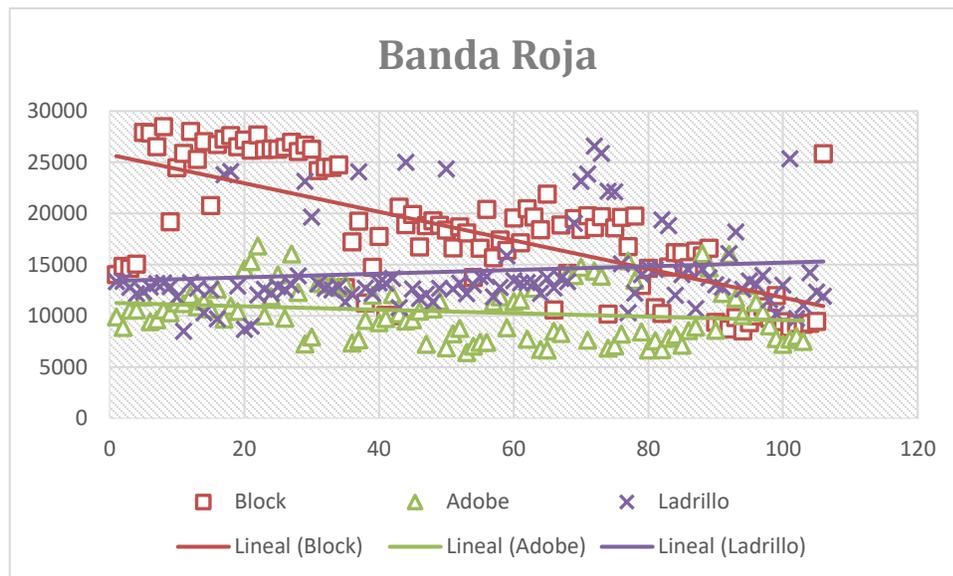


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

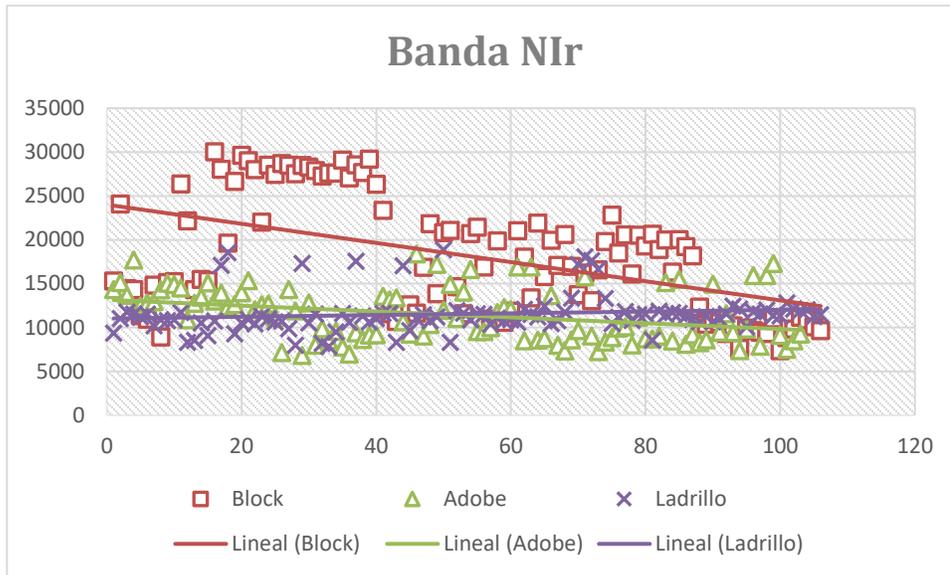
Apéndice 11. Gráficas de comportamiento de tendencia central y dispersión de materiales de construcción sin tratamiento vuelo 75 metros



Continuación apéndice 11.



Continuación apéndice 11.



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 12. Ubicación de los muestreos de campo en el municipio de Amatitlán, Guatemala



Continuación apéndice 12.



Fuente: [Fotografía de Kevin Nufio]. (Amatitlán. 2022). Colección particular. Guatemala.