



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

**EVALUACIÓN DEL VIGOR VEGETAL DE *Alnus acuminata*
Kunth (ALISO) APLICANDO DOS MÉTODOS NO
DESTRUCTIVOS: ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL
DE VEGETACIÓN (NDVI) E ÍNDICE DE ROBUSTEZ (IR)**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO FORESTAL

AUTOR: DAVID ORLANDO AGUALZACA CAISAGUANO

DIRECTOR: Ing. Li. CARLOS FRANCISCO CARPIO COBA MSc.

Riobamba - Ecuador

2021

©2021, David Orlando Agualzaca Caisaguano

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento requerido, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, David Orlando Agualzaca Caisaguano, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y que los resultados de este son auténticos y originales. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciadas.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de agosto del 2021



David Orlando Agualzaca Caisaguano
C.C. 060501718-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto de Investigación, **EVALUACIÓN DEL VIGOR VEGETAL DE *Alnus acuminata Kunth* (ALISO) APLICANDO DOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS: ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI) E ÍNDICE DE ROBUSTEZ (IR)**, realizado por el señor **DAVID ORLANDO AGUALZACA CAISAGUANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación

FIRMA

FECHA



Firmado electrónicamente por:
**VILMA
FERNANDA
NOBOA SILVA**

Ing. Vilma Fernanda Noboa Silva MSc.

2021/08/24

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS
FRANCISCO
CARPIO COBA**

Ing. Lic. Carlos Francisco Carpio Coba MSc. -----

2021/08/24

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



Firmado electrónicamente por:
**HERNAN ERIBERTO
CHAMORRO SEVILLA**

Ing. Hernán Eriberto Chamorro Sevilla MSc.

2021/08/24

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

A DIOS, por la voluntad y la misericordia, por ser el pilar fundamental en mi vida, por guiarme mi vida, por ayudar a cumplir mis metas. A mis padres, por su comprensión, por su apoyo incondicional en la tristeza y en la alegría de mi vida, por su amor incomparable, por creer en mi capacidad. A mis hermanos, por ser el motivo y mi pilar fundamental para seguir adelante pese a las adversidades y obstáculos que la vida pone en frente. A mis familiares; a mis tíos y primos, por estar siempre brindarme su apoyo incondicional en especial a mis primos María y José, Rosa, Mesías porque a pesar de la distancia han estado siempre a mi lado en todo este proceso.

David Orlando Agualzaca Caisaguano

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios porque gracias a su voluntad tengo la vida, la oportunidad de progresar personal y académicamente.

Gracias a mis padres y hermanos por ser el motivo, por la confianza, por el apoyo, por los consejos, para alcanzar mis metas.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, la carrera de Ingeniería Forestal por la facilidad de estudiar en su prestigiosa institución y a mis profesores que me ayudaron de una u otra manera durante mi vida estudiantil.

Un agradecimiento profundo a los ingenieros Carlos Carpio como director y Hernán Chamorro como miembro de la tesis, por brindar su conocimiento y apoyo en la realización del trabajo de investigación.

Agradecimiento especial para el ing. Darwin Valenzuela por su apoyo incondicional en la realización de esta investigación.

Finalmente agradezco a todas las personas quienes confiaron en mí, por su apoyo, por sus palabras de aliento han motivado alcanzar una de mis metas propuesta.

David Agualzaca

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	1
IMPORTANCIA.....	2
PROBLEMA.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
HIPÓTESIS.....	4
HIPÓTESIS NULA – H ₀	4
HIPÓTESIS ALTERNANTE – H ₁	4
CAPITULO I	
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Descripción taxonómica.....	5
1.1.1. Generalidades de la especie.....	5
1.1.2. Distribución.....	5
1.1.3. Hábitat.....	6
1.1.4. Temperatura.....	6
1.1.5. Requerimientos de suelo.....	6
1.1.6. Requerimientos hídricos.....	7
1.1.7. Tolerancias.....	7
1.2. Características fisiológicas.....	7
1.2.1. El árbol.....	7

1.2.2. <i>Copa</i>	8
1.2.3. <i>Tallo</i>	8
1.2.4. <i>Corteza</i>	8
1.2.5. <i>Raíz</i>	8
1.3. Fertilizantes	9
1.3.1. <i>Abono orgánico</i>	9
1.3.2. <i>Abonos químicos</i>	9
1.4. El nitrógeno (N)	10
1.5. El fósforo (P)	11
1.6. El potasio (K)	11
1.7. NPK 10-30-10	12
1.8. NPK 15-15-15	12
1.9. NPK 18-46-0	13
1.10. Sensores remotos	13
1.11. Espectro electromagnético	14
1.12. Respuesta espectral reflectiva de la naturaleza	15
1.13. Reflectividad de la vegetación	15
1.14. Estimación de biomasa basada en Percepción Remota	16
1.15. Clorofila	17
1.16. Índice de vigor vegetal	18
1.17. Métodos no destructivos para evaluación de vigor vegetal	18
1.17.1. <i>La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS)</i>	18
1.17.2. <i>La prueba de clorofila</i>	18
1.18. NDVI	19
1.19. Índice de robustez	19

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO	20
2.1. Características del lugar	20
2.1.1. <i>Área de estudio</i>	20
2.1.2. <i>Ubicación geográfica</i>	20
2.1.3. <i>Características climáticas</i>	21

2.2.	Tipo de investigación.....	21
2.3.	Método de investigación.....	22
2.4.	Materiales y equipos.....	22
2.4.1.	<i>Herramientas</i>	22
2.4.2.	<i>Materiales e insumos</i>	22
2.4.3.	<i>Equipos</i>	23
2.4.4.	<i>Material genético</i>	23
2.4.5.	<i>Tratamientos (Fertilizantes)</i>	23
2.4.6.	<i>Tratamientos</i>	24
2.5.	Unidad experimental.....	25
2.6	Tratamiento de datos.....	25
2.6.1	<i>Diseño experimental</i>	25
2.7.	Metodología.....	26
2.7.1.	<i>Para la preparación del material parental</i>	26
2.7.2.	<i>Determinación del índice de robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30 y 45 días en vivero</i>	26
2.7.3.	<i>Evaluación de la asimilación de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) de las plántulas de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo denominado Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15, 30 y 45 días</i>	27
2.7.4.	<i>Análisis comparativo para determinar la factibilidad en la aplicación de los métodos Índice Robustez e Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI)</i>	28

CAPITULO III

3.1	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.2.	Resultado del análisis del índice de robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30 y 45 días	31
3.2.1.	<i>Resultado del índice de robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15 días</i>	31
3.2.2.	<i>Resultado de índice robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 30 días</i>	32
3.2.3.	<i>Resultado de índice robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 45 días</i>	32

3.3. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 15, 30 y 45 días.....	34
3.3.1. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 15 días	35
3.3.2. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 30 días	36
3.3.3. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 45 días	36
3.4. Análisis comparativo para determinar la factibilidad en la aplicación de los métodos Índice Robustez e Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI)	38
CONCLUSIONES.....	42
RECOMENDACIONES.....	43
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Información de los componentes del NPK 10-30-10	12
Tabla 1-2:	Información general de NPK 15-15-15.....	13
Tabla 2-3:	Tratamiento de NPK con su diferente dosificación.....	23
Tabla 2-4:	Tratamientos para evaluar el vigor vegetal de <i>Alnus acuminata</i> Kunth.	24
Tabla 2-5:	ANOVA para determinar el índice de robustez y NDVI a la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30,45 días en vivero.	25
Tabla 3-6:	Variables empleadas para el estudio de IR Y NDVI de <i>Alnus acuminata</i> Kunth.	30
Tabla 3-7:	ADEVA para determinar el índice de robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15 días.	31
Tabla 3-8:	ADEVA para determinar el índice de robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 30 días.	32
Tabla 3-9:	ADEVA para determinar el índice de robustez y la respuesta de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 45 días.	33
Tabla 3-10:	Prueba de Tukey a 5% para el análisis de asimilación de nutrientes de (NPK) de los tratamientos de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 15 días.....	35
Tabla 3-11:	Prueba de Tukey a 5% para el análisis de asimilación de nutrientes de (NPK) de los tratamientos de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 30 días.....	36
Tabla 3-12:	Prueba de Tukey a 5% para el análisis de asimilación de nutrientes de (NPK) de los tratamientos de <i>Alnus acuminata</i> Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 45 días.....	37
Tabla 3-13:	Promedio de Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15, 30,45 días	38

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3-1:	Correlación del Índice De Robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15 días de aplicar los fertilizantes.....	39
Gráfica 3-2:	Correlación del Índice De Robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 30 días de aplicar los fertilizantes.....	40
Gráfica 3-3:	Correlación del Índice De Robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 45 días de aplicar los fertilizantes.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Composición química de las plantas.....	10
Figura 1-2:	Componentes de sistema de teledetección.	14
Figura 1-3:	Rangos de espectro Electromagnético	15
Figura 1-4:	Firmas espectrales de las diferentes coberturas.	16
Figura 2-5:	Mapa de ubicación del vivero de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. .	21
Figura 3-6:	Imágenes de plántulas <i>Alnus acuminata</i> Kunth a distintos tratamientos (T1-T4) de fertilización de NPK. A) Bandas NIR+R., B) NDVI.	34

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** EL TIEMPO EMPLEADO PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE ROBUSTEZ Y EL ANÁLISIS DEL ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI).
- ANEXO B:** ANÁLISIS DE LOS COSTOS EN LA APLICABILIDAD DE ÍNDICE DE ROBUSTEZ Y EL ANÁLISIS DEL ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI).
- ANEXO C:** ANOVA PARA EL ESTUDIO DE LA ASIMILACIÓN DE NUTRIENTES DE (NPK) DE LAS PLÁNTULAS DE *Alnus acuminata Kunth* A PARTIR DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO (NDVI) A LOS 15 DÍAS.
- ANEXO D:** ANOVA PARA EL ESTUDIO DE LA ASIMILACIÓN DE NUTRIENTES DE (NPK) DE LAS PLÁNTULAS DE *Alnus acuminata Kunth* A PARTIR DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO (NDVI) A LOS 30 DÍAS.
- ANEXO E:** ANOVA PARA EL ESTUDIO DE LA ASIMILACIÓN DE NUTRIENTES DE (NPK) DE LAS PLÁNTULAS DE *Alnus acuminata Kunth* A PARTIR DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO (NDVI) A LOS 45 DÍAS.
- ANEXO F:** DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR DE *Alnus acuminata Kunth*.
- ANEXO G:** APLICACIÓN DE FERTILIZANTE DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO (NPK) PARA LA EVALUACIÓN DE VIGOR VEGETAL DE *Alnus acuminata Kunth*.
- ANEXO H:** TOMA DE DATOS DASOMÉTRICAS ALTURA Y DAC PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE ROBUSTEZ.
- ANEXO I:** FOTOGRAFÍA INFRARROJO CAPTURADO CON UNA CÁMARA DIGITAL SONY DSC HX400V CON SENSOR TIPO CMOS EXMOR R® DE 20.4 MEGAPIXELES ACOPLADO UN FILTRO ÓPTICO PARA OBTENER LAS BANDAS CORRESPONDIENTES R Y NIR.
- ANEXO J:** PROCESAMIENTO DE NDVI DE LA HOJA DE *Alnus acuminata Kunth*.

RESUMEN

El propósito de la investigación fue evaluar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth* (aliso), aplicando dos métodos no destructivos para determinar el vigor vegetal: Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) e Índice De Robustez (IR), en el vivero de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ciudad de Riobamba, a los 15, 30 y 45 días después de la aplicación de los fertilizantes. Para determinar el vigor vegetal del aliso se aplicaron tres dosificaciones de fertilizantes de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) más un testigo, empleando Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), los datos de altura y diámetro a la altura del cuello de la raíz (DAC) de las plántulas y las fotografías permitió determinar los índices IR Y NDVI. Para el análisis estadístico se utilizó el Modelo Lineal General Invariado y prueba de Tukey al 5%, obteniendo como resultado; Que el IR, no muestra diferencia significativa a nivel estadístico entre los tratamientos y en la evaluación de NDVI estadísticamente, existe diferencias significativas entre los tratamientos esto fue corroborado con la prueba de Tukey al 5% evidenciando cuatro grupos, el T3= NPK 18-46-0, arrojó mejor respuesta a la asimilación de nutrientes con NPK, por ende con el valor más alto de NDVI al final de los 45 días. Se concluye que los fertilizantes NPK con diferente dosificación empleados para evaluar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth*, muestran respuesta favorable en los resultados de los índices IR y NDVI mientras que en la optimización del tiempo y recursos empleados para la evaluación dependerá del objetivo y la cantidad de plántulas a evaluar. Se recomienda, especificar el área foliar a estudiar ya sea basal o apical, para fertilización utilizar fertilizantes solubles o líquidos, en caso concreto del *Alnus acuminata Kunth*, se recomienda extender el tiempo de evaluación.

Palabras Clave: <ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI)>, <ÍNDICE DE ROBUSTEZ (IR)>, <ALISO *Alnus acuminata Kunth*>, <VIGOR VEGETAL.

Firmado digitalmente por LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, l=RIOBAMBA, serialNumber=0602766974, cn=LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS
Fecha: 2021.09.15 09:23:22 -05'00'

LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS



1789-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the plant vigor of alder (*Alnus acuminata Kunth*), applying two non-destructive methods to determine plant vigor: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Robustness Index (IR), in the nursery of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba city; at 15, 30 and 45 days after the application of fertilizers. To confirm the alder's plant vigor, three dosages of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) fertilizers were applied and control, using Randomized Complete Block Design (RCBD). The data of height and diameter at the root collar (DAC) of the seedlings and the images allowed to determine the IR and NDVI indexes. For the statistical analysis, the General Invariant Linear Model and Tukey's test were used at 5%, obtaining, as a result, that the IR does not show significant difference at a statistical level between treatments; and in the evaluation of NDVI statistically, there are crucial differences between treatments. It was corroborated with the Tukey test at 5% showing four groups, the T3 = NPK 18-46-0, showed better response to the assimilation of nutrients with NPK, therefore with the highest value of NDVI at the end of 45 days. It is concluded that NPK fertilizers in different dosages, used to evaluate the vegetal vigor of *Alnus acuminata Kunth*, show favorable response in the IR and NDVI indexes results while the optimization of the time and resources used for the evaluation will depend on the objective and the number of seedlings to be evaluated. It is recommended to specify the leaf area to be studied, either basal or apical and to use soluble or liquid fertilizers for fertilization. In the specific case of *Alnus acuminata Kunth*, it is suggested to extend the evaluation time.

Keywords:<NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)>, <ROBUSTNESS INDEX (IR)>, <ALDER (*Alnus acuminata Kunth*)>, <PLANT VIGOR>.



1789-DBRA-UTP-2021

MARIENNY
BARROSO
LEYVA

Firmado digitalmente por MARIENNY
BARROSO LEYVA
DN: cn=MARIENNY BARROSO
LEYVA, o=ESPOCH, ou=RIOBAMBA
c=ESPOCH DTIC, ou=AUTORIDAD
DE CERTIFICACION ESPOCH DTIC
Motivo: He revisado este documento
Última fecha:
Fecha: 2021-09-20 13:00-05:00

EVALUACIÓN DEL VIGOR VEGETAL DE *Alnus acuminata Kunth* (ALISO) APLICANDO DOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS: ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI) E ÍNDICE DE ROBUSTEZ (IR)

INTRODUCCIÓN

EL aliso (*Alnus acuminata Kunth*) al ser considerada una especie multipropósito e importante en la restauración de suelos degradados, es utilizada en sistemas agroforestales, silvopastoriles, cortinas rompe viento, linderos por su amplia distribución en la sierra ecuatoriana, su madera tiene alto valor comercial por su brillo, color, veteado utilizando en la elaboración de muebles, en la ingeniería de pisos, chapados e inclusive para utensilios de la cocina. La medición de características fisiológicas que ayudan a reflejar el estado hídrico, nutricional y sanitario de las plantas empleadas para la forestación y reforestación es costosa, debido al uso de instrumentos sofisticados en comparación con los propiedades morfológicas que se obtienen de manera directa (Jacobs et al., 2009, p. 218).

El uso de indicadores cuantitativos además de establecer una medición sistemática es un proceso que permite evaluar de manera objetiva los cambios o variaciones de las plantas en respuesta a ciertos estímulos como la fijación de nutrientes o algún otro factor que limite o promueva su desarrollo. El Índice de Robustez o índice de esbeltez estudiado a partir de la correlación entre altura y el diámetro del cuello de la raíz (DAC) es un indicador de resistencia de la planta a los daños por viento, sequía, helada (Sáenz et al., 2014, p. 107), con capacidad fotosintética (Intituto Forestal, 2009, p. 43).

El índice NDVI, por sus siglas en inglés (*Normalized Difference Vegetation Index*), usado principalmente con imágenes satelitales y sistemas de información geográfica, hace uso de las intensidades de reflectancia en la banda roja de la región visible (R) e infrarroja cercano (NIR en inglés (*Near-InfraRed*), quedando definido por la siguiente expresión (ver ecuación 1), los valores del índice NDVI oscila de $-1 \leq a \leq 1$ (Pettorelli et al., 2005, p. 504). El uso y aplicación de los métodos no destructivos: tienen gran potencial para determinar el estado de vigor de las especies forestales obtenidas en el vivero y apoyar en la toma de decisiones en los ciclos de producción de las plantas.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad [1]$$

IMPORTANCIA

La presente investigación aporta con información importante sobre alternativas de evaluación del vigor vegetal *Alnus acuminata Kunth* (aliso), a través de dos métodos no invasivos los cuales por un lado utilizando fotografías infrarrojo y por otro lado la medición de variables morfológicas como área basal a la altura de cuello y la altura de la plántula para determinar el vigor vegetal de especies forestales antes de ser llevada a la plantación final, permite tomar decisiones de la viabilidad a las condiciones climáticas del sitio que en cuanto a nutrición vegetal para mejorar el estado de las plantas propagadas en el vivero.

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso) es considerado de gran importancia económica en la agricultura, sistemas silvopastoriles, recuperación de suelos degradados, conservación de fuentes hídricas porque el sistema radicular se asocian simbióticamente con bacterias Gram positiva (*Actinomyces*), formando nódulos fijadores de nitrógeno disponible en el ambiente e incorporando en el suelo, en suelos aptos para agricultura se encuentra formando parte de cercas vivas aportando materia orgánica por la descomposición de la hojarasca, contribuye; a la protección de cultivos, a la protección ganados de las inclemencias ambientales, compite muy poco con los cultivos, su madera es de buena calidad apreciado por su color castaño, por su veteado, por su durabilidad utilizado ampliamente en mueblería fina, chapas decorativas, artesanías, ebanistería, listones, culpa de papel y leña.

PROBLEMA

En la actualidad no existe una metodología adecuada para determinar el vigor de las plantas antes de ser llevada a plantación final, por lo que si las plantas no tienen adecuada nutrición como consecuencia la sobrevivencia de las plantas será muy baja, motivo principal para que las plantaciones forestales fracasen causando pérdidas económicas. Los métodos tradicionales para el análisis, cuantitativos y cualitativos de vigor vegetal son laboriosos, demandan tiempo, la mano de obra y económicamente tiene un costo elevado.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la producción de especies forestales nativas o exóticas están sujetas a una gran demanda en la ejecución de proyectos tales como: manejo y conservación del ambiente,

esparcimiento estético, industrias madereras, actividades agroforestales, restablecimientos y mejora de pastos, por tal motivo en los viveros es necesario disponer de plantas vigorosas.

Debido al desconocimiento en la evaluación de vigor vegetal de especies forestales antes de ser llevadas a plantación final y a los métodos invasivos que se utilizan para determinar dicho vigor como el uso alternativas a los métodos químicos y químico-biológicos y métodos destructivos tradicionales, surge la aplicación de metodologías que permitan evaluar la asimilación de nutrientes tales como el NDVI que permite obtener estimaciones seguras y muy rápidas en lo que se refiere a la composición química y nutricional a través del análisis de la reflectancia a partir de fotografías infrarrojas.

La utilización de la reflectancia en el infrarrojo cercano es una técnica no destructiva con gran potencialidad a nivel mundial por su precisión, su exactitud que puede ser automatizada permitiendo un análisis rápido y relativamente fácil (Valenciaga y Simoes, 2006: p. 259) y la estimación de variables dasométricas tales como; altura de la plántula y el diámetro a la altura del cuello (DAC) que permitan evaluar el índice de robustez (IR).

OBJETIVOS.

Objetivo general

Evaluar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth* (aliso) aplicando dos métodos no destructivos para determinar: Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) e Índice De Robustez (IR) en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la ciudad Riobamba, Chimborazo.

Objetivos específicos

1. Determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata Kunth* a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30, 45 días en vivero.
2. Evaluar la asimilación de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo para obtener el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15, 30, 45 días.

3. Realizar un análisis comparativo para determinar la factibilidad en la aplicación de los métodos Índice Robustez e Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI).

HIPÓTESIS

Hipótesis nula – h₀

Las plantas de *Alnus acuminata Kunth* no manifiestan respuesta favorable a la nutrición con dosis de NPK en su vigor vegetal.

Hipótesis alternante – h₁

Las plantas de *Alnus acuminata Kunth* manifiestan respuesta favorable a la nutrición con dosis de NPK en su vigor vegetal.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Descripción taxonómica

De acuerdo con Sánchez et al. (2009, p. 25) “El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), se clasifica taxonómicamente de la siguiente manera”:

Reino: Plantae

Subreino: Tracheobionta

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Hamamelidae

Orden: Fagales

Familia: Betulaceae

Género: *Alnus*

Especie: *acuminata*

1.1.1. Generalidades de la especie

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), es una especie forestal que se encuentra en ampliamente América específicamente en Ecuador se puede encontrar principalmente, en la sierra se caracteriza por su fuste recto, poca ramificación, por su auto poda y puede alcanzar hasta 40 m de altura y 60 cm de diámetro en condiciones adecuadas (Penagos et al., 2005, p. 5).

1.1.2. Distribución

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), es una especie de amplia distribución en el continente americano desde parte de Norte de México y Centroamérica hasta América del Sur en los países Argentina, Colombia, Perú, Chile, Bolivia y Ecuador. “El *Alnus acuminata Kunth* (aliso) en el Ecuador se encuentra en toda la región interandina y en los flancos de la cordillera oriental y occidental desde

una altitud de 800 msnm, hasta los 3500 msnm de altitud” Añazco (2004) citado por (Sánchez et al., 2009, p. 27).

Según INEFARN (2003, p. 1), el *Alnus acuminata Kunth* (aliso), se puede encontrar hasta 3800 msnm, con excelente desarrollo y crecimiento, esta especie se encuentra formando parte de cortinas rompevientos, en sistemas silvopastoriles, agroforestales, en zonas de recuperación por erosión hídrica, conservación de agua en quebradas cerca de ríos y acequias.

1.1.3. Hábitat

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), es una especie pionera que se puede encontrar en áreas de ladera, zonas húmedas conformando los ecosistemas andinos conocidos como “Bosques de niebla”, hacen parte de las zonas áridas y muy húmedas de los bosques premontano, montano, según el Sistema de Zonas de Vida de Holdridge se encuentran cerca de arroyos, ríos (Sánchez et al., 2009, p. 27).

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), es una especie que se adapta bien en tipos y condiciones de suelos distintos, incluido en suelos pobres en macronutrientes, e incluso en suelos poco profundos, no tolera suelos pesados, zonas pantanosas, con drenaje imperfecto o parcialmente inundados (Penagos et al., 2005, p. 15).

1.1.4. Temperatura

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), requiere temperaturas medias anual entre 4 y 18° C, con un máximo de 27° C y una mínima de hasta -2° C. Sin embargo, tolera bajas temperaturas y heladas de poca duración (Sánchez et al., 2009, p. 27) además, pueden soportar temperaturas más altas cuando están libres de malezas (INEFARN, 2003, p. 1). En las partes más altas prosperan en quebradas abrigadas ya que vientos secos fríos afectan su desarrollo Carrillo (1998) citado por (Portilla, 2012, p. 17).

1.1.5. Requerimientos de suelo

El desarrollo óptimo de *Alnus acuminata Kunth* (aliso), se observa en suelos con pH comprendía en el rango de 4,5 y 6,0, con alto contenido de humedad y suelo con texturas livianas, limosos, limo-arenosos, francos o franco-arenosos de origen aluvial o volcánico, profundos, bien drenados y ricos en materia orgánica (Sánchez et al., 2009, p. 27).

No obstante Penagos et al. (2005, p. 15), consideran que el mejor desarrollo se obtiene en suelos con un pH superior a 5,0 profundo además, el aliso es una especie que se adapta bien en condiciones edáficas adversas como; con bajo contenido de materia orgánica, rocosos, suelos erosionados, suelos pantanosos.

1.1.6. Requerimientos hídricos

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), se encuentra cerca de los cursos de agua, de quebradas y arroyos a lo largo de caminos con suficiente luz y humedad, en los flancos húmedos de las montañas, la precipitación en estos sitios fluctúa entre 1000 y 3000 mm (Sánchez et al., 2009, p. 27). Además se adaptan bien a condiciones climáticas con rangos de precipitación promedio anual entre 1000 y 3200 mm/año (Penagos et al., 2005, p. 14).

1.1.7. Tolerancias

El *Alnus acuminata Kunth* es una especie forestal estrictamente heliófila en sus primeros meses de vida desarrollo soporta relativamente bien las heladas, aunque estas retardan su desarrollo óptimo, la planta demanda estar a pleno sol para desarrollarse satisfactoriamente. En la etapa inicial el aliso es muy suspicaz a daños por vientos fuertes, sequías y a la competencia por luz y nutrientes con las arvenses pero mejora su tolerancia una vez se encuentre establecido (Sánchez et al., 2009, p. 28).

1.2. Características fisiológicas

1.2.1. El árbol

Es monoico, mediano de 10 a 15 m de altura, 25 a 60 cm de DAP, fuste cilíndrico, copa angosta, ramificación con follaje esparcido. El espesor de la corteza varía de 0,8 a 1 cm, la corteza externa lisa, blanco grisáceo, corteza interna rosada, fácilmente desprendible de la albura Carrillo (1998) citado por (Portilla, 2012, p. 16).

1.2.2. Copa

En términos generales la copa del *Alnus acuminata Kunth* (aliso), es angosta, irregular y abierta, en el Ecuador se puede observar esto de acuerdo a la altitud en que se encuentre de ahí que, en Saraguro a 2500 msnm presentan una copa más densa y con más follaje, en cambio los procedentes de Carchi a 3200 msnm es abierta y con menos follaje (Revelo, 2007, p. 3; Portilla, 2012, p. 6).

Las hojas son simples, con disposición alterna, de ápice acuminada, de forma elípticas u ovoides, tiene borde dentada, el tamaño de la hoja puede ser de 8 a 15 cm de largo y 3 a 6 cm de ancho, el haz de la hoja es color verde oscuro a diferencia del envés que es de color verde claro a grisáceo, el aliso pierde las hojas antes de la floración por ser una especie caducifolia (Penagos et al., 2005, p. 7).

1.2.3. Tallo

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), “cuando tierno presenta pubescencia, en su parte apical es de forma triangular y de intenso color azulado, las ramas se disponen de modo alterno y las ramillas se presentan angulosas y de color marrón rojizo u oscuro” (Portilla, 2012, p. 14).

1.2.4. Corteza

El *Alnus acuminata Kunth* (aliso), tiene la corteza lisa de color gris claro, a veces plateada en los árboles jóvenes, cuando adultos en ciertos casos se tornan pardo y se agrieta a manera de escamas delgadas y verticales además, se encuentra lenticelas alargadas y blancuzcas de cerca de 1,5 cm, protuberantes, suberosas, y fáciles de identificar, el espesor de 1 mm Añazco (1996) citado en (Portilla, 2012, p. 14). “La corteza es de color grisáceo, a veces plateado, con lenticelas amarillentas, ovals y circulares dispuestas horizontalmente a lo largo del fuste. La copa es irregular y generalmente es angosta” (Penagos et al., 2005, p. 6).

1.2.5. Raíz

El sistema radicular del *Alnus acuminata Kunth* (aliso), es amplio y se puede encontrar en las primeras capas del suelo, en suelos arenosos tienden a desarrollar raíces pivotantes y poco profundas. La raíz

se encuentra cubierta por la epidermis de color parda o amarillo a partir de los dos meses de edad Añazco (1996) citado por (Portilla, 2012, p. 14).

La raíz del aliso presenta nódulos como consecuencia de la simbiosis con el hongo denominado actinomiceto del género *Frankia spp.*, responsables de fijar nitrógeno atmosférico estos nódulos pueden llegar a medir hasta los 6 cm de diámetro y se encuentran en los primeros 5 cm del suelo esta condición favorece a la recuperación de suelos degradados (Penagos et al., 2005, p. 7).

1.3. Fertilizantes

Los fertilizantes o abonos son sustancias orgánicas e inorgánicas que las plantas necesitan incorporar a su sistema a manera de nutrientes para su óptimo desarrollo, estas se pueden tomar del suelo y del aire (FAO, 2002, p. 3). Por otro lado, la nutrición es definida como el suministro y la absorción de compuestos químicos necesarios para el crecimiento y los nutrientes como los compuestos químicos requeridos por un organismo (Mengel & Kirkby, 2000, p. 12).

1.3.1. Abono orgánico

La fuente de los abonos orgánicos proviene principalmente de excrementos de animales de corral como los ganados ovinos, porcinos, bovinos y aves. Otra fuente de materia orgánica de las plantas ambas fuentes deben ser descompuestas antes de su aplicación (FAO, 2002: p. 11). “Son aquellos que se forman naturalmente con poca participación del hombre para su formación generalmente pueden ser de origen mineral, vegetal, animal o mixto” (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019, p. 15).

1.3.2. Abonos químicos

También llamados fertilizantes químicos son elaborados por el hombre para suplir las deficiencias de los suelos, estos fertilizantes son de origen mineral, animal, vegetal o sintético. Los principales componentes son denominados macronutrientes que contienen principalmente nitrógeno, fósforo y potasio en diferente proporción (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019, p. 16). Para Mengel y Kirkby (2000, p. 60) para que un elemento sea considerado un nutriente esencial de las plantas deben satisfacerse las tres condiciones:

- 1) Una deficiencia de este elemento hace imposible que la planta complete su ciclo vital.
- 2) La deficiencia es específica para el elemento en cuestión.
- 3) El elemento está directamente implicado en la nutrición de la planta. Por ejemplo, como constituyente de un metabolito esencial requerido para la acción de un sistema enzimático.

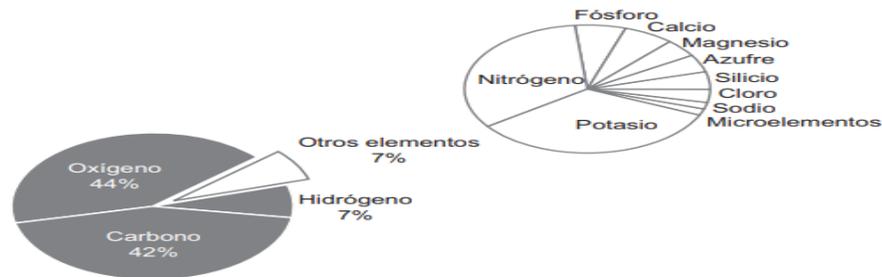


Figura 1-1: Composición química de las plantas

Fuente: FAO, 2002, p. 13.

1.4. El nitrógeno (N)

El nitrógeno es considerado como el motor del crecimiento de las plantas su concentración está de 1 al 4 por ciento del extracto seco de la misma, es absorbido por la planta desde el suelo en forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). En la planta el nitrógeno se combina con los componentes producidos por el metabolismo de los carbohidratos para formar aminoácidos y proteínas. Como componente esencial de las proteínas, participa en procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento de las especies forestales (FAO, 2002, p. 14).

Las deficiencias del nitrógeno es apreciada en las hojas inferiores de la planta con una clorosis en los borde de los folíolos que evoluciona hacia la nervadura central de la hoja tornándose de color amarillo- anaranjado y la planta en general va perdiendo su color verde característico de cada especie, las hojas jóvenes de la parte superior sufre marchitez (Hernández & Pacheco, 1986, p. 14).

La deficiencia en el *Alnus acuminata Kunth* (aliso) empieza con clorosis leve en las bordes de las hojas basales posteriormente se torna de una tonalidad café. Finalmente, los folíolos se necrosan hacia la nervadura central, las hojas jóvenes presentan disminución de color verde por perder la capacidad de realizar la fotosíntesis esto ocasiona que las plantas reduzcan el crecimiento (Tovar & Cogua, 1990, p. 90).

1.5. El fósforo (P)

El fósforo aporta del 0,1 al 0,4% del extracto seco de la planta, juega un papel importante en la transferencia de energía. Por tanto, es importante para la fotosíntesis y otros procesos químico-fisiológicos, para la diferenciación celular y para el desarrollo de los tejidos que componen los puntos de crecimiento de la planta. El fósforo es deficiente en la mayoría de los suelos naturales o agrícolas donde la fijación limita su disponibilidad (FAO, 2002, p. 14).

Los síntomas de las deficiencias de fósforo en especies forestales es detectada como clorosis no generalizada leve en los folíolos viejos mientras que las nervadura primaria y secundaria mantienen su color, el retraso de crecimientos y desarrollo de las plantas en su etapa inicial pero no es fácil de detectar visualmente (Hernández & Pacheco, 1986, p. 14).

La deficiencia de fósforo en *Alnus acuminata Kunth* (aliso) se puede notar porque las hojas basales se tornan de verde más oscuro de lo normal en ocasiones en el envés de hoja presenta manchas de color café, debido a la movilidad del fósforo esta deficiencia se observa en las hojas viejas con caída prematura de los folíolos, las nervaduras secundarios como el principal no sufren ninguna alteración visible (Tovar & Cogua, 1990, p. 90).

1.6. El potasio (K)

El potasio constituye del 1 al 4% del extracto seco de la planta, se encuentran formando parte de muchas funciones. Activa más de 60 enzimas (sustancias químicas que regulan la vida) por ello juega un papel importante en la síntesis de carbohidratos y proteínas, el K mejora el régimen hídrico de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, las heladas y la salinidad. Las plantas que están bien provistas de K sufren menos enfermedades (FAO, 2002, p. 14). De manera general la deficiencia de potasio en las especies forestales es denotado con clorosis marginal en las hojas inferiores acompañado de manchas blancas al paso del tiempo esta clorosis se convierte en puntos de tejido seco (Hernández & Pacheco, 1986, p. 14).

1.7. NPK 10-30-10

Es un abono complejo edáfico granulado denominado como abono fosforado compuesto con alto contenido de fósforo en relación 1:3:1 (MONÓMEROS, 2007). Según Ciencia Agrícola Cultivando Soluciones (2019):“SYS NPK 10-30-10 es un fertilizante granular complejo que posee un balance adecuado de nutrientes Nitrógeno, Fósforo y Potasio fácilmente disponibles para las plantas”. La dosificación de NPK 10-30-10 es de 4 a 6 kg/ ha en 900 a 1000 litros de agua, la aplicación se puede directamente en el área foliar y el suelo para estimular el crecimiento de la planta (MONÓMEROS, 2007).

Tabla 1-1: Información de los componentes del NPK 10-30-10.

Componente		% Peso	CAS	Sustancia Peligroso
Nitrógeno	Total	10	No clasificado	No
	Nitrógeno Amoniacal	8,2		
	Nitrógeno Nítrico	1,8		
Fósforo Asimilable (P ₂ O ₅)	30			
Potasio soluble en agua (K ₂ O)	10			

Fuente: MONÓMEROS, 2007.

Realizado por: Agualzaca D., 2021.

1.8. NPK 15-15-15

Es un fertilizante granulado edáfico por su alto contenido de nutrientes acelera el crecimiento de las plantas y arbustos, provee de elementos químicos necesarios para su normal desarrollo (ISUSA, [sin fecha]).

Tabla 1-2: Información general de NPK 15-15-15.

CONTENIDO DECLARADO	
Porcentaje (%)	Características
15,00	Nitrógeno Total
13,00	Nitrógeno amoniacal
2,00	Nitrógeno ureico
15,00	Pentóxido de fósforo (P2O5) soluble en citrato de amonio y en agua
13,50	Pentóxido de fósforo (P2O5) soluble en agua
15,00	Óxido de potasio (K2O) soluble en agua
20,00	Trióxido de azufre (SO3) total
18,00	Trióxido de azufre (SO3) soluble en agua

Fuente: Fertiberia, 2017, p. 70.

Realizado por: Agualzaca D., 2021.

1.9. NPK 18-46-0

El nombre genérico del fertilizante es Fosfato Diamónico, es un producto edáfico sólido granulado, de color café, es un fertilizante altamente soluble que proporciona una liberación rápida y continúa de los nutrientes por lo tanto cuando existe sobredosificación la planta muestra más rápido el entoxicamiento a diferencia de otros fertilizantes (Nutrición de plantas S.A., 2013, p. 1).

1.10. Sensores remotos

La percepción remota o teledetección se ha utilizado ampliamente como una herramienta que permite procesar información de la estructura del bosque y la biomasa aérea, ya que proporciona un medio práctico para evaluar espacialmente la biomasa forestal a nivel local, regional y global (Zheng et al., 2004, p. 406). Las técnicas de teledetección permiten examinar propiedades y procesos de los ecosistemas a escala múltiple de áreas de interés, las estimaciones tienen que ser vinculadas con diversos índices de vegetación Acosta (2003) citado por (Escobar, 2016, p. 29).

La teledetección procesa información a partir de una serie de elementos primordiales tales como; la fuente de energía, sistema de recepción, plataforma de observación; donde un sensor capta la energía y codifica la interacción energía y la superficie captada (agua, suelo, vegetación, etc.) y envía a un

software especializada donde el usuario puede analizar la información obtenida Matter (1987) citado por (León, 2017, p. 26). La teledetección engloba diversas fuentes en las cuales se integran utilizando tecnología de Sistema de Información Geográfica (SIG) para que el usuario interprete de la manera más conveniente de acuerdo al objetivo planteado gracias a la capacidad de los sensores para medir las respuestas espectrales, las variaciones espaciales y temporales de la superficie a estudiar (Mather & Koch, 1999, p. 29).

“El estudio de los recursos territoriales y la medición de los campos energéticos de los cuerpos que se centran rodeado de ondas electromagnéticas, que son codificadas en datos digitales y dispuestos en arreglos matriciales” (León, 2017, p. 26). Durante el procesamiento de una imagen, el elemento primordial es el sol que emite radiación electromagnética, esta energía es captada por un sensor cuando es reflejada por todas las superficies, quien captura y transforma en formato digital (Torres et al., 2013, p. 13).

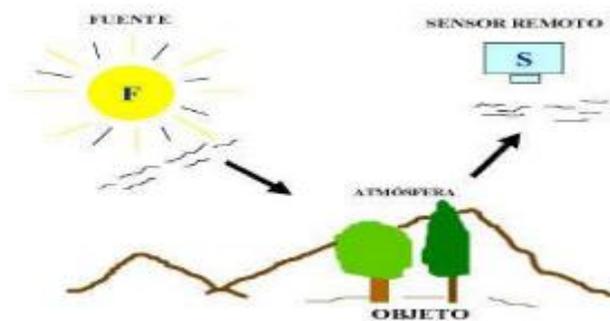


Figura 1-2: Componentes de sistema de teledetección.

Fuente: León, 2017, p. 27.

1.11. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es un arreglo continuo de radiaciones que tiene diferente longitud de onda y se extienden desde la luz visible hasta ondas no visibles como los rayos gamma pueden ser medidos en angstrom hasta kilómetros (Torres et al., 2013, p. 50).

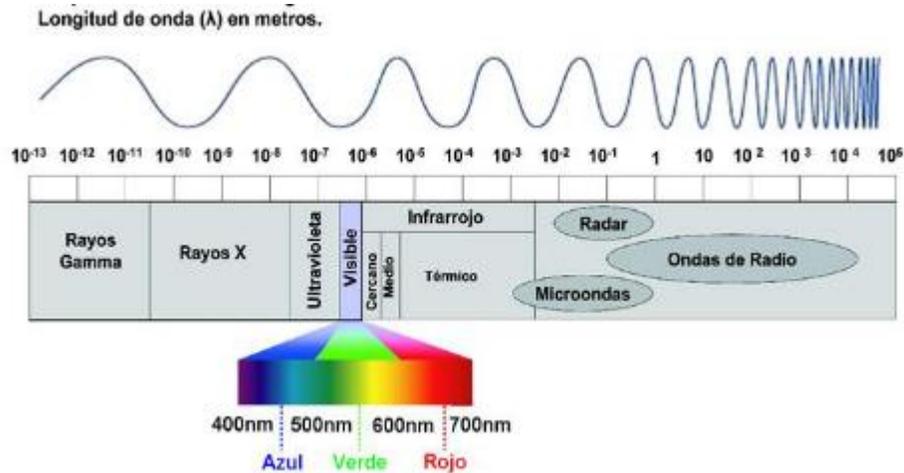


Figura 1-3: Rangos de espectro Electromagnético.

Fuente: León, 2017, p. 27.

1.12. Respuesta espectral reflectiva de la naturaleza

La reflectancia de los elementos de la naturaleza (cobertura de la vegetación, recursos hídricos y el suelo) interactúa de diversas formas conforme a las características específicas de cada objeto (León, 2017, p. 29).

En el estudio de la reflectancia, los sensores captan la información, sin embargo, esta información captada puede ser afectada por factores externos como; “ángulo de iluminación solar, estado fenológico de las especies forestales, época del año, ubicación geográfica, radiometría del sensor, cambios de humedad, etc.” Mulla (2013) citado por (León, 2017, p. 30).

1.13. Reflectividad de la vegetación

La reflectancia emitida por la vegetación dependen primordialmente del conjunto de las hojas que están dispuestas y agrupadas de diferentes formas dependiendo de cada especie y el estado fenológico del mismo (Torres et al., 2013, p. 78). Siendo las hojas el principal medio para obtener la reflectancia está constituido por materia orgánica como el pigmento de color verde denominado clorofila responsable de captar la energía luminosa (León, 2017, p. 30).

La energía captada, absorbida y reflejada por las hojas es transmitida a manera de ondas de diferente longitud, la cual es captada por un sensor especializado dependiendo además de factores externos

mencionada anteriormente (Torres et al., 2013,p. 10; Mulla, 2013, p. 45). “La combinación de los pigmentos y la estructura fisiológica de las hojas contiene propiedades y características capturadas a partir de la reflectancia” (León, 2017, p. 31).

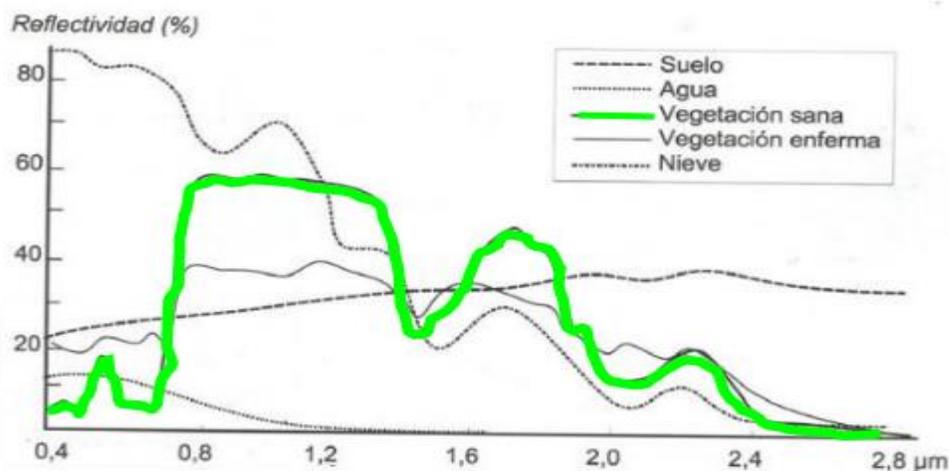


Figura 1-4: Firmas espectrales de las diferentes coberturas.

Fuente: León, 2017, p. 29.

1.14. Estimación de biomasa basada en Percepción Remota

La biomasa se calcula esencialmente usando la densidad de la unidad de biomasa y el área de incremento forestal, la biomasa aérea se puede apreciar con percepción remota óptica de dos formas diferentes, la biomasa forestal es estimada con modelos estadísticamente establecidos con relación entre respuestas espectrales y muestras de campo de las mediciones de biomasa o los registros de inventarios forestales (Brown & Lugo, 1992, p. 79).

Este es un método no destructivo porque permite medir variables de árbol, tales como medición de las copas, la altura del árbol, y el diámetro del fuste y convertirlos en biomasa con ecuaciones que describen las relaciones entre las variables medidas llamadas modelo alométrico o ecuaciones alométricas (Brown & Lugo 1992, p. 43; Cutler, 2003, p. 467).

Los modelos se generan utilizando el análisis de regresión, los parámetros del modelo o coeficientes se ven afectados por varios factores que influyen en el ambiente, el ángulo del sol, el ángulo de vista

de satélite, el estado fenológico de crecimiento de la vegetación en el momento de adquisición de la imagen, y la topografía (Escobar, 2016, p. 29).

La cantidad de energía de la radiación en el espectro electromagnético emitida o reflejada por un objeto y el área próximo permite la estimación de los valores de biomasa, la cual es una combinación del dosel arbóreo, la radiancia atmosférica y la reflectancia refleja propiedades forestales (Zheng et al., 2004, p. 50; Hanes, 2014, p. 12).

Los índices de vegetación tales como ; NDVI, SAVI, NDFI, AVI, GVI, etc., mejoran la señal de la vegetación, reducen al mínimo la influencia de la radiación solar, el ángulo solar, el ángulo de visión del sensor, y los efectos de la atmósfera y el suelo (Huete, 1988, p. 300 ; Hanes, 2014, p. 12).

Las imágenes de satélite de alta resolución como Ikonos, QuickBird, fotografías aéreas y sensores de radar como ERS, JERS, Envisat, PALSAR, o sensores de láser Lídár son herramientas muy poderosas. Todos estos métodos parten del supuesto de que se dispone de las medidas de campo para ajustar las relaciones que predicen la biomasa en función de las observaciones hechas por los sensores (Hanes, 2014, p.13).

Sin embargo, los métodos de percepción remota siguen siendo la mejor alternativa en cuanto a la precisión de las mediciones de biomasa y la diferenciación de los tipos de bosques en función de los medios técnicos y financieros, los recursos humanos disponibles, la nubosidad y el riesgo de saturación de las señales utilizadas para ciertos tipos de vegetación Hanes (2014) citado por (Escobar, 2016, p. 29).

1.15. Clorofila

La clorofila (un indicador de salud) absorbe una gran cantidad de luz visible y la estructura celular de las hojas refleja intensamente la luz infrarroja cercana. Cuando una especie forestal sufre estrés hídrico, sufre ataque fitosanitario, etc., el mesófilo esponjoso se deteriora y la planta absorbe más luz infrarroja cercana, en lugar de reflejarla. De tal manera que la observación de cómo cambia la NIR en comparación con la luz roja proporciona una predicción precisa de la apariencia de la clorofila, que está vinculada con la salud de las plantas (EARTH OBSERVING SYSTEM, n.d.).

1.16. Índice de vigor vegetal

El vigor vegetal se puede expresar como plantas con los nutrientes apropiados, tamaño adecuado, es decir que las especies forestales tengan los nutrientes, agua y condiciones ambientales óptimas para su desarrollo (Pérez & Merino, 2013, p. 50). En tanto que, Chao y Chen (2012), mencionan que se han desarrollado diversidad de índices para el estudio del vigor vegetal, los cuales integran la energía electromagnética captada de la superficie de los follajes.

Por otro lado, el índice de vigor vegetal es definido, como la calidad que tienen las especies forestales para adaptarse y desarrollar con condiciones edáficas y climáticas, según a las características genéticas, germoplasma, tipo de sustrato, las técnicas y tratamientos silviculturales utilizados para la propagación y cuidado de las plantas (Rueda et al., 2012 p. 70).

1.17. Métodos no destructivos para evaluación de vigor vegetal

Existen diferentes técnicas no destructivas para el análisis de vigor para de especies vegetales, es decir, no que implican destrucción de tejidos. El análisis por reflectancia de infrarrojo y el test de clorofila, permiten relacionar la intensidad del color de la clorofila en una hoja explícita de la especie forestal con el suministro de N₂O. Sin embargo, su uso se ve limitado cuando el color puede deberse a otra clase de factores como: daños por insectos, condiciones climáticas, etc., estos métodos pueden ser útiles, prácticas y económicas, pero es necesario calibrar para cada especie y zona particular (Barbazán, 1998, pp. 17-20).

1.17.1. La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS)

Se trata de una técnica para evaluar el vigor de las especies forestales que no destruye ni contamina al ambiente con químicos, además, tiene potencialidad para ser automatizada, en la práctica permite analizar de forma rápida y relativamente fácil, un gran número de muestras. Esta técnica ha alcanzado un gran desarrollo a nivel mundial por su precisión y exactitud (Valenciaga & Oliveira, 2006, p. 260).

1.17.2. La prueba de clorofila

El análisis de pigmentos en especies forestales es un procedimiento de laboratorio, usualmente no es una técnica inmediata que se pueda realizar in situ existen dos equipos utilizado con más frecuencia

SPAD 502 y CCM-200, para estimar de modo indirecto no destructivo y rápido el contenido de clorofila (Castañeda et al., 2018, p. 329).

1.18. NDVI

Los índices de vegetación son una combinación de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, etc., se trata de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales (Alonso, 2015).

Es un índice no dimensional, su rango de valores comprendidos de -1 a 1, estos valores están relacionados con el vigor vegetal, valores entre -1 a 0 corresponden a cuerpos de agua, roca, el territorio en general al área desprovisto de vegetación, valores entre 0,1 a 0,4 coberturas de pasto, valores cercanos a 1 corresponden a zonas boscosas (Román, 2007, p. 14; Escobar, 2016, p. 16).

1.19. Índice de robustez

El índice de robustez es un indicador de resistencia de la planta a los daños por viento, sequía y helada, el mismo que relaciona el diámetro del cuello de la raíz (DAC) medidos en milímetros y la altura de la planta medido en centímetro (Sáenz et al., 2014, p. 17). El IR con un valor inferior indica mejor calidad de planta es decir son plantas más robustas, cuando son bajos y gruesos ayudando a adaptarse a las inclemencias ambientales o sequías; valores superiores a seis indican una desproporción entre el crecimiento en altura y el diámetro, como pueden ser tallos elongados con diámetros delgados (Sáenz et al., 2014, p. 18).

$$IR = \frac{\text{Altura de la planta (cm)}}{\text{Diámetro a la altura del cuello (mm)}} \quad \text{Ecuación 1-1 Índice de robustez}$$

Donde,

IR= Índice de Robustez.

H= Altura de la planta en centímetros.

DAC= Diámetro a la altura del cuello en milímetros.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Características del lugar

Según la clasificación de zonas de vida MAE (2013), el cantón Riobamba por situarse en la región interandina posee un bioclima pluvial, fenológicamente la vegetación es siempreverde.

2.1.1. *Área de estudio*

La presente investigación se llevó a cabo en el vivero de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales en la ciudad de Riobamba provincia de Chimborazo. Según el Ministerio del Ambiente es considerado como Vivero Forestal (Mendoza Velásquez et al., 2015, p. 8).

2.1.2. *Ubicación geográfica*

Lugar: vivero de la ESPOCH – RIOBAMBA – CHIMBORAZO.

- Latitud: 1°39'4,86"S.
- Longitud: 78°40'49.29"O.
- Altitud: 2755 m.s.n.m.

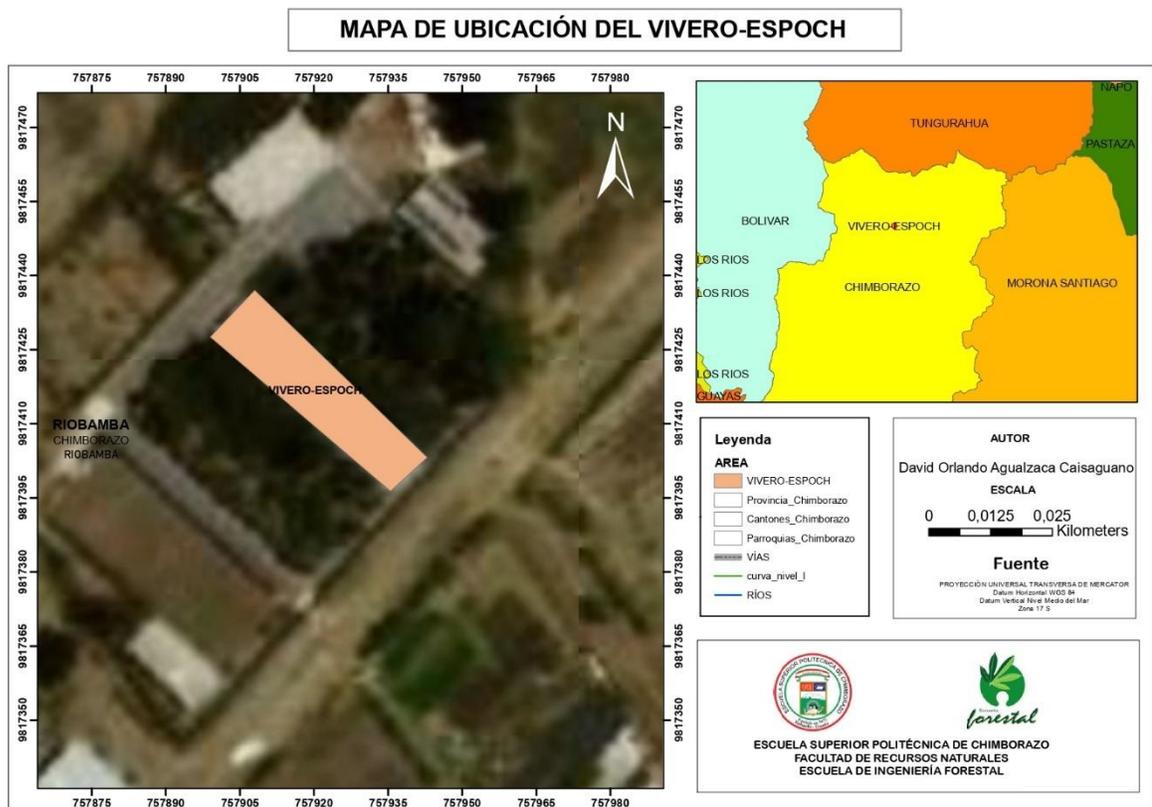


Figura 2-5: Mapa de ubicación del vivero de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Fuente: Agualzaca D., 2021.

2.1.3. Características climáticas

El lugar donde se realizó el trabajo de titulación presentó las siguientes condiciones climáticas:

Precipitación media anual: 565,2 mm H₂O.

Temperatura media anual: 13,4 ° C.

Velocidad del viento media anual: 2,2 m/s

Humedad Relativa media diaria: 74,4 %

Datos adquiridos por la estación Agrometeorológica de la ESPOCH. (Tiupul & Arévalo, 2018, p. 16).

2.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utilizó en el presente trabajo fue de tipo experimental para el análisis de la asimilación de fertilizantes de NPK aplicado en plántulas de *Alnus acuminata Kunth* de 11

meses. Para evaluar esta respuesta se aplicó dos métodos no destructivos; que permitió determinar los índices IR y NDVI, estos índices a su vez permitieron evaluar el vigor vegetal.

2.3. Método de investigación

El método que se utilizó en la presente investigación es el método experimental el cual permite controlar las variables como el riego, la temperatura, la dosificación de fertilizante de NPK para determinar la relación entre sí y compararlo con un grupo de control o testigo.

2.4. Materiales y equipos

2.4.1. Herramientas

- ✓ Carretilla.
- ✓ Manguera.
- ✓ Pala.
- ✓ Regadera.
- ✓ Flexómetro.
- ✓ Piola.

2.4.2. Materiales e insumos

- ✓ Libreta de campo.
- ✓ Esfero.
- ✓ Regla.
- ✓ Fundas plásticas.
- ✓ Sustratos (arena de río, tierra negra, arcilla).
- ✓ Mascarilla.
- ✓ Letreros.
- ✓ Papel.

2.4.3. Equipos

- ✓ Computador.
- ✓ Impresora.
- ✓ Calibrador digital.
- ✓ Cámara digital.
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Filtros IR.

2.4.4. Material genético

Las plántulas de la especie *Alnus acuminata Kunth* (aliso) utilizado en la investigación fueron adquiridos en el vivero de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), La edad de la especie forestal empleado en el presente estudio fue de 11 meses.

2.4.5. Tratamientos (Fertilizantes)

Se evaluó el uso de tres dosificaciones de NPK en distintas concentraciones más el testigo. Los tratamientos mostrados en la Tabla 3-2 corresponden a las soluciones y sus combinaciones de NPK respectivamente.

Tabla 2-3: Tratamiento de NPK con su diferente dosificación.

Nº	TRATAMIENTO	N	P	K
1	T1: NPK 10-30-10	10	30	10
2	T2: NPK 15-15-15	15	15	15
3	T3: NPK 18-46-0	18	46	0
4	TESTIGO	0	0	0

Fuente: Agualzaca D., 2021.

2.4.6. Tratamientos

En la Tabla 3-2, se describe los tratamientos empleados en el Diseño de bloques Completos al AZAR (DBCA) para analizar la respuesta del aliso a nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en diferentes concentraciones más el testigo sin solución nutritiva de NPK. En el T1: NPK 10-30-10, T2: NPK 15-15-15, T3: NPK 18-46-0, la dosis empleada fue de 10 gramos para cada plántula de *Alnus acuminata Kunth* con 40 unidades experimentales para cada tratamiento distribuido equitativa y aleatoriamente en 4 bloques.

Tabla 2-4: Tratamientos para evaluar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth*.

BLOQUES	TRATAMIENTOS	CODIFICACIÓN
1	T1	B1T1R1S ₁₋₁₀
	T2	B1T2R2S ₁₋₁₀
	T3	B1T3R3S ₁₋₁₀
	Testigo	B1T4R4S ₁₋₁₀
2	T1	B2T1R1S ₁₋₁₀
	T2	B2T2R2S ₁₋₁₀
	T3	B2T3R3S ₁₋₁₀
	Testigo	B2T4R4S ₁₋₁₀
3	T1	B3T1R1S ₁₋₁₀
	T2	B3T2R2S ₁₋₁₀
	T3	B3T3R3S ₁₋₁₀
	Testigo	B3T4R4S ₁₋₁₀
4	T1	B4T1R1S ₁₋₁₀
	T2	B4T2R2S ₁₋₁₀
	T3	B4T3R3S ₁₋₁₀
	Testigo	B4T4R4S ₁₋₁₀
TOTAL		160 PLANTAS

Fuente: Agualzaca D., 2021.

2.5. Unidad experimental

La investigación contó con 10 observaciones o muestras, 4 tratamientos, 4 bloques y a cada plántula de aliso se consideró como unidad experimental sumando un total de 160 plantas de *Alnus acuminata Kunth*.

2.6 Tratamiento de datos

2.6.1 Diseño experimental

Se utilizó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con cuatro bloques, cuatro tratamientos, cuatro repeticiones y diez submuestras para cada repetición con un total de 160 plantas. El diseño estadístico fue el siguiente:

$$k2Y_{ij} = \mu + U_i + \epsilon_{ij}$$

Donde;

Y_{ij} : valor estimado de la variable

μ : media general.

U_i : efecto del tratamiento $T_1, T_2, \dots, T_{iavo}$

ϵ : error experimental

Tabla 2-5: ANOVA para determinar el índice de robustez y NDVI a la respuesta de *Alnus acuminata Kunth* a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30,45 días en vivero.

Fuentes de Variación (F de V)	Fuentes grados de libertad	Grados de libertad (GL)
Tratamientos	(t-1)	3
Bloques	(r-1)	3
Error	(t-1) (r-1)	9
Total	(N-1)	15

Fuente: Agualzaca D., 2021.

Se utilizó la prueba de rango múltiple Tukey al 5% para los diferentes tratamientos con dosis de NPK. Para el manejo y la tabulación de los datos se utilizó el programa estadístico SPSS versión 2.5.0.

2.7. Metodología

La parte experimental inició el 13 de noviembre del 2020 con el trasplante y repique de las plantas de aliso de 11 meses de edad y su respectiva distribución de acuerdo con el diseño experimental diseño de bloques completos al azar (DBCA), el mismo que es detallado en la Tabla 5-2 y se extendió hasta el 15 de enero del 2021 en donde se realizó la última medición de altura, DAC y toma de fotografías en infrarrojo de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth*.

Se utilizó tres dosis de fertilizantes para los distintos tratamientos y un testigo distribuido en 160 observaciones como se muestra en la Tabla 4-3, las mediciones experimentales se realizaron de acuerdo con cada etapa de investigación y consecuentemente los datos se tomaron en intervalos de 15 días, esto permitió evaluar los efectos de la asimilación de las dosis de nutrientes (NPK). Para cumplir con los objetivos planteados de la presente investigación, se procedió a desarrollar el trabajo de la siguiente manera:

2.7.1. Para la preparación del material parental

- ✓ Se realizó el repique de las plántulas de aliso a fundas plásticas con el sustrato (50% tierra negra, 25% arena y 25% de turba).
- ✓ Se realizó la distribución aleatoria de las plántulas de aliso según el diseño presentado en la Tabla 2 posteriormente el etiquetado con la codificación respectiva de cada unidad experimental.
- ✓ Se procedió a pesar los 10 gramos en una balanza analítica de cada tratamiento, luego se colocó en cada unidad experimental respectivamente. La dosificación de NPK fue granular-edáfico distribuida homogéneamente en la funda sin tocar el cuello de la planta.
- ✓ El riego fue realizado por inundación una vez por semana y con regadera el día 0, 15, 30, 45 posterior a cuando se aplicó los tratamientos esto para no causar estrés a las plántulas de *Alnus acuminata Kunth*.

2.7.2. Determinación del índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata Kunth* a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30 y 45 días en vivero

Para el desarrollo del primer objetivo se procedió de la siguiente manera. Según Villalón et.al. (2016: p. 49), manifiesta que para estimar el índice de robustez se empleó la fórmula para especies forestales

con desarrollo normal en condiciones adecuadas, es decir las plántulas se encuentran en condiciones ambientales controladas. Como muestra la ecuación [1].

$$IR = \frac{H}{DAC} \quad [1]$$

- ✓ El primer registro de datos se realizó a 15 días después de la aplicación de las dosis de NPK en los distintos tratamientos para lo cual se midió la altura desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la plántula con una cinta métrica y el DAC de la planta se midió con un calibrador o pie de rey digital.
- ✓ El segundo registro de datos se realizó en los 30 días posteriores de la aplicación de las dosis de NPK en los distintos tratamientos de la misma manera se midió la altura desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la plántula con una cinta métrica y el DAC de la planta se midió con un calibrador o pie de rey digital.
- ✓ El último registro de datos se realizó 45 días después de la aplicación de las dosis de NPK en los distintos tratamientos al igual que la primera y segunda toma de datos se midieron la altura desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la plántula con una cinta métrica y el DAC de la planta se midió con un calibrador o pie de rey digital.

Para el manejo y la tabulación de los datos se utilizó un software estadístico especializado para el análisis de ANOVA y Pruebas de Medias de Tukey al 5% para los datos obtenidos en las tres mediciones especificado en el desarrollo de la metodología.

2.7.3. Evaluación de la asimilación de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata* Kunth a partir de un método no destructivo denominado Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15, 30 y 45 días

Las actividades realizadas para evaluar la asimilación de nutrientes a partir de fotografías infrarrojo para el método no destructivo se utilizó la reflectancia del índice NDVI en los tres anchos de banda: 659–681 nm; 720–740 nm; y >760 nm, en sus primeras etapas de crecimiento fueron los siguientes.

- ✓ El primer registro de datos se realizó a 15 días después de la aplicación de las dosis de NPK en los distintos tratamientos para lo cual se tomó las fotografías de plántulas de *Alnus acuminata* Kunth utilizando una cámara digital SONY DSC HX400V con sensor de imagen tipo CMOS

Exmor R® de 20.4 Megapíxeles acoplado un filtro óptico para obtener las bandas correspondientes R y NIR.

- ✓ El segundo registro de datos se realizó en los 30 días posterior de la aplicación de las dosis de NPK en los distintos tratamientos de la misma forma se tomó las fotografías de plántulas de *Alnus acuminata Kunth* utilizando una cámara digital SONY DSC HX400V con sensor de imagen tipo CMOS Exmor R® de 20.4 Megapíxeles y un filtro óptico para obtener las bandas correspondientes R y NIR.
- ✓ Finalmente, la última toma de fotografías fue realizado después de los 45 días de aplicar las dosis de NPK en los distintos tratamientos al igual que las dos anteriores mediciones se utilizó una cámara digital SONY DSC HX400V con sensor de imagen tipo CMOS Exmor R® de 20.4 Megapíxeles acoplado un filtro óptico para obtener las bandas correspondientes R y NIR.

El ángulo de inclinación empleado para toma de las fotografías fue de 45 grados, la graduación del filtro IR para las tres mediciones fue 750 nm, la distancia empleada entre la planta de aliso y la cámara fotográfica de 25±2 centímetros, el formato de las fotografías utilizado para la investigación fue JPG. La expresión según López et al. (2016, p. 1) empleado para cálculo de índice de vigor vegetal;

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Para el procesamiento de imágenes se utilizó el software R Studios para análisis de fotografías infrarrojo en formato JPG el cual procesa y arroja sus resultados en formato TIF y el software ArcMap ver. 10.5.0 se empleó para el cálculo del índice NDVI. Finalmente, los datos obtenidos en los tres análisis fueron tabulados y procesados en un software estadístico especializado para el análisis del ADEVA de diseño de bloques completamente al azar y la prueba de medias de Tukey al 5%.

2.7.4. Análisis comparativo para determinar la factibilidad en la aplicación de los métodos Índice Robustez e Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI)

Para determinar la factibilidad en la aplicación de los dos métodos para evaluar el vigor vegetal del aliso analizados en esta investigación se consideró los parámetros de tiempo y costos.

- ✓ Se comparó el tiempo empleado para determinar el índice de robustez y el tiempo necesario para realizar el análisis del índice NDVI.
- ✓ Se analizó los costos en la aplicabilidad del índice de robustez y el índice NDVI.

- ✓ Se realizaron gráficas de correlación del índice de robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI).

CAPÍTULO III

3.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según López et al. (2016, p. 1), el uso de métodos no destructivos para evaluar el vigor vegetal de especies forestales reproducidas en el vivero tiene gran potencial y es de gran utilidad en la toma de decisiones en el ciclo de producción, esto impulsó a la decisión del tema de investigación para evaluar el vigor vegetal con dos métodos no destructivos; para determinar los índices IR Y NDVI respectivamente para evaluar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth*.

Las especies forestales manifiestan de distinta manera la respuesta a la fijación de nutrientes, según Cai et.al. (2008) citado por (Escamilla et al., 2015, p. 330). Por lo que es indispensable indagar la respuesta particular a cada una de las dosis de fertilizantes, en el presente trabajo de investigación se evaluó la respuesta de *Alnus acuminata Kunth* a la fertilización con dosis de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en diferente dosis evidenciada en su vigor vegetal.

Tabla 3-6: Variables empleadas para el estudio de IR Y NDVI de *Alnus acuminata Kunth*.

Variables empleadas para el estudio de IR Y NDVI de <i>Alnus acuminata Kunth</i>			
		Etiqueta de valor	N° de Plantas
BLOQUES	1	BLOQUE 1	40
	2	BLOQUE 2	40
	3	BLOQUE 3	40
	4	BLOQUE 4	40
TRATAMIENTOS	1	T1: NPK 10-30-10	40
	2	T2: NPK 15-15-15	40
	3	T3: NPK 18-46-0	40
	4	TESTIGO	40

Fuente: Agualzaca D., 2021.

En el presente capítulo se presentan los efectos de las mediciones para las variables con respecto a la asimilación de nutrientes. Arrojando los siguientes resultados.

3.2. Resultado del análisis del índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15, 30 y 45 días

3.2.1. Resultado del índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15 días

En la primera medición para determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15 días se tomó los datos de la altura en centímetros y diámetro a la altura del cuello DAC en milímetros arrojando los siguientes resultados.

Tabla 3-7: ADEVA para determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 15 días.

DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
F de V	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	Fo	Valor de P	P Tabular
BLOQUES	6,249	3	2,083	0,818	0,486	>0,05
TRATAMIENTOS	5,371	3	1,790	0,703	0,552	>0,05
Error	389,560	153	2,546			
Total	17065,332	160				

Fuente: Agualzaca D., 2021.

A nivel estadístico en la Tabla 3-7, se puede observar que el valor de significancia de bloques es 0,486 mayor a 0,05 y el valor de significancia de tratamientos 0,552 mayor a 0,05; por lo que determina que el análisis de varianza para tratamiento no muestra diferencias estadísticas a los 15 días de aplicar los tratamientos con dosis de fertilizante NPK.

La evaluación realizada para determinar el índice de robustez por Pérez (2018) a cinco especies forestales, los primeros datos obtenidos después de la fertilización fueron; para *Pinus pseudostrobus* con IR=5,59 y P-valor=0,722; *Quercus rubra* con IR= 6,46 y P-valor=0,046; *Gmelina arborea* con IR= 9,44 y con un P-valor=0,320; *Tectona grandis* con IR= 4,68 y con un P-valor= 1,10E-050 e *Eucalyptu camaldulensis* con IR= 16,49 y P-valor=0,859. *Alnus acuminata* Kunth no manifiestan respuesta favorable a la nutrición con dosis de NPK en su vigor vegetal a los 15 días después de haber aplicado la dosis de NPK.

3.2.2. Resultado de índice robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 30 días

En la segunda evaluación de las dosis de fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en los distintos tratamientos para determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a dichos tratamiento a los 30 días se tomó los datos de la altura en centímetros y diámetro a la altura del cuello DAC en milímetros. A continuación, se detalla los resultados del ANOVA.

Tabla 3-8: ADEVA para determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 30 días.

DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
F de V	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	Fo	Valor de P	P tabular
BLOQUES	6,692	3	2,231	0,94	0,636	>0,05
TRATAMIENTOS	4,049	3	1,35	0,569	0,423	>0,05
Error	363,007	153	2,373			
Total	16444,025	160				

Fuente: Agualzaca D., 2021.

En la Tabla 3-8 estadísticamente se desprende que el valor de significancia de bloques es 0,636 mayor a 0,05 y el valor de significancia de tratamientos corresponde a 0,423 mayor a 0,05 por lo que se determina que el análisis de varianza para tratamiento no existe diferencia estadístico significativo. Del mismo modo en un estudio realizado con el método no destructivo para evaluar el vigor vegetal después de aplicar fertilizantes con 4 niveles de nitrógeno en especies forestales de 8 meses de edad tales como; *Pinus greggii* a cultivadas en vivero no mostró diferencias significativas en la segunda evaluación (López et al., 2016, p. 54).

3.2.3. Resultado de índice robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 45 días

Para la última evaluación de las dosis de fertilizante de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) utilizado en los distintos tratamientos para determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a dichos tratamientos a los 45 días se tomó los datos de la altura en centímetros y diámetro a la altura del cuello DAC en milímetros obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 3-9: ADEVA para determinar el índice de robustez y la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a los 45 días.

DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
F de V	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	Fo	Valor de P	P tabular
BLOQUES	5,356	3	1,785	0,600	0,616	>0,05
TRATAMIENTOS	7,314	3	2,438	0,820	0,415	>0,05
Error	454,913	153	2,973			
Total	15841,824	160				

Fuente: Agualzaca D., 2021.

En Tabla 3-9 del análisis de ANOVA, el valor de significancia designado para bloques es 0,616 mayor a 0,05 y el valor de significancia de tratamientos corresponde a 0,415 mayor a 0,05; esto precisa que el análisis de varianza para los tratamientos no muestra diferencias estadísticas. Sin embargo, a nivel numérico el valor de p calculado en esta investigación desciende de 0,552 a 0,415 en comparación a la primera evaluación indicando respuesta favorable en su vigor vegetal. De la misma manera López et al. (2016) menciona, que el uso de fertilizantes NPK en la reproducción de plántulas de especies forestales reproducidas en viveros manifiestan respuesta favorable en el crecimiento y desarrollo de plántulas.

El índice de robustez media en calculada obtenida a los 15, 30 y 45 días después de aplicar los tratamientos con dosis de fertilizante de NPK fue de $IR_{media} = 10,20$ $IR_{media} = 10,02$ $IR_{media} = 9,91$ respectivamente. El índice de robustez o índice de esbeltez adecuado para las especies forestales de acuerdo a Toral (1997) citado por (Pérez, 2018, p. 27), están relacionado al vigor vegetal, el índice de robustez debe encontrarse igual o menor a seis, los valores bajos indican plantas de alta calidad, valores entre 5 y 10 plantas de calidad aceptable dependiendo de la especie (Intituto Forestal, 2009, p. 43), una investigación realizada a eucalipto urograndis (*Eucalyptus x urograndis*) producida en vivero obtuvo el índice de robustez de 12,4 (Ramos & Lombardi, 2020, p. 138) los valores altos indican que la planta es más esbelta y menos fuerte, debido a que no existe correlación entre la altura y el diámetro de cuello de la planta.

Otra investigación realizada por (Tinoco & Ramírez, 2014, p. 4,15), mostró que fertilizante NPK 18-46-0 con 100 g en 5 litros de agua obtuvo los mejores resultados, corroborando así, los resultados obtenidos

en la presente investigación pese a que los valores; 10,42; 9,41 y 8,55 en las tres mediciones realizadas están por encima de 6. Se pudo observar que los tratamientos si manifiestan respuesta favorable a la nutrición de NPK en su vigor vegetal. De la misma manera, en la evaluación del crecimiento inicial de aliso (*Alnus acuminata* Kunth H.B.K) de 8 meses de edad ubicado la ciudad de Ibarra mostró el mejor tratamiento al fertilizante NPK 18-46-0 (Revelo, 2007, p. 67).

Por lo mencionado anteriormente, se puede decir que las plántulas de *Alnus acuminata* Kunth muestran respuesta favorable a la fijación de nutrientes con dosis de NPK, conforme va pasando el tiempo de aplicación las plántulas se acercan más al rango óptimo de índice de robustez comprendida entre 5 y 6.

3.3. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata* Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 15, 30 y 45 días

Los resultados del segundo objetivo están basados en el análisis fotográfico tomados con infrarrojo y analizados con softwares especializados mostrando los resultados que a continuación se detalla.

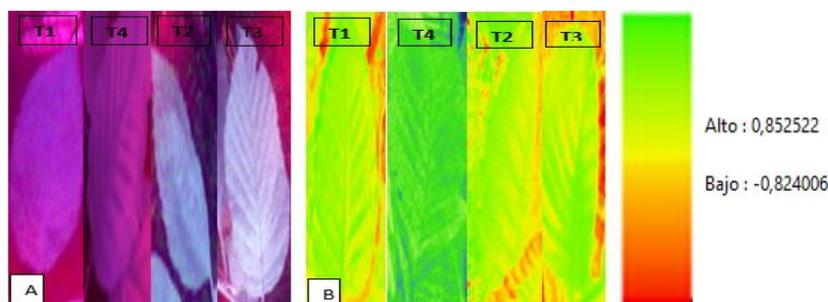


Figura 3-6: Imágenes de plántulas *Alnus acuminata* Kunth a distintos tratamientos (T1-T4) de fertilización de NPK. A) Bandas NIR+R., B) NDVI.

Fuente: Agualzaca D., 2021.

En la Figura 3-5, se presenta en el literal A; las fotografías en infrarrojo muestran los 3 tratamientos con distintas dosis de fertilizantes de NPK más un testigo y el literal B; con valores estimados de la frecuencia NDVI para cada píxel frente a la fijación de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en las plántulas *Alnus acuminata* Kunth con distintas dosis de fertilizantes de NPK más un testigo.

3.3.1. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 15 días

Para el primer análisis de la asimilación de NPK, de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo para determinar el índice NDVI. Se procedió a tomar las fotografías y su respectivo procesamiento y análisis a los 15 días después de la aplicación de las dosis de NPK en los distintos tratamientos.

Tabla 3-10: Prueba de Tukey al 5% para el análisis de asimilación de nutrientes de (NPK) de los tratamientos de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 15 días.

NDVI					
TRATAMIENTOS	Nº Plantas	Conjunto			
		1	2	3	4
TESTIGO	40	0,827625			
TRATAMIENTO 1	40		0,840950		
TRATAMIENTO 2	40			0,850275	
TRATAMIENTO 3	40				0,862600
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Fuente: Agualzaca D., 2021.

En la Tabla 3-10, se puede observar la prueba de medias de Tukey al 5% para los tratamientos donde existe cuatro grupos, siendo el tratamiento 3, quien tuvo mayor fijación de nutrientes con 0,862 a diferencia del testigo con valor de 0,82. Estadísticamente se observa diferencias significativas, es decir que alguno de los tratamientos si influyen en el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth*.

Del mismo modo Pérez (2018, pp. 50-55) después de aplicar fertilizantes a 5 especies forestales; *Pinus pseudostrobus* *Quercus rubra*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* e *Eucalyptus camaldulensis* determinó, que la prueba de media de Tukey al 5% fue superior a 0,05 de significancia por lo que acepta la incidencia de los fertilizantes en el vigor vegetal.

3.3.2. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 30 días

En el segundo análisis de la asimilación de NPK, de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo para determinar el índice NDVI. a los 30 días después de aplicar los fertilizantes. Se procedió a tomar las fotografías de cada una de las plántulas, posteriormente el procesamiento y análisis respectivo.

Tabla 3-11: Prueba de Tukey al 5% para el análisis de asimilación de nutrientes de (NPK) de los tratamientos de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 30 días.

NDVI					
TRATAMIENTOS	Nº Plantas	Conjunto			
		1	2	3	4
TESTIGO	40	0,829			
T1: NPK 10-30-10	40		0,862		
T2: NPK 15-15-15	40			0,870	
T3: NPK 18-46-0	40				0,882
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Fuente: Agualzaca D., 2021.

En la tabla 3-11, se muestran 4 grupos después de realizar prueba de rango múltiple Tukey al 5% de confiabilidad donde, los tratamientos muestran diferencias significativas, por lo tanto, se acepta que las plántulas *Alnus acuminata Kunth* manifiestan respuesta favorable a la nutrición de NPK en su vigor vegetal.

3.3.3. Resultado del análisis de la asimilación de nutrientes de (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 45 días

Finalmente se tomó de datos para el estudio de la asimilación de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) de las plántulas de *Alnus acuminata Kunth* a partir de un método no destructivo para determinar NDVI a los 45 días después de la aplicación de los fertilizantes de NPK.

Tabla 3-12: Prueba de Tukey al 5% para el análisis de asimilación de nutrientes de (NPK) de los tratamientos de *Alnus acuminata* Kunth a partir de un método no destructivo (NDVI) a los 45 días.

NDVI					
TRATAMIENTOS	N° Plantas	Conjunto			
		1	2	3	4
TESTIGO	40	0,835200			
T1: NPK 10-30-10	40		0,871725		
T2: NPK 15-15-15	40			0,878775	
T3: NPK 18-46-0	40				0,885463
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Fuente: Aguazaca D., 2021.

De la misma manera que en las dos evaluaciones anteriormente realizado en la tabla 3-12, se muestran 4 grupos después de realizar prueba de rango múltiple Tukey al 5% de confiabilidad, los tratamientos muestran diferencias significativas donde; el T3=0,88 correspondiente a la dosis de fertilizante NPK 18-46-0 mostró mejor resultado, mientras que el Testigo al que no se aplicó fertilizante en las tres evaluaciones no mostró variación alguna por lo tanto, se acepta que las plántulas *Alnus acuminata* Kunth manifiestan respuesta favorable a la nutrición de NPK en su vigor vegetal.

El ADEVA (ver ANEXO C, D y E) realizado en las tres evaluaciones indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y de acuerdo con la prueba de rango múltiple Tukey al 5%, el T3 presentó los mayores valores en las tres evaluaciones realizadas. Por lo tanto, se acepta que las plántulas *Alnus acuminata* Kunth manifiestan respuesta favorable a la nutrición de NPK en su vigor vegetal.

Tabla 3-13: Promedio de Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15, 30 y 45 días.

NDVI			
	E. 15 días	E. 30 días	E. 45 días
T1: NPK 10-30-10	0,841	0,862	0,876
T2: NPK 15-15-15	0,850	0,870	0,879
T3: NPK 18-46-0	0,863	0,882	0,886
Tratamiento 4	0,828	0,829	0,829

Fuente. Agualzaca D., 2021.

La evaluación realizada a partir de fotografías con infrarrojo a tres tratamientos más el testigo como se muestra en la Tabla 3-13, mostrando al T3: NPK 18-46-0 correspondiente a NPK 18-46-0 con promedio a los 45 días de 0,886 como el mejor tratamiento. Otra investigación realizada para determinar NDVI a partir de imágenes satelital Landsat 8 en latizales por (Mendoza et al., 2019: p. 5) a tres especies forestales; *Eucalyptus globulus L.* 0,819, *Pinus radiata* 0,795 *Alnus acuminata Kunth* 0,887 encontró valor similar por lo que se puede determinar que el método utilizado a partir de fotografías infrarroja es adecuado para evaluar la respuesta a la nutrición de NPK en su vigor vegetal.

3.4. Análisis comparativo para determinar la factibilidad en la aplicación de los métodos Índice Robustez e Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI)

Para determinar la factibilidad del tiempo se comparó el tiempo empleado para determinar el índice de robustez y el tiempo necesario para realizar el análisis del Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) detallada en el ANEXO A.

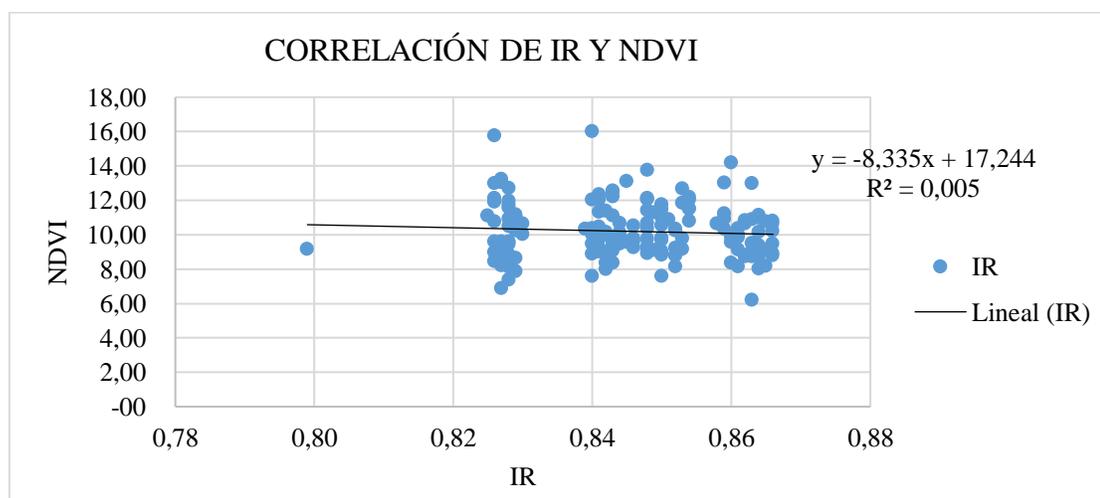
Las actividades como la fertilización de las plántulas, riego, la toma de datos dasométricas como; altura de la planta, DAC y la determinación del índice de robustez (IR) empleo un tiempo de 0,975 minutos/planta así mismo, las actividades para el análisis del índice NDVI están divididas en fertilización de las plántulas, riego, toma de fotografías en infrarrojo y el procesamiento de estas en software especializado, estas actividades emplearon 0,35 minutos aproximadamente en cada plántula.

Por lo tanto, el mejor método para determinar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth* tomando en cuenta el factor tiempo es el NDVI.

Para un mejor análisis de los dos métodos empleados en la determinación de vigor vegetal se realizó un cuadro comparativo los costos en la aplicabilidad de índice de robustez y el análisis del Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) ver ANEXO B.

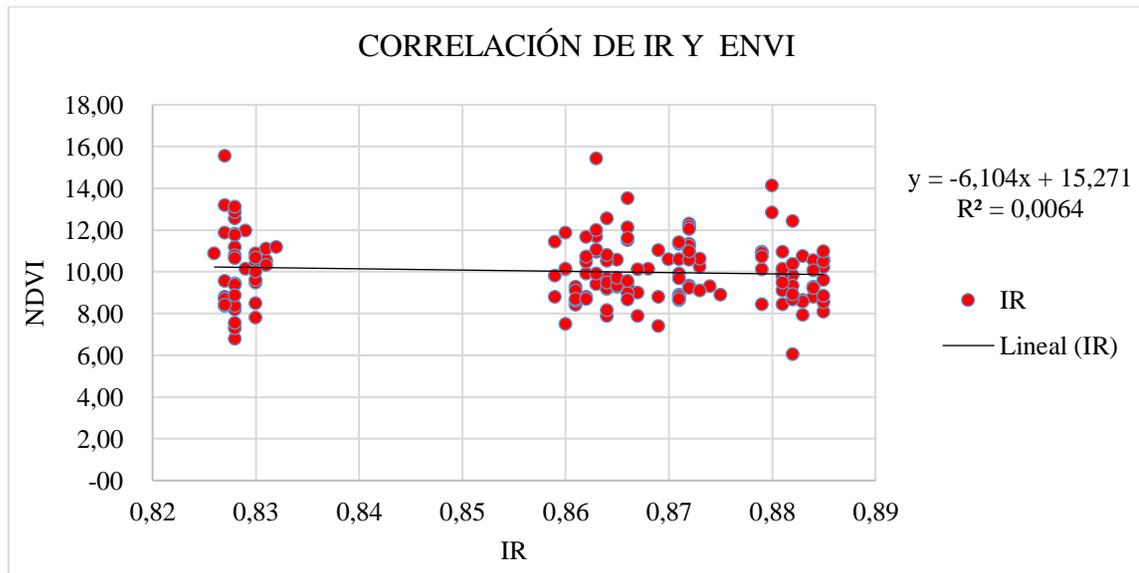
El análisis de costos para el determinar el Índice de Robustez (IR) y Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) se realizó en base a las actividades, materiales e insumos, equipos, técnico encargado para el análisis y el costo por cada plántula de *Alnus acuminata Kunth* donde se estableció que el costo para determinar el índice de robustez es \$5, 72 dólares/planta mientras tanto el costo referencial para determinar el índice normalizado diferencial de vegetación es \$ 8,18 dólares/planta estos costos son referenciales con la fecha y lugar donde se realizó la investigación por lo tanto, se puede mencionar que para el análisis del factor costo el mejor método es el índice de robustez en las 160 plantas evaluadas de manera individual. Sin embargo, estos costos y el método a utilizar deben estar enfocado de acuerdo con la magnitud del estudio es decir si se requiere evaluar a gran escala el mejor método es el análisis de fotografías en infrarrojo el cual ayuda a determinar el NDVI.

El análisis de correlación del Índice De Robustez (IR) con el Índice Normalizado Diferencial De Vegetación (NDVI) se realizó con los datos obtenidos de las tres evaluaciones.



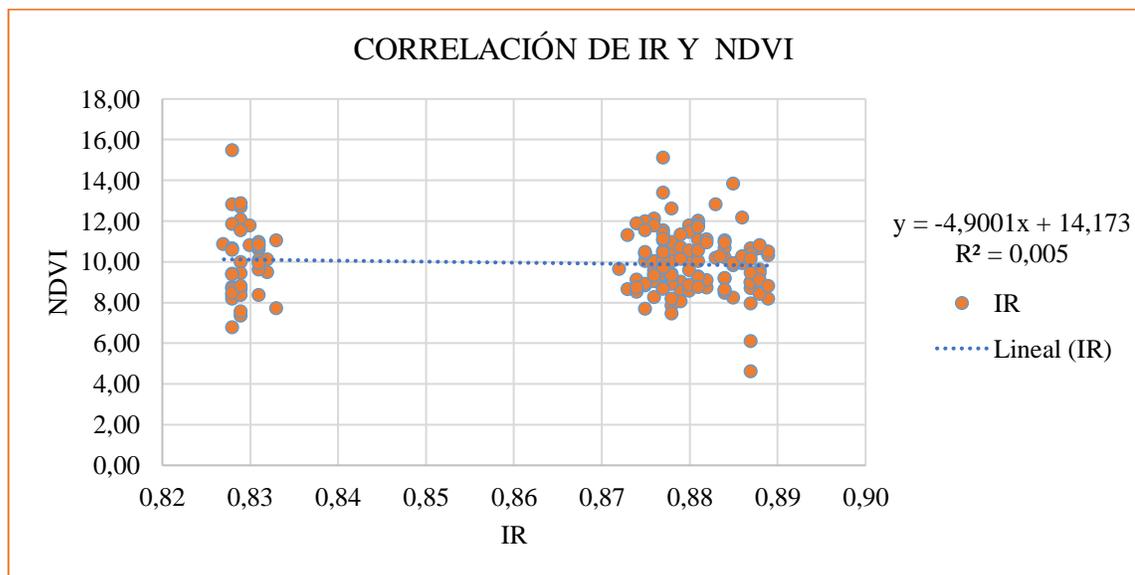
Gráfica 3-1 Correlación del Índice De Robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 15 días de aplicar los fertilizantes.

Fuente: Agualzaca D., 2021.



Gráfica 3-2 Correlación del Índice De Robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 30 días de aplicar los fertilizantes.

Fuente: Agualzaca D., 2021.



Gráfica 1-3 Correlación del Índice De Robustez (IR) y el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) a los 45 días de aplicar los fertilizantes.

Fuente: Agualzaca D., 2021.

El primer $R=0,07$, el segundo $R=0,08$ y el último obtenido $R=0,07$ por lo que se puede determinar que no existe correlación alguna entre el Índice De Robustez (IR) con el Índice Normalizado Diferencial De Vegetación (NDVI), para evaluar la respuesta de *Alnus acuminata* Kunth a la fertilización y su vigor vegetal, en las tres evaluaciones realizadas. Piña y Arboleda (2010, p. 63), mencionan que ningún atributo es decisivo por sí solo para determinar el vigor vegetal y coinciden con Rodríguez (2008) citado por (Ramos & Lombardi, 2020, p. 137), al recomendar el análisis de más de un atributo con fines de aceptación o rechazo de vigor vegetal de especies forestales. Por ende, se procedió a desarrollar las gráficas de correlación entre IR y NDVI con el fin de determinar la relación que existe entre los dos métodos estudiados para determinar el vigor vegetal de *Alnus acuminata* Kunth.

Según (Morales, 2018, p. 57), en las dos evaluaciones realizadas para determinar la calidad de planta de las especies *Eucalyptus camaldulensi*, *Gmelina arborea*, *Pinus pseudostrobus* y *Quercus rubra* producidas en los viveros forestales, el rango de tiempo empleado para dichas evaluaciones fue de 5 meses obteniendo los siguientes resultados; en la primera evaluación $R=0,160$ y la segunda evaluación mostro $R=0,975$. Otra investigación realizada para determinar la correlación entre el NDVI y las tasas de incremento diamétrico anual de las especies forestales *Bursera graveolens* y *Cedrela montana* en los años 2000 a 2010, al Sur del Ecuador mostró un valor de $R=0,826$ por ende se puede decir que existe alta correlación (Pucha, 2019: p. 58), mientras tanto en el presente estudio el tiempo empleado para las evaluaciones fue de 45 días obteniendo el valor más alto de $R=0,08$.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente se puede deducir que el índice de índice de robustez y el NDVI no tienen relación alguna, el factor preponderante para que no existe esta correlación está relacionado con el periodo de evaluación.

La deficiencia de nutrientes nitrógeno y potasio se manifiesta con clorosis en los folíolos, estado fitosanitario estudiado con el NDVI (Tinoco & Ramírez, 2014, p. 13) y la resistencia a las sequías, daños a la planta producido por el viento (Sáenz et al., 2014, p. 37) por ende se ven influenciado en su vigor vegetal.

Según lo mencionado anteriormente se puede decir que el índice de índice de robustez y el NDVI no tienen relación alguna, debido a que el índice de robustez se determina a partir de características dasométricas mientras que, el NDVI es analizado a partir de la reflectancia capturada en fotografías y analizado con software especializado.

CONCLUSIONES

- En la determinación del índice robustez estadísticamente no se encontró diferencias significativas entre los tratamientos en la aplicación tres dosis de fertilización para analizar el vigor vegetal *Alnus acuminata Kunth* (Aliso) sin embargo, a nivel numérico se evidenció que el tratamiento tres correspondiente a NPK 18-48-0 con $IR_{media} = 9,78$ mostró mejor respuesta en la fijación de nitrógeno, fósforo y potasio acercándose a los niveles óptimos $IR = 5$ a 6 , mientras tanto; en el testigo que no recibió ninguna dosis de fertilizante se evidenció el $IR_{media} = 10,18$ por lo que se determinó que el vigor vegetal se encuentra influenciado por la nutrición de la planta en vivero.
- La evaluación de la asimilación de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) a partir de fotografías tomadas en infrarrojo para determinar el índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) estadísticamente entre los tratamientos al término de la investigación se pudo observar que existe diferencias significativas estadísticamente al igual que en la prueba de medias de Tukey al 5% se pudo notar cuatro grupos lo que permitió corroborar que el tratamiento tres correspondiente a NPK 18-48-0 mostró los mejores resultados en la asimilación de nutrientes por ende en el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth* (aliso). El método utilizado en esta evaluación es poco estudiado para determinar el vigor vegetal en especies forestales no se puede encontrar metodología para analizar el vigor vegetal a partir de fotografías tomadas en infrarrojo con cámara digital convencional.
- Del análisis de factibilidad para el uso de los métodos IR y NDVI para determinar el vigor vegetal de *Alnus acuminata Kunth* se consideró el costo necesario y el tiempo empleado para las 160 plántulas y se puede concluir, que el método de índice de robustez IR emplea menos recursos económicos, mientras que el mejor método analizando el factor tiempo fue el método NDVI. Además, no existe correlación entre los métodos mencionado anteriormente debido a que el tiempo empleado fue muy corto entre las evaluaciones y porque utiliza parámetros dasométricos (altura y DAC) para el primer caso mientras que el NDVI es determinado a partir de la reflectancia de las hojas de *Alnus acuminata Kunth*.

RECOMENDACIONES

- El tiempo empleado en esta investigación para evaluar el vigor vegetal fue tres intervalos de quince días por lo que se recomienda para futuras evaluaciones prolongar el tiempo de dos a cuatro meses hasta un año.
- Las fotografías infrarrojas fueron tomadas al azar en el área foliar por lo que se recomienda especificar el área foliar ya sea apical o basal.
- Se recomienda expandir la investigación para determinar el vigor vegetal de las especies forestales nativas reproducidas en vivero con métodos no invasivos.
- A una escala mayor para determinar el vigor vegetal es conveniente emplear el método NDVI por ser un método no invasivo, por tener un potencial para aplicar semiautomatizado o automatizado, por brindar más información y ventajas, por ser una técnica relativamente fácil de aplicar.

GLOSARIO

NDVI: (Índice normalizado diferencial de vegetación). Los índices de vegetación son una combinación de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, etc., se trata de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales (Alonso, 2015).

Percepción remota: La percepción remota o teledetección es una herramienta que permite procesar información de la estructura del bosque y la biomasa aérea, ya que proporciona un medio práctico para evaluar espacialmente la biomasa forestal a nivel local, regional y global (Zheng et al., 2004: p. 406).

IR: El índice de robustez es un indicador de resistencia de la planta a los daños por viento, sequía, helada; es la relación entre diámetro del cuello de la raíz (DAC) medidos en milímetros y la altura de la planta en centímetro (Sáenz et al., 2014, p. 35).

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO, D. *NDVI: Qué es y cómo calcularlo con SAGA desde QGIS - MappingGIS.* [blog]. [Consulta: 1 agosto 2020]. Disponible en: <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>.

BARBAZÁN, M. *Análisis de plantas y síntomas visuales deficiencias de nutrientes.* Montevideo, 1998, pp. 1-27.

BROWN, S. & LUGO, A. "Bosques secundarios tropicales". *Revista de Ecología Tropical*, vol. 6, (1992), (Costa Rica), pp. 1-46.

CHAO, H. & CHEN, Y. *Detección remota y activación mediante vehículos no tripulados* [en línea], vol 3, Hoboken, New Jersey, Wiles, 2012.[Consulta: 28 noviembre 2020]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=daN8q5bGkIC&oi=fnd&pg=PR15&dq=CHAO,+H.,+Y.+CHEN.+2012.+Remote+sensing+and+actuation+using+unmanned+vehicles.+COLMAN,&ots=CvRP8N2StM&sig=g7GdXL5k5N8dFudlQHeyMwZwjig#v=onepage&q&f=false>.

CIENCIA AGRÍCOLA CULTIVANDO SOLUCIONES. Ficha Técnica NPK 10-30-10 . [en línea], 2019. [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: <http://gruposys.com.co/wp-content/mu-plugins/ficha-fertilizantes/26.-D-LAB-080-FICHA-TÉCNICA-NPK-10-30-10.pdf>.

EARTH OBSERVING SYSTEM. *NDVI.* [blog] [sin fecha]. [Consulta: 1 agosto 2020]. Disponible en: <https://eos.com/ndvi/es/>.

ESCAMILLA, N; et al. "Uso de fertilizantes de liberación controlada en plantas de teca (*Tectona grandis*), en la etapa de vivero". *Rev. Fitotec. Mex* [en línea], 2015, (México), vol. 38, no. 3, pp. 329-333. [Consulta: 16 febrero 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n3/v38n3a12.pdf>.

ESCOBAR, R. Estimación de la biomasa forestal de la sierra San Miguelito por medio de imágenes de satélite, (Trabajo de titulación). (Maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. IPICYT. 2016. San Luis Potosí, (México). [Consulta: 12 enero 2021]. <https://www.slp.gob.mx/segam/Documentos%20compartidos/LEGISLACI%C3%93N/ETF%20AN>

P%20Sierra%20San%20Miguelito%20versi%C3%B3n%20final%2020agosto2018.pdf

FERTIBERIA. ABONOS COMPLEJOS. NPK 4^a Actualización. [en línea], 2017, 4. (Madrid): [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: www.fertiberia.com.

FOODY, G; et al. "Relaciones predictivas de la biomasa de los bosques tropicales a partir de los datos de Landsat TM y su transferibilidad entre regiones". *Teledetección del Medio Ambiente*, vol. 85, no. 4 (2003) pp. 463-474. ISSN 00344257. DOI 10.1016/S0034-4257(03)00039-7.

HANES, J. *Aplicaciones biofísicas de la teledetección por satélite* [blog]. Londres: s.n. (2014) [Consulta: 1 agosto 2020]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-25047-7>.

HERNÁNDEZ, R. & PACHECO, R. Caracterización de síntomas visuales de deficiencias nutricionales en cardamomo (*Elettaria cardamomus*). *Agronomía Costarricense* [en línea], 1986, (Costa Rica), vol. 10, pp. 13-27. [Consulta: 24 enero 2021]. Disponible en: https://www.mag.go.cr/rev_agr/v10n01-2_013.pdf.

HUETE, A. "Un índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). Teledetección del medio ambiente". *Teledetección del medio ambiente* [en línea], vol. 25, (1998), (Estados Unidos), pp. 295-309. [Consulta: 1 agosto 2020]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/220040775>.

INEFARN. *Autoecología del Aliso*. [en línea], Quito-Ecuador, 2009 [Consulta: 1 agosto 2020]. Disponible en: <http://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/08/ALISO.pdf>.

INSTITUTO FORESTAL. *Caracterización de las plantas. Manual Viverización Nativa* [blog], [Consulta: 1 agosto 2020]. (2019), (Chile) pp. Disponible en: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26345>.

ISUSA. *NPK 15-15-15 Uso doméstico y huertas en granel*. [blog]. Quito-Ecuador, [sin fecha] [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: <http://isusa.com.uy/files/2016-04/informaci-n-triple-15-uso-dom-stico-y-huertas-a-granel.pdf>.

JACOBS, D; et al. "Endurecimiento. Manual de vivero para plantas nativas: una guía para viveros tribales". *Department of Agriculture, Forest Service* [en línea], 2019 (Estados Unidos). pp. 132-145

[Consulta: 28 julio.2020]. Disponible en:

https://www.fs.fed.us/rm/pubs_series/wo/wo_ah730/wo_ah730_217_227.pdf.

LEÓN, E. Modelación Matemática para Estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*Solanum spp.*) [en línea] (Trabajo de Titulación). (Maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Ecuador, 2017. pp. 1-202 [Consulta: 28 julio.2020]. Disponible en:

<http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4471>

LÓPEZ, H; et al. Método no destructivo para evaluar el vigor vegetal en especies forestales cultivadas en vivero. [en línea], 2016, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua: [Consulta: 28 julio 2020]. Disponible en: [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1765/1/Folio No E033 EXTENSO semana FAZ UJED.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1765/1/Folio%20No%20E033%20EXTENSO%20semana%20FAZ%20UJED.pdf).

MAE. *Sistema de clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*, [en línea]. Quito - Ecuador, 2019 . Disponible en: https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf

MATHER, P. & KOCH, M. *Procesamiento informático de imágenes de teledetección* [en línea] . Cuarta Edi. Boston: Wiley- Blackwell, 1997. [Consulta: 21 noviembre 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/5ee9/6e34e2c07b4c5be1f6b1a6d49ca9f97362a4.pdf>.

MENDOZA, B; et al. "Estudio biogénico de las emisiones de las especies *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus labill* y *Alnus acuminata* en el cantón Riobamba". *F1000Research* [en línea], 2019, (Ecuador). vol. 8, no. 1012222, pp. 1-18. [Consulta: 17 febrero 2021]. DOI 10.12688/f1000research.19255.1. Disponible en: <https://doi.org/10.12688/f1000research.19255.1>.

MENDOZA, Á; et al. Evaluación de la composición de especies aebóreas en bosque siempreverde piemontano de cordillera costera del Pacífico Ecuatorial.(Trabajo de Titulación) (Maestría). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Manabí-Ecuador. 2015. pp. 1- 120

MENGEL, K. & KIRKBY, E. *Principios de Nutrición vegetal* [en línea]. 4ta Edición. Basilea Suiza: Instituto Nacional de Potasa. 2009 [Consulta: 10 diciembre 2020]. Disponible en:

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59092073/276824282-Mengel-Principios-de-Nutricion-Vegetal20190430-127999-xfepar.pdf?1556646284=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMengel_Principios_de_Nutricion_Vegetal.pdf&Expires=1607646557&Signature.

MONÓMEROS. *Hoja de datos de seguridad del NPK 10-30-10.* [blog]. [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: <http://www.monmeros.com/descargas/hs10-30-10.pdf>.

MORALES, E. Indicadores de calidad de planta en viveros forestales del estado de Tamaulipas (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea], Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares-México 2018. [Consulta: 15 febrero 2021]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/15965/1/1080290166.pdf>.

MULLA, D. "Veinticinco años de teledetección en la agricultura de precisión: avances clave y brechas de conocimiento restantes". *Ingeniería de biosistemas* [en línea], 2013, (Estados Unidos) vol. 114, pp. 358-371. [Consulta: 28 noviembre 2020]. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.

NUTRICIÓN DE PLANTAS S.A. *Ficha Técnica DAP 18 – 46 – 0.* [blog]. [Consulta: 31 diciembre 2020]. Disponible en: <https://recintodelpensamiento.com/ComiteCafeteros/HojasSeguridad/Files/Fichas/FTDAPNutriplant201572174646.pdf>.

PENAGOS, C.; *El Aliso o Cerezo guías silviculturales.* [en línea]. Colombia 2009: [Consulta: 28 julio 2020]. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/aliso.pdf>.

PÉREZ, J. & MERINO, M. Definición de vigor - Qué es, Significado y Concepto. [en línea]. [Consulta: 16 septiembre 2020]. Disponible en: <https://definicion.de/vigor/>.

PETTORELLI, N: et al. "Usando el NDVI derivado de un satélite para evaluar las respuestas ecológicas al cambio ambiental". *Tendencias en Ecología y Evolución* [en línea], 2005 (Estados Unidos) vol. 20, no. 9, pp. 503-510. [Consulta: 28 julio 2020]. ISSN 01695347. DOI 10.1016/j.tree.2005.05.011. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16701427/>.

PIÑA, M. & ARBOLEDA, M. "Efecto de dos ambientes lumínicos en el crecimiento inicial y

calidad de plantas de *Crescentia cujete*". *Bioagro*, vol. 22, no. 1 (2010), (Venezuela) pp. 61-66.

PORTILLA, D. Propagación vegetativa del aliso (*Alnus acuminata H.B.K.*) utilizando dos tipos de sustrato en la parroquia La Esperanza. [en línea] (Trabajo de titulación)(Tecnólogo). Universidad Técnica del Norte, Ibarra-Ecuador, 2012. pp. 1-56 [Consulta: 1 agosto 2020]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/2119/1/03FOR003TESIS.pdf>.

PUCHA, F. Correlación entre el NDVI y el crecimiento anual de especies forestales al Sur del Ecuador. (Trabajo de Titulación)(Maestría). Universidad de Salzburg. Loja-Ecuador 2019. pp. 1-76

RAMOS, A. & LOMBARDI, F. "Calidad de plantas en un vivero de tecnología intermedia en Huánuco: Estudio de caso con *Eucalipto urograndis*". *Revista Forestal del Perú* [en línea], 2020 (Perú). vol. 35, no. 2, pp. 132-145. ISSN 2523-1855. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v35i2.1581>.

REVELO, S. Evaluación del crecimiento inicial de aliso (*Alnus acuminata H.B.K.*) en plantación sola y asociado con fréjol (*Phaseolus vulgaris*), arveja (*Pisum sativum L.*) con y sin fertilizante, provincia de Imbabura (Trabajo de titulación), (Grado) Universidad Técnica Del Norte. Escuela De Ingeniería Forestal Imbabura- Ecuador. 2007. pp. 1-11

ROMÁN, Y. La utilización de imágenes de Landsat TM para cuantificar áreas de deforestación en la región de Mato Grosso, Brazil. (Trabajo de titulación), (Grado)., Universidad de Puerto Rico, Departamento de Geología, Mayagüez- Puerto Rico. 2007. pp. 1-17

RUEDA, A; "Calidad de planta producida en los viveros forestales de Jalisco". *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. vol.3, 2012. México. pp. 70-82.

SÁENZ, J: "Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero «Morelia», estado de Michoacán". *Revista mexicana de ciencias forestales* [en línea], 2014, (México), vol. 5, pp. 98-111. [Consulta: 18 diciembre 2020], Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000600008.

SÁNCHEZ, M: et al. "EL ALISO (*Alnus acuminata H.B.K.*)". [en línea], 2009 (Colombia), vol. 10, pp. 299-309. [Consulta: 31 julio 2020]. Disponible en: www.corpoica.org.co.

CASTAÑEDA, S; et al. "Estimación de la concentración de clorofila mediante métodos no destructivos en vid (*Vitis vinifera* L.) cv. Riesling Becker". *CIENCIAS HORTÍCOLAS* [en línea], 2018, (Ecuador), vol. 12, no. 2, pp. 329-337. [Consulta: 18 septiembre 2020]. DOI 10.17584/rcch.2018v12i2.7566. Disponible en: <http://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7566>.

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. *¿Qué es y para qué sirve el fertilizante?* . [en línea], [Consulta: 31 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-es-y-para-que-sirve-el-fertilizante>.

TINOCO, J. & RAMÍREZ, O. Evaluación de la influencia de la fertilización en el vivero sobre la calidad de la planta de *Pinus oocarpa* Schiede y su desarrollo inicial en plantación [en línea] (Trabajo de titulación), (Doctorado). Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua, 2014. pp. 1-36. [Consulta: 16 febrero 2021]. Disponible en: <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnf04t591.pdf>.

TORRES, J., LÓPEZ, F. & PEÑA, A. "Configuración y especificaciones de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para el manejo temprano de malezas específico del sitio". *PLoS ONE* [en línea], 2013, (España), vol. 8, no. 3, pp. 1-15. DOI 10.1371/journal.pone.0058210. Disponible en: www.plosone.org.

TOVAR, O. & COGUA, J., 1990. "Síntomas de deficiencia de nutrimentos en aliso (*Alnus acuminata* H.B.K.)". *Agronomía Colombiana*, vol. 7, no. 1-2, (1990) (Colombia). pp. 89-94. ISSN 2357-3732.

VALENCIAGA, O. "La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes". *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* [en línea], 2006 (Cuba) vol. 40, no. 3, pp. 259-266. [Consulta: 18 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017723001.pdf>.

VILLALÓN, H; "Indicadores de calidad de la planta de *Quercus canby* Trel. (encino) en vivero forestal". *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 12, no. 1, (2016), (México). pp. 46-52.

ZHENG, D: et al. 2004." Estimación de la biomasa sobre el suelo utilizando datos de Landsat 7

ETM+ en un paisaje controlado en el norte de Wisconsin, EE.UU". *Teledetección del Medio Ambiente*, vol. 93, no. 3, (2004), (Estados Unidos), pp. 402-411. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2004.08.008.

ANEXO

ANEXO A: EL TIEMPO EMPLEADO PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE ROBUSTEZ Y EL ANÁLISIS DEL ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI).

ÍNDICE DE ROBUSTEZ				NDVI			
UNIDAD	CARACTERÍSTICAS	T. UNIT. (min)	T. TOTAL (min)	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS	T. UNIT. (min)	T. TOTAL (min)
1	Fertilización	30	30	1	Fertilización	30	30
4	Riego	10	40	4	Riego	10	40
160	Medición de altura de las plántulas	1	480	160	Tomas de fotografías	0,3	144
160	Medición del DAC de las plántulas	1	480	160	Procesamientos de fotografías	2	960
3	Tabulación de datos	45	135				
3	Procesamiento de datos	30	90				
Total		117	1255	Total		42,3	1174
Tiempo/planta (min/planta)		0,975	3,48	Tiempo/planta (min/planta)		0,35	3,26

Fuente: Agualzaca D., 2021

ANEXO B: ANÁLISIS DE LOS COSTOS EN LA APLICABILIDAD DE ÍNDICE DE ROBUSTEZ Y EL ANÁLISIS DEL ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN (NDVI).

	ÍNDICE DE ROBUSTEZ				NDVI			
	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS	C. UNIT. (\$)	C. TOTAL (\$)	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS	C. UNIT. (\$)	C. TOTAL (\$)
Equipo e instrumentos	1	Pie de rey o calibrador digital Vernier	\$109,00	\$109,00	1	Cámara digital SONY DSC HX400V	\$300,00	\$300,00
	1	Computador HP	\$500,00	\$500,00	1	Computador HP	\$500,00	\$500,00
	1	Cinta métrica	\$1,00	\$1,00	1	Filtro infrarrojo	\$50,00	\$50,00
Software	1	Licencia de Microsoft office 365	\$53,23	\$53,23	1	Licencia de Microsoft office 365	\$53,23	\$53,23
Software Investigador	1	Licencia de SPPS Statistics	\$99,00	\$99,00	1	Licencia de ArcMap	\$96,00	\$96,00
					1	Licencia de SPPS Statistics	\$99,00	\$99,00
					1	RStudios	\$60,00	\$60,00
	1	Técnicos capacitados analista de datos	\$100,00	\$100,00	1	Técnicos capacitados analista de datos	\$100,00	\$100,00
Mano de obra	6	Tres días en los 15,30, 45 días	\$40,00	\$240,00	3	Tres días en los 15,30, 45 días	\$40,00	\$120,00
Unidad experimental	160	Plántulas de <i>Alnus acuminata Kunth</i>	\$0,25	\$40,00	160	Plántulas de <i>Alnus acuminata Kunth</i>	\$0,25	\$40,00
Fertilizante	1	40 gramos de fertilizante NPK 10-30-10	\$0,30	\$0,30	1	40 gramos de fertilizante NPK 10-30-10	\$0,30	\$0,30
Fertilizante Otros	1	40 gramos de fertilizante NPK 15-15-15	\$0,30	\$0,30	1	40 gramos de fertilizante NPK 15-15-15	\$0,30	\$0,30
	1	40 gramos de fertilizante NPK 18-46-0	\$0,50	\$0,50	1	40 gramos de fertilizante NPK 18-46-0	\$0,50	\$0,50
	1	Otros	\$10,00	\$10,00	1	otros	\$10,00	\$10,00
TOTAL	\$913,58	\$1.153,33	TOTAL	\$1.309,58	\$1.429,33			
Costo/planta			\$5,71	\$7,21	Costo/planta		\$8,18	\$8,93

Fuente: Aqualzaca D., 2021

ANEXO C: ANOVA PARA EL ESTUDIO DE LA ASIMILACIÓN DE NUTRIENTES DE (NPK) DE LAS PLÁNTULAS DE *Alnus acuminata Kunth* A PARTIR DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO (NDVI) A LOS 15 DÍAS.

DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
F de V	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	Fo	Valor de P	P tabular
BLOQUES	0,000050	3	0,000017	1,080	0,360	>0,05
TRATAMIENTOS	0,02621	3	0,009	563,015	0,00	<0,05
Error	0,002	153	0,000016			
Total	114,371	160				

Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO D: ANOVA PARA EL ESTUDIO DE LA ASIMILACIÓN DE NUTRIENTES DE (NPK) DE LAS PLÁNTULAS DE *Alnus acuminata Kunth* A PARTIR DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO (NDVI) A LOS 30 DÍAS.

DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
F de V	Suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	Fo	Valor de P	P tabular
BLOQUES	0,000003	3	0,0000011	0,260	0,854	>0,05
TRATAMIENTOS	0,064	3	0,021	5137,315	0,000	<0,05
Error	0,000632	153	0,0000041			
Total	118,629	160				

Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO E: ANOVA PARA EL ESTUDIO DE LA ASIMILACIÓN DE NUTRIENTES DE (NPK) DE LAS PLÁNTULAS DE *Alnus acuminata* Kunth A PARTIR DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO (NDVI) A LOS 45 DÍAS.

DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
F de V	Suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	Fo	Valor de P	P tabular
BLOQUES	0,00001	3	0,000002	0,014	0,998	>0,05
TRATAMIENTOS	0,060	3	0,020	157,180	0,000	<0,05
Error	0,020	153	0,000			
Total	120,570	160				

Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO F: DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR DE *Alnus acuminata* Kunth.



Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO G: APLICACIÓN DE FERTILIZANTE DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO (NPK) PARA LA EVALUACIÓN DE VIGOR VEGETAL DE *Alnus acuminata* Kunth.



Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO H: TOMA DE DATOS DASOMÉTRICAS ALTURA Y DAC PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE ROBUSTEZ.



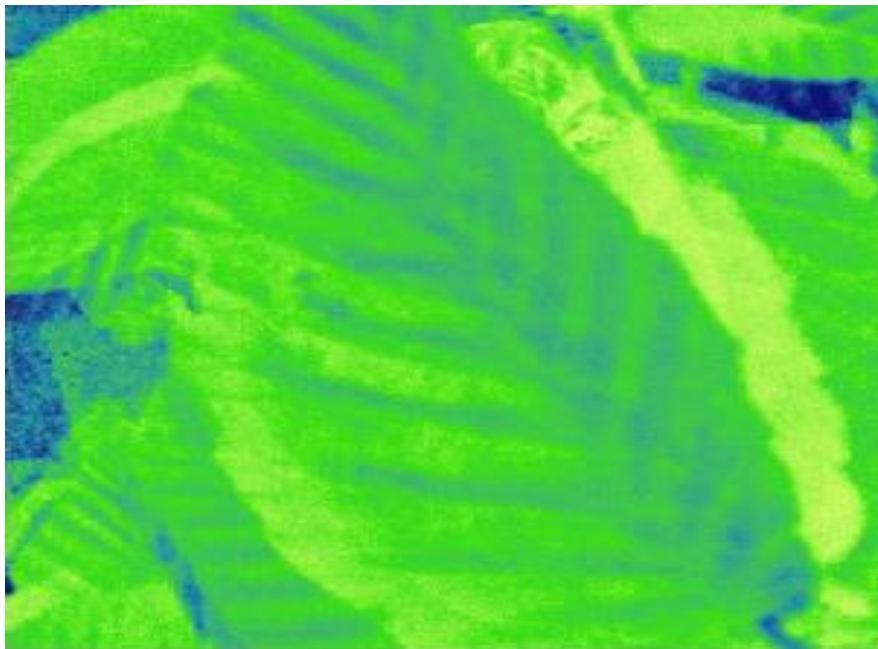
Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO I: FOTOGRAFÍA INFRARROJO CAPTURADO CON UNA CÁMARA DIGITAL SONY DSC HX400V CON SENSOR TIPO CMOS EXMOR R® DE 20.4 MEGAPIXELES ACOPLADO UN FILTRO ÓPTICO PARA OBTENER LAS BANDAS CORRESPONDIENTES R Y NIR.



Fuente: Agualzaca D., 2021.

ANEXO J: PROCESAMIENTO DE NDVI DE LA HOJA DE
Alnusacuminata Kunth.



Fuente: Agualzaca D., 2021.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 14 / 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>David Orlando Agualzaca Caisaguano</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Recursos Naturales</i>
Carrera: <i>Ingeniería Forestal</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Forestal</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.</i>

LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS
Firmado digitalmente por LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS
Nombre de reconocimiento (DN): cn=EC, i=RIOBAMBA, serialNumber=0602766974, cn=LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS
Fecha: 2021.10.14 08:54:18 -05'00'



1789-DBRA-UTP-2021