

IEM-I-17-05

***GESTIÓN DE LA VEGETACIÓN ALREDEDOR DE LOS SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA***

ELKIN MÉNDEZ ALMARIO

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

BOGOTÁ

2005

IEM-I-17-05

***GESTIÓN DE LA VEGETACIÓN ALREDEDOR DE LOS SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA***

ELKIN MÉNDEZ ALMARIO

Trabajo de Grado

Asesores

MARÍA TERESA DE TORRES

ÁLVARO TORRES

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

BOGOTÁ

2005

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	9
2.1 Tipos de mantenimiento.....	10
2.2 Mantenimiento eléctrico en los sistemas de distribución apoyado en la gestión de la vegetación.....	12
2.3 Mantenimiento actual de la vegetación en redes de distribución	13
2.3.1 Métodos de mantenimiento de la vegetación.....	13
2.4 Estándares para la limpieza alrededor de las líneas de distribución de potencia eléctrica.....	15
2.4.1 Factores que afectan dimensiones de la limpieza alrededor de la línea de potencia de distribución	16
2.4.2 Dimensiones del espacio de la separación entre la vegetación y las líneas de distribución de energía eléctrica.....	17
3. INDICADORES Y LEYES VIGENTES SOBRE LA CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO	20
3.1 Índices reguladores de calidad del servicio	21
3.2 Marco Jurídico para el manejo de la arborización y prácticas silviculturales en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá.....	25
3.2.1 Decreto de ley 1791 de 1996.....	25
3.2.2 Decreto Distrital 472 de Diciembre 23 de 2003	26
3.3 evaluación y seguimiento de la intervención sobre la cobertura arbórea en bogotá.....	32
4. DESCRIPCIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN	35
4.1 Equipos de protección en las redes de distribución	35
4.2 Protección de circuitos primarios.....	37
4.3 Redes de baja tensión.....	37
4.4 Aislamiento y protección contra sobretensiones.....	38
4.4.1 Propiedades estadísticas.....	39
5. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....	41
5.1 MODELO CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN.....	42
5.1.1 Aspectos generales.....	42
5.1.2 Modelos de crecimiento de la vegetación	43
5.1.3 Estimación de parámetros y pruebas estadísticas	51
5.1.4 Factores condicionantes	60

5.2 MODELO DE CONFIABILIDAD	70
5.3 MODELO DE COSTOS	74
5.3.1 Determinación del periodo de mantenimiento	74
6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA	76
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
8. BIBLIOGRAFÍA	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Dimensiones entre la vegetación y las líneas de distribución (1)	18
Figura 2.2 Dimensiones entre la vegetación y las líneas de distribución (2)	19
Figura 3.1 Tratamientos silviculturales período 1998-2002.....	32
Figura 3.2 Relación tala por especie.....	33
Figura 3.3 Resultados programa de arborización en Bogotá.....	34
Figura 5.1 Modelo gestión de la vegetación.....	41
Figura 5.2 Características fundamentales de la curva sigmoideo y su primera derivada	43
Figura 5.3 Curvas de crecimiento-índice de sitio (García).....	48
Figura 5.4 Crecimiento en altura (Eucalyptus).....	53
Figura 5.5 Crecimiento Altura Vs. Diámetro a altura de pecho (Eucalyptus).....	53
Figura 5.6 Prueba de autocorrelación-modelo 1 de crecimiento de altura	55
Figura 5.7 Prueba 2 de autocorrelación-modelo 1 de crecimiento de altura	56
Figura 5.8 Prueba de heteroscedasticidad-modelo 1 de crecimiento de altura.....	56
Figura 5.9 Prueba 2 de heteroscedasticidad-modelo 1 de crecimiento de altura.....	57
Figura 5.10 Precipitación media mensual.....	62
Figura 5.11 Valores medios de brillo solar multianuales	66
Figura 5.12 Radiación solar multianual.....	66
Figura 5.13 Valores multianuales de temperatura mínima mensual	68
Figura 5.14 Proceso de obtención de las probabilidades de falla	73
Figura 6.1 Flujograma metodología de validación.....	76
Figura 6.2 Evolución del crecimiento en altura.....	77
Figura 6.3 Evolución del crecimiento altura Vs. DAP	78
Figura 6.4 Evolución crecimiento área de copa Vs. DAP	78
Figura 6.5 Crecimiento especie 1 con tratamiento	79
Figura 6.6 Crecimiento estimado especie 2.....	80
Figura 6.7 Evolución de la probabilidad de falla – especie 1	80
Figura 6.8 Evolución de la probabilidad de falla – especie 2.....	81
Figura 6.9 Función de confiabilidad R(t) para la especie 1	82
Figura 6.10 Función de confiabilidad R(t) para la especie 2.....	82
Figura 6.11 Costos por unidad de tiempo CUT(A,t). Especie 1.....	83
Figura 6.12 Tiempos óptimos de mantenimiento. Especie 1.....	83
Figura 6.13 Costos por unidad de tiempo CUT(A,t). Especie 2.....	84
Figura 6.14 Tiempos óptimos de mantenimiento. Especie 2.....	84
Figura 6.15 Función tasa de fallas. Especie 1.....	85
Figura 6.16 Función tasa de fallas. Especie 2.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Dimensiones del espacio de separación entre la vegetación y las líneas de distribución (1)	17
Tabla 2.2 Dimensiones del espacio de separación entre la vegetación y las líneas de distribución (2)	17
Tabla 2.3 Dimensiones del espacio de separación entre la vegetación y las líneas de distribución (3)	18
Tabla 3.1 Valores máximos admisibles en calidad del servicio	22
Tabla 5.1 Datos de crecimiento del Eucalyptus	52
Tabla 5.2 Resultados regresión modelo 1 de crecimiento en altura	54
Tabla 5.3 Resultados regresión modelo 2 de crecimiento en altura	57
Tabla 5.4 Resultado regresión modelo 1 DAP	58
Tabla 5.5 Resultado regresión modelo 2 DAP	60
Tabla 5.6 Tipos suelo Bogotá	64
Tabla 6.1 Muestra crecimiento estimado para la especie 2	77
Tabla 6.2 Base de datos recomendada	79
Tabla 6.3 Resultado ajuste de curvas F(t)	81

1. INTRODUCCIÓN

Una de las causas principales de las interrupciones en el servicio de energía eléctrica es el contacto de los árboles y otro tipo de vegetación con las líneas de transmisión y distribución. Esta vegetación puede caer sobre la red eléctrica produciendo la caída de una o varias fases o puede crecer hasta tocar una de las fases y producir un corto circuito. Las grandes pérdidas por la suspensión del servicio eléctrico por éste tipo de fallas tanto para los usuarios como para las empresas distribuidoras de energía, justifican plenamente que las empresas gestionen el mantenimiento de la vegetación alrededor de los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica. La gestión de la vegetación permite a las empresas distribuidoras realizar programas de mantenimiento más eficientes y por lo tanto una mejor operación de sus activos, lo cual redundará en un mejor nivel de productividad y utilidad de las empresas.

En lo que respecta al mantenimiento, este se ha convertido en un tema de mucho interés en las empresas, ya que por ejemplo un mantenimiento por confiabilidad, no solo garantiza que se gestione adecuadamente sus activos, sino también va a ofrecer un servicio de mayor confiabilidad y seguridad. En general actualmente se manejan cinco tipos de mantenimiento: preventivo, correctivo, detectivo y predictivo. Un programa de mantenimiento preventivo permite ahorros debido al aumento de la vida o disponibilidad de servicio eficaz del sistema, por lo que el objetivo principal es reducir al mínimo el costo de interrupción o reducir al mínimo el tiempo que transcurre antes de iniciar la reparación del sistema.

La regulación y la competencia actual en el sector eléctrico exigen a los operadores de redes un eficiente planeamiento, expansión y operación de la red, de tal forma que ante las nuevas reglas que juzgan el funcionamiento financiero de las compañías de distribución, los servicios eléctricos deben cumplir con unos índices de confiabilidad (número de interrupciones y duración de éstas) y calidad del servicio, manteniendo bajos costos.

IEM-I-17-05

El modelo de gestión incluye una metodología para el mantenimiento preventivo en sistemas de distribución, referido al control, poda o levantamiento periódico que se realiza a la vegetación que existe sobre la servidumbre de las redes o líneas, mediante modelos matemáticos y financieros, de tal manera que se reduzca tanto la tasa de fallas ocasionadas por el contacto de la vegetación como el costo de esta actividad, teniendo en cuenta las variables relevantes, hipótesis consideradas y métodos de aplicación a casos con base en la aplicación al caso piloto.

2. MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El proceso actual de mantenimiento en las redes de distribución se lleva a cabo mediante dos etapas, las cuales son:

- Inspección
- Ejecución

La inspección consiste en una revisión del estado de la red eléctrica poste por poste, de tal forma que se tiene en cuenta la seguridad para quien esta cerca de las redes, y el deterioro de los materiales y equipos.

En la etapa de ejecución se realiza cada uno de los trabajos encaminados al mantenimiento de la red eléctrica, los cuales pueden realizarse con las redes energizadas o desenergizadas.

Mantenimiento en líneas energizadas: No se requiere la suspensión de energía a los usuarios, por lo que se utilizan técnicas a contacto y a distancia a cargo de cuadrillas de operarios. Dentro de los trabajos realizados en este tipo de mantenimiento se encuentra el blindaje de línea, tensionamiento de la red, cambios de cadenas de aisladores y conectores, y poda de la vegetación.

Blindaje de línea: Se presenta cuando existe algunos hilos del conductor sueltos y el tipo de mantenimiento correctivo consiste en incluir una nueva sección de cable y poncharlo en sus extremos para evitar que la red salga de funcionamiento por este punto.

Tensionamiento de la red y cambio de conectores: Consiste en reemplazar conectores quemados e incluir grapas de retención para evitar posibles salidas del sistema.

Limpieza de la red y poda de la vegetación: Se realiza cuando la red está presentando fallas transitorias por contacto con ramas de árboles o por objetos sobre el conductor, para lo cual se efectúa el retiro de objetos y la poda de la vegetación.

Mantenimiento en líneas desenergizadas: Para la realización de este tipo de mantenimiento se presentan cortes programados, para que de ésta manera se cumplan los trabajos como

cambio de conectores de la red, mantenimiento de las protecciones del transformador, cambio de crucetas del transformador y poda de la vegetación.

El tipo de cortes se realiza por medio de seccionamientos en la línea estableciendo un juego de posibilidades con las cuchillas para cada uno de los circuitos, de tal manera que si existe un cliente servido por un circuito, pueda llegar a ser servido por otro circuito cercano y así evitar la suspensión del servicio y los elevados costos de compensación.

2.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento se define como cualquier acción que restaura unidades o sistemas en falla a una condición de operación o conserva unidades en condiciones de operación. Cuando un sistema o un componente se pueden reparar es un sistema o componente reparable. Para estos sistemas reparables, el mantenimiento desempeña un papel vital en la vida de un sistema, afecta su confiabilidad, su disponibilidad, su tiempo muerto, su costo de operación, etc.

El mantenimiento que se realiza a los sistemas de distribución y específicamente los debidos a la vegetación se refiere a sistemas reparables, ya que en el momento que una red o línea dejan de suministrar el servicio de energía eléctrica debido al crecimiento o caída de la vegetación sobre la red el servicio después de un tiempo puede ser restaurado. Estas acciones del mantenimiento se pueden dividir en dos tipos: mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo.

- **Mantenimiento preventivo.** El mantenimiento preventivo es la práctica de sustituir componentes o subsistemas antes de que el sistema deje de operar en forma continua. La frecuencia para realizar el mantenimiento preventivo se basa en la observación del último comportamiento del sistema y en el conocimiento de los componentes el cual es vital para la operación de sistema en forma continua. El costo es siempre un factor importante para programar el mantenimiento preventivo. En muchas circunstancias, es financieramente más sensible sustituir las piezas o los componentes que no han

fallado en los intervalos de tiempo predeterminados que esperar la falla del sistema, el cual puede dar lugar a una operación costosa debida a las interrupciones.

Una idea falsa sobre mantenimiento preventivo es que es demasiado costoso. Esta idea explica que cuesta más programar el mantenimiento que lo que cuesta hacer funcionar un sistema cuando este ha fallado. Sin embargo, se debe comparar no solamente los costos sino las ventajas y los ahorros a largo plazo asociados a mantenimiento preventivo. Sin mantenimiento preventivo, por ejemplo, los costos por la interrupción no programada del sistema también deben ser incluidos. Por otro lado, el mantenimiento preventivo permite ahorros debido al aumento de la vida de servicio eficaz del sistema.

- **Mantenimiento correctivo.** El mantenimiento correctivo es la acción de restaurar un sistema en falla al estado de operación. Esto implica generalmente el sustituir o reparar un componente o un subsistema que sea responsable de la falla total del sistema. Tal mantenimiento se realiza en los intervalos imprevisibles, ya que el tiempo de falla de un componente no es conocido a priori. El objetivo del mantenimiento correctivo es restaurar el sistema para que opere en forma satisfactoria dentro del tiempo más corto que sea posible. El mantenimiento correctivo se realiza típicamente en tres pasos:

1. **Diagnóstico del problema:** Se debe tomar tiempo para establecer las piezas falladas o para determinar de otra manera la causa del falla del sistema en forma satisfactoria.
2. **Reparación y/o reemplazo de componentes en falla:** Una vez se ha determinado la causa de falla del sistema, la acción que se debe tomar para arreglar la causa, es generalmente la sustitución y/o reparación de los componentes que hicieron fallar al sistema.
3. **Verificación de la acción de reparación.** Una vez que los componentes se han reparado o sustituido, se debe verificar que el sistema quede funcionando en forma adecuada.

Para el modelo de gestión de vegetación y confiabilidad en sistemas de distribución y transmisión el mantenimiento correctivo se refiere a podar o levantar la vegetación que hay sobre la red que produjo la interrupción del servicio, mientras que el mantenimiento preventivo se refiere a la poda u observación periódica que se realiza a la vegetación que existe sobre la servidumbre de las redes o líneas para evitar la interrupción del servicio en forma desprevénida.

Además de los ya mencionados existe también otros dos tipos de mantenimiento: mantenimiento detectivo y predictivo.

- **Mantenimiento detectivo.** Conjunto de tareas diseñadas para realizar verificaciones funcionales o tareas para encontrar fallas. El mantenimiento detectivo se aplica solo a fallas ocultas, las cuales sólo afectan elementos de seguridad o protección.
- **Mantenimiento predictivo.** Se refiere a tareas que involucran revisiones o verificaciones siempre y cuando algo (falla potencial) indique que ocurrirá una falla funcional.

2.2 MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN APOYADO EN LA GESTIÓN DE LA VEGETACIÓN

Uno de los aspectos que ha tomado mayor relevancia para mejorar la eficiencia de una compañía es el mantenimiento, debido a que este significa la protección de inversiones y la garantía y seguridad de un servicio. El mantenimiento es una estrategia efectiva para mejorar el funcionamiento financiero de la compañía, dando como resultado la transformación del mantenimiento en programas de gestión, cuyos resultados se miden y reconocen a través de unos indicadores de gestión que están basados en los siguientes aspectos:

- Incremento de la confiabilidad
- Costo de mantenimiento relacionado con la confiabilidad.
- Incremento en la eficiencia tanto en la operación a máxima capacidad, como en el uso eficiente de la energía.
- Incremento de la vida útil de los activos de la empresa.

La función del mantenimiento a partir de los índices anteriores, es buscar una máxima disponibilidad del suministro eléctrico, a través de la disminución de la tasa de fallas en el sistema de distribución ocasionada por la vegetación. Los mantenimientos preventivos y predictivos apuntan tanto a la eliminación del tiempo perdido como a la prolongación de la vida útil de los activos de la empresa, de tal manera que se reducen los costos del mantenimiento al evitar gastos de reparación innecesarios.

2.3 MANTENIMIENTO ACTUAL DE LA VEGETACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Para evitar interrupciones en el suministro de energía eléctrica que son causados por el crecimiento o caída de la vegetación alrededor de las redes de distribución, las empresas utilizan varios métodos de control o remoción de la vegetación, de tal forma que sea ambientalmente seguro. La meta de los programas de mantenimiento de la vegetación es proveer seguridad en los servicios de transmisión y distribución de energía eléctrica, y minimizar las interrupciones causadas por árboles u otro tipo de vegetación, mientras mantiene una armoniosa relación con el ambiente.

2.3.1 Métodos de mantenimiento de la vegetación

Existen diferentes métodos para el control de la vegetación alrededor de las líneas de distribución de energía. Los métodos se pueden agrupar en mecánicos y químicos (herbicidas).

Los métodos mecánicos pueden parecer los menos dañinos para el control de la vegetación, y en realidad estos métodos tienen muchas desventajas. Por ejemplo, la poda de la vegetación requiere de una frecuente repetición, lo cual puede resultar bastante costoso para la compañía. A continuación se presentan algunos métodos o herramientas para el control de la vegetación.

Trabajo manual: El trabajo de manual implica a individuos usando las herramientas mecánicas para podar o para quitar malas hierbas, o árboles indeseables. Las plantas

individuales se pueden seleccionar y quitar usando las palas, las sierras, las hachas, u otras herramientas. Este método es muy selectivo y tiene generalmente poco impacto negativo en el ambiente.

El trabajo de mano es, sin embargo, la herramienta más costosa para el mantenimiento de la vegetación. Algunas herramientas manuales presentan un riesgo significativo de lesión a menos que entrenen a los operadores correctamente para seguir procedimientos de seguridad.

Corte: El corte de la vegetación en el nivel del suelo es un tratamiento intenso, que debe realizarse cuando las reservas del alimento en las raíces son las más bajas, para minimizar la cantidad de alimento disponible para producir los brotes nuevos o retoños. Cualquier retoño que se desarrolle se debe quitar cuanto antes, y el retiro continuo debe ser practicado hasta que ninguno brote nuevo se produzca.

Cerco (“Girdling”): Es el proceso de cortar un a árbol a través de la capa de la corteza en anillo. Esto inhibe el movimiento del agua y de los alimentos entre las raíces. El método es el más eficaz durante los meses del verano y es práctico para los árboles grandes.

Cavadura: Consiste quitar las raíces de las plantas. La operación es difícil y desperdiciadora de tiempo, pero eficaz si se realiza correctamente. Se alcanzan los mejores resultados cuando las raíces se quitan con la planta incluida.

Quema: La quema controlada es uno de los medios eficaces para controlar malas hierbas, sin embargo, la quema es la segunda herramienta más costosa. Con el humo puede generar un peligro del tráfico a lo largo de los caminos y puede plantear un riesgo de incendios a la vegetación adyacente. Puede ser necesario quemarse de vez en cuando plantaciones nativas de la hierba de la pradera para mantenerlas como la vegetación primaria. Antes de conducir una quemadura controlada, se debería hacer contacto con autoridades locales para informarles la quemadura y, si está requerido, obtener cualquier permiso necesario.

Poda: Es la herramienta de tradicional de muchas empresas. Da un aspecto uniforme y se puede utilizar para controlar el crecimiento y la reproducción de la mayoría de las plantas.

La sincronización de la poda es muy importante, a tal punto que la frecuencia con que se debería hacer varía con la especie, el clima, y el equipo disponible.

Herbicidas: Los herbicidas son otra herramienta disponible que ayuda a manejar la vegetación indeseable. Pueden ser utilizados para complementar otras medidas de control. Cuando se hace la comparación con los métodos mecánicos, los herbicidas son a menudo más económicos. Sin embargo, los factores tales como proximidad a la vegetación sensible, las ciudades, el agua de tierra o superficial, tipo y condición del equipo disponible del uso, y las ordenanzas y las restricciones locales del pesticida deben ser considerados para decidir si se utilizan los herbicidas. A veces los medios más baratos del control pueden no ser la opción apropiada. Sin embargo, el uso apropiado del producto, en la tarifa y el tiempo apropiados, cuando está aplicado correctamente, puede de hecho ser la opción derecha a hacer. Los herbicidas y los reguladores de crecimiento se utilizan químicamente para controlar o para retardar la especie de una planta.

2.4 ESTÁNDARES PARA LA LIMPIEZA ALREDEDOR DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA

Los principales determinantes para la limpieza de las líneas de distribución de energía eléctrica son la protección al público contra incendios y el aseguramiento de la continuidad y confiabilidad del sistema de distribución. Por consiguiente, el espacio de limpieza que se crea alrededor de las líneas variará dependiendo de la categoría del riesgo de incendios en determinada área donde se sitúa la línea distribución de potencia y de factores asociado al tipo de línea de distribución instalado.

Se tienen dos categorías para las cuales se han aplicado diferentes dimensiones de espacio de limpieza alrededor de la línea de distribución:

1. Áreas de riesgo bajo a moderado (Sector urbano)
2. Áreas de riesgo alto a muy alto (Sector rural)

2.4.1 Factores que afectan dimensiones de la limpieza alrededor de la línea de potencia de distribución

Las dimensiones de espacio de separación entre la vegetación y la línea tienen factores dependientes asociados al tipo de la línea de potencia, dentro de los cuales se encuentran:

- Línea de distribución de voltaje: El nivel de voltaje influencia el potencial para la descarga eléctrica. Entre más alto sea el voltaje mayor es el potencial y por lo tanto la necesidad de un mayor espacio de la separación.
- Tipo de línea de distribución: Conductores aisladores reducen el riesgo de descargas eléctricas. Al usar cable blindado u otro tipo de conductores aisladores se reduce las dimensiones de espacio de limpieza de vegetación alrededor de la línea de distribución.
- Distancia entre los postes: Mientras que la longitud entre postes aumenta, el peso agregado de los conductores de energía eléctrica crece, de tal forma que produce mayor decaimiento de la línea. Las líneas de distribución de energía eléctrica pueden moverse con el viento con una mayor facilidad, por lo tanto, todas las dimensiones del espacio de la separación deben ser mayores mientras que la longitud entre los postes aumenta.
- Tamaño del conductor: El tamaño de un conductor afecta su peso y por lo tanto la cantidad que cederá el conductor. Los conductores pueden moverse con vientos fuertes, por lo tanto, el espacio de la separación entre la línea y la vegetación necesitan aumentar mientras que el tamaño del conductor aumenta.
- Distancia a lo largo de los conductores de la línea de distribución: A lo largo de los conductores la caída más grande de la línea ocurre a mitad de la distancia entre los postes. Por lo tanto, las dimensiones del espacio de la separación entre la vegetación y la línea deben ser mayores en la región del centro que cerca del poste.

2.4.2 Dimensiones del espacio de la separación entre la vegetación y las líneas de distribución de energía eléctrica

a) Las dimensiones del espacio de la separación en áreas de bajo a moderado riesgo de fuego y en áreas de alto a muy alto riesgo de fuego para alto y bajo voltaje en las líneas de distribución construidas con cable blindado son presentadas en la Tabla 1. Las dimensiones para áreas de bajo a moderado riesgo de fuego con cable blindado se presentan en la columna 1 de la Tabla 2.1.

b) Las dimensiones del espacio de la separación para áreas de bajo a moderado riesgo de fuego y para las áreas de alto a muy alto riesgo de fuego construidas con otro material diferente al cable blindado están dadas en la Tabla 2.2 y en la Tabla 2.3 respectivamente.

Tabla 2.1 Dimensiones del espacio de separación entre la vegetación y las líneas de distribución (1)

Tipo de línea de potencia	Espacios entre vegetación y la línea / punto de máxima combadura			
	En poste	Lejos de poste		
	Columna 1	Columna 2 < 40m	Columna 3 40-70m	Columna 4 70-100m
	En todas las direcciones			
Cable aéreo blindado	0.3m	0.5m	0.5m	0.7m
Cable aislado	0.5m	0.6m	1.0m	-

Tabla 2.2 Dimensiones del espacio de separación entre la vegetación y las líneas de distribución (2)

Tipo de línea de potencia y conductor	Espacios entre vegetación y la línea / punto de máxima combadura							
	En poste	Lejos de poste						
	Columna 1	Columna 2 < 40m	Columna 3 40-70m	Columna 4 70-100m		Columna 5 100-150m		Columna 6 >150m
	Vert. y Horiz.	Vert. y Horiz.	Vert. y Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.
Desnudo Bajo voltaje	1.0m	1.0m	1.5m	1.5m	2.5m	1.5m	3.5m	2.0m
Desnudo alto voltaje	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	2.0m	2.0m	2.0m	2.0m
	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	2.5m	2.5m	2.5m	3.5m
	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	3.0m	3.0m	2.5m	4.5m

Tabla 2.3 Dimensiones del espacio de separación entre la vegetación y las líneas de distribución (3)

Tipo de línea de potencia y conductor	Espacios entre vegetación y la línea / punto de máxima combadura								
	En Poste	Lejos de poste							
	Columna 1	Columna 2 < 40m	Columna 3 40-70m		Columna 4 70-100m		Columna 5 100-150m		Columna 6 >150m
	Vert. y Horiz.	Vert. y Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Horiz.
Desnudo Bajo voltaje	1.0m	1.5m	1.5m	2.0m	1.5m	2.5m	1.5m	3.5m	2.0m
Desnudo alto voltaje	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	2.0m	2.0m	2.0m	2.0m	2.5m
	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	2.5m	2.5m	2.5m	3.5m	2.5m
	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	3.0m	3.0m	2.5m	4.5m	2.5m

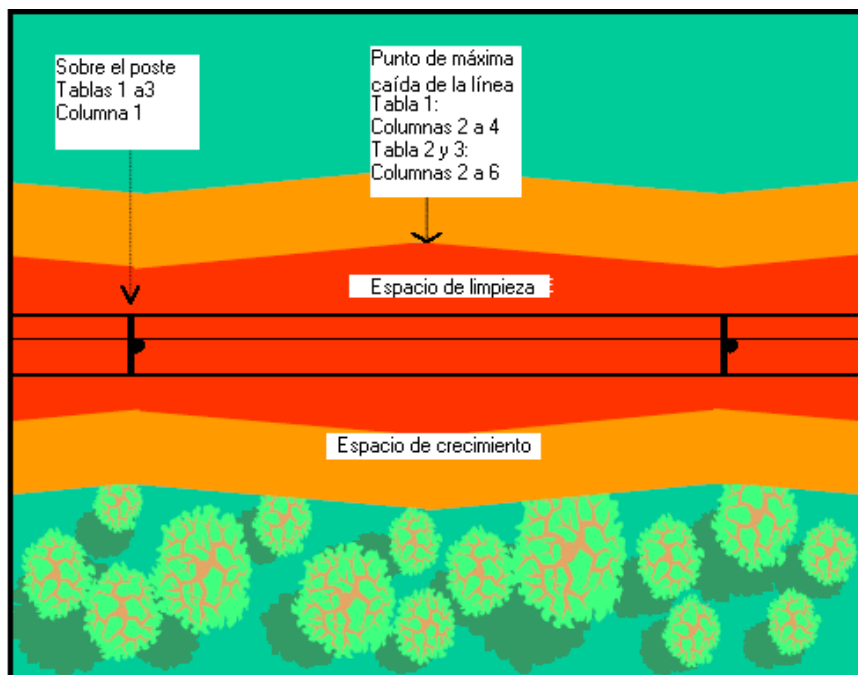


Figura 2.1 Dimensiones entre la vegetación y las líneas de distribución (1)

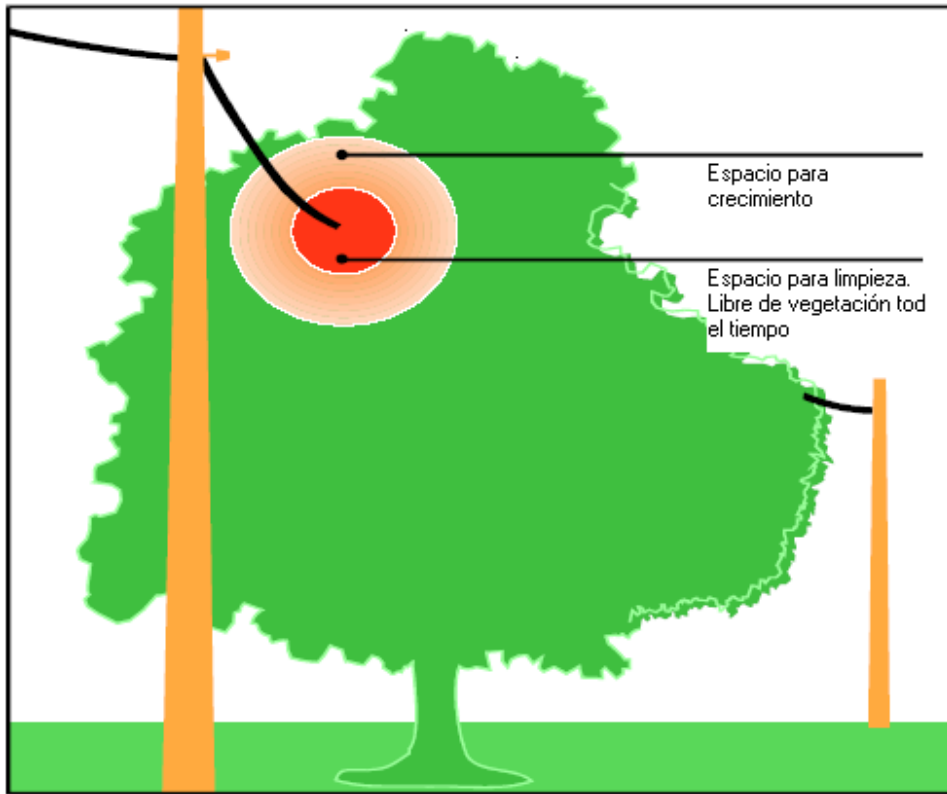


Figura 2.2 Dimensiones entre la vegetación y las líneas de distribución (2)

3. INDICADORES Y LEYES VIGENTES SOBRE LA CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO

En éste capítulo se presentará el reglamento establecido actualmente para medir la calidad del servicio que prestan los operadores de red, creados por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

En 1998 la CREG mediante resolución 070 estableció el reglamento de distribución de energía eléctrica en el que se presenta, entre otros, la forma de calcular los índices de medición de calidad, los límites máximos permitidos y las sanciones aplicadas a los agentes que no cumplan con éstos parámetros.

Como primera medida es importante establecer la clasificación de los diferentes tipos de interrupciones a partir de su duración:

- Instantáneas: Suspensiones del servicio cuya duración es inferior a o igual a un (1) minuto.
- Transitorias: Suspensiones del servicio cuya duración es superior a un (1) minuto y menor o igual a cinco (5) minutos.
- Temporales: Suspensiones del servicio cuya duración es mayor a cinco (5) minutos.

Para el cálculo de los indicadores que se definirán más adelante no tendrán en cuenta las siguientes interrupciones:

- Interrupciones por racionamiento de emergencia o programadas del sistema eléctrico nacional o en generación y en el sistema de transmisión nacional.
- Interrupciones con duración igual o menor a 3 minutos. A partir del inicio del año 3 del periodo de transición (2002) no se tendrán en cuenta las interrupciones con duración igual o inferior a un minuto.
- Eventos programados debidos a trabajos de expansión del nivel de tensión 4.

3.1 ÍNDICES REGULADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO

El reglamento de distribución define los siguientes índices para regular la calidad del servicio:

- Índice de frecuencia equivalente de las interrupciones del servicio a nivel de circuito (FES): Mide la confiabilidad de un sistema de transmisión como el número de interrupciones que presenta un circuito en un periodo de tiempo.

$$FES_{\text{circuito}} = \sum_{i=1}^{\text{Total de circuitos}} \text{Interrupciones}_i$$

- Índice de duración equivalente de las interrupciones del servicio a nivel de circuito (DES): Es el tiempo total, medido en un periodo de tiempo, en el que el servicio es interrumpido en un circuito.

$$DES_{\text{circuito}} = \sum_{i=1}^{\text{Total de circuitos}} t(i)$$

Desde el punto de vista del operador de red, el indicador DES está relacionado con la operación del sistema y depende de los recursos humanos y materiales existentes para recuperar el sistema después de cada interrupción. El indicador FES está relacionado con la estructura del sistema como de sus protecciones y representa la situación de la empresa en cuanto a inversión y mantenimiento, caracterizando la vulnerabilidad del sistema frente al medio ambiente.

Desde el punto de vista del usuario el indicador FES representa el costo fijo de tener el servicio interrumpido, independientemente de su duración. El indicador DES representa un costo variable por la repercusión en sus actividades comerciales.

Los criterios que se deben cumplir en el proceso de planeamiento de la red de distribución respecto de la calidad del servicio están establecidos por la CREG mediante la resolución CREG070-98 y sus modificaciones correspondientes¹.

Los indicadores son definidos así:

¹ CREG089-99, CREG043-2000, CREG058-2000, CREG074-2000 y CREG096-2000.

- a) Indicador de Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio (DES) es el tiempo total, medido sobre los últimos doce (12) meses, en que el servicio es interrumpido en un Circuito. Se deberá calcular el Indicador DES_c mensualmente para cada Circuito, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DES_c = \sum_{i=1}^{NTI} t(i)$$

Donde:

DES_c: Sumatoria del Tiempo en horas de las interrupciones del servicio en un Circuito, durante los últimos doce (12) meses.

i: Interrupción i-ésima.

t(i): Tiempo en horas de la interrupción i-ésima.

NTI: Número Total de Interrupciones que ocurrieron en el Circuito durante los últimos doce (12) meses.

- b) Indicador de Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio (FES). Mide la confiabilidad de un STR y/o SDL como el número de interrupciones que presenta un Circuito durante los últimos doce (12) meses. Se deberá calcular el Indicador FES_c mensualmente para cada Circuito, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$FES_c = NTI$$

Donde:

FES_c: Sumatoria del número de veces que el servicio es interrumpido en un Circuito, durante los últimos doce (12) meses.

La otra variable mantiene el mismo significado que en la expresión anterior.

Los Valores Máximos Admisibles anuales, para los indicadores de calidad del servicio se presentan en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Valores máximos admisibles en calidad del servicio

GRUPO (1)	AÑO 2001		AÑO 2002	
	DES (horas)	FES	DES (horas)	FES
1	19	38	11	26
2	29	58	19	44
3	39	68	29	51
4	61	84	39	58

Grupo 1: Circuitos ubicados en cabeceras municipales con una población superior o igual a 100,000 habitantes, según el DANE.

Grupo 2: Circuitos ubicados en cabeceras municipales con una población menor a 100,000 habitantes y superior o igual a 50,000 habitantes, según el DANE.

Grupo 3: Circuitos ubicados en cabeceras municipales con una población inferior a 50,000 habitantes, según el DANE.

Grupo 4: Circuitos ubicados en suelo que no corresponden al área urbana del respectivo municipio o distrito, según el DANE.

- **Compensación a usuarios y penalizaciones:** El comercializador deberá calcular el valor a compensar para cada uno de sus usuarios, dentro de los 25 primeros días calendario del mes siguiente a la finalización de cada uno de los trimestres en los cuales se evalúan los indicadores de calidad. Las compensaciones se calculan de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$CComp = \left[SI(DES > DESlim, (DES - DESlim) \times CRO1, 0) + SI(FES > FESlim, (FES - FESlim) \times DES / FES \times CRO1, 0) \right]$$

FESlim: FES límite

DESlim: DES límite

CRO1: Costo de racionamiento

El comercializador hará efectiva las compensaciones y en cada pago que realice al operador de red, descontará los valores compensados durante el periodo en el cual se están liquidando dichos cargos. El incumplimiento de los indicadores FES y DES a un usuario conectado a un sistema de distribución local, cuando en la cadena de prestación del servicio participan dos o más operadores de red, la responsabilidad de cada operador de red, en las compensaciones por el incumplimiento de los indicadores, será proporcional a la participación de sus interrupciones en cada indicador. Cada operador de red compensará directamente a los usuarios y operadores de redes conectados directamente a su sistema y facturará al operador de red aguas arriba su participación en dichas compensaciones.

Indicadores comparables internacionalmente:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index): Es el promedio de interrupciones de un cliente del sistema. Este indicador es aplicable a todos los niveles de tensión.

$$SAIFI = \frac{(\text{Numero total de interrupciones a usuarios})}{(\text{Numero total de usuarios})} = \frac{\sum N_i}{N_T}$$

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index): Es el tiempo que el cliente medio ha estado sin servicio en el periodo considerado. Aplicable a todos los niveles de tensión.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Duracion de las interrupciones a los usuarios}}{(\text{Numero total de usuarios})}$$

- ASAI (Average Service Availability Index): Mide el número promedio de horas que fueron suministradas en un año.

$$ASAI = \frac{\text{Horas totales de energia suministrada}}{\text{Horas totales de energia demandada}} \times 100$$

- CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index): Frecuencia de interrupciones que padecen los clientes interrumpidos del sistema, permite caracterizar la importancia de los problemas de grupo de clientes afectados por interrupciones y comparado año a año las tendencias de mejora o empeoramiento.

$$CAIFI = \frac{\text{Numero total de interrupciones}}{\text{Numero total de clientes afectados}}$$

- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index): Representa la duración media de una interrupción a un cliente. Este indicador no toma en cuenta el hecho de que una interrupción puede tener distintas duraciones para distintos clientes.

$$CAIDI = \frac{\text{Suma de las duraciones sin interrupciones}}{\text{Numero total de interrupciones}}$$

- ASIDI (Average System Interruption Duration Index): Representa el tiempo equivalente en horas de haber interrumpido a toda la potencia conectada. Se calcula para cada región esperando interrupciones previstas e imprevistas.

$$ASIDI = \frac{\text{Potencia conectada interrumpida (kVA)} \times \text{horas interrumpidas}}{\text{Potencia total conectada}}$$

- ASIFI (Average System Interruption Frequency Index): Representa el número de interrupciones de toda la potencia conectada equivalente.

$$ASIFI = \frac{\text{Potencia conectada interrumpida (kVA)} \times \text{Numero de interrupciones}}{\text{Potencia total conectada}}$$

3.2 MARCO JURÍDICO PARA EL MANEJO DE LA ARBORIZACIÓN Y PRÁCTICAS SILVICULTURALES EN EL PERÍMETRO URBANO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

A continuación se presentan los artículos de los diferentes decretos que son aplicables al tema del manejo de la arborización y la autorización para la aplicación de prácticas silviculturales en el área de la ciudad de Bogotá:

3.2.1 Decreto de ley 1791 de 1996

Por medio de éste decreto se establece el régimen de aprovechamiento forestal.

Capitulo VIII: del aprovechamiento de árboles aislado

Artículo 56: Si se tratase de árboles ubicados en predios de propiedad privada, la solicitud deberá ser presentada por el propietario, quien debe probar su calidad de tal, o por el tenedor con autorización del propietario. Si la solicitud es allegada por persona distinta al propietario alegando daño o peligro causado por árboles ubicados en predios vecinos, sólo se procederá a otorgar autorización para talarlos, previa decisión de autoridad competente para conocer esta clase de litigios.

Artículo 57: Cuando se requiera talar o podar árboles aislados localizados en centros urbanos que por razones de su ubicación, estado sanitario o daños mecánicos estén causando perjuicio a la estabilidad de los suelos, a canales de aguas, andenes, calles, obras de infraestructura o edificaciones, se solicitará por escrito autorización a la autoridad competente, la cual tramitará la solicitud de inmediato, previa visita realizada por un funcionario competente que compruebe técnicamente la necesidad de talar los árboles.

Artículo 58: Cuando se requiera talar, transplantar o reubicar árboles aislados localizados en centros urbanos para la realización, remodelación o ampliación de obras públicas o privadas de infraestructura, construcciones, instalaciones y similares, se solicitará autorización ante la Corporación respectiva, ante las autoridades ambientales de los grandes centros urbanos o ante las autoridades municipales, según sea el caso, las cuales tramitarán la solicitud, previa visita realizada por un funcionario competente, quien verificará la necesidad de tala o reubicación aducida por el interesado, para lo cual emitirá concepto técnico.

La autoridad competente podrá autorizar dichas actividades, consagrando la obligación de reponer las especies que se autoriza talar. Igualmente, señalará las condiciones de reubicación o transplante cuando sea factible.

Parágrafo: Para expedir o negar la autorización de que trata el presente artículo, la autoridad ambiental deberá valorar entre otros aspectos, las razones de orden histórico, cultural o paisajístico, relacionadas con las especies objeto de la solicitud.

Artículo 59: Los productos que se obtengan de la tala o poda de árboles aislados, en las circunstancias descritas en el presente capítulo, podrán comercializarse, a criterio de la entidad competente.

3.2.2 Decreto Distrital 472 de Diciembre 23 de 2003

Mediante éste decreto se reglamenta la arborización, aprovechamiento, tala, poda, transplante o reubicación del arbolado urbano y se definen las responsabilidades de las entidades Distritales en relación con el tema.

Artículo 5.- Espacio público: El Jardín Botánico José Celestino Mutis es la entidad responsable de la arborización, tala, poda, aprovechamiento, transplante o reubicación del arbolado urbano en el espacio público de uso público de la ciudad, salvo las siguientes excepciones:

- a) Las actividades de remoción (tala, poda, trasplante o reubicación) que deban acometer las empresas de servicios públicos domiciliarios, de conformidad con el artículo 57 de la Ley 142 de 1994 y demás normas concordantes.
- b) En caso de que las podas del arbolado sean realizadas por empresas prestadoras del servicio público domiciliario de aseo, esta labor se hará en coordinación con el Jardín Botánico.
- c) La revegetalización de las rondas de ríos, canales y humedales a cargo de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá -EAAB- y la revegetalización de las Áreas Protegidas del Distrito que corresponden al Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente -DAMA-, de acuerdo con lo dispuesto en el Plan de Ordenamiento Territorial.
- d) Las actividades de arborización, tala, poda, trasplante o reubicación que se requieran ejecutar para el desarrollo de obras de infraestructura por parte de las Entidades Distritales. Una vez finalizada la obra, el mantenimiento del arbolado será entregado al Jardín Botánico.
- e) La tala de cercas vivas (setos) dentro de los procesos de restitución de espacio público que adelanta el Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público.
- f) La arborización, tala, poda, aprovechamiento, trasplante o reubicación en predios de propiedad privada estará a cargo del propietario.

Los particulares que tengan a su cargo el mantenimiento de zonas verdes en espacio público deberán coordinar las actividades de arborización, tala, poda, trasplante o reubicación con el Jardín Botánico.

Artículo 6.- Permisos o autorizaciones de tala, aprovechamiento, trasplante o reubicación en propiedad privada: Cuando se requiera la tala, aprovechamiento, trasplante o reubicación del arbolado urbano en predios de propiedad privada, el interesado deberá solicitar permiso o autorización al Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente -DAMA-. La solicitud deberá ser presentada por el propietario del predio, o en su defecto por el poseedor o tenedor, quien deberá contar con la autorización escrita del propietario. El interesado deberá aportar la ficha técnica si la solicitud es para veinte (20)

individuos del arbolado o más, para menos de veinte (20) individuos el DAMA elaborará la ficha técnica. Cuando se trate de ejecutar proyectos urbanísticos en propiedad privada, el interesado deberá presentar el inventario forestal y la ficha técnica a consideración del DAMA.

Artículo 7.- Permisos o autorizaciones de tala, aprovechamiento, transplante o reubicación en espacio público: Teniendo en cuenta lo señalado en el artículo quinto del presente Decreto, requiere permiso o autorización previa del Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente -DAMA- la tala, aprovechamiento, transplante o reubicación del arbolado urbano en el espacio público de uso público.

El DAMA elaborará la ficha técnica, evaluará la solicitud y emitirá el respectivo concepto técnico con base en el cual se otorgará o negará el permiso o autorización. En los casos señalados en los literales a y del artículo quinto del presente Decreto, el interesado deberá presentar el inventario forestal y la ficha técnica a consideración del DAMA.

Parágrafo: En caso de que un ciudadano, persona natural o jurídica, solicite la tala, transplante o reubicación de arbolado urbano ubicado en espacio público de uso público, el DAMA evaluará la solicitud e iniciará el trámite a nombre del Jardín Botánico José Celestino Mutis.

Artículo 8.- Podas en espacio público. Cuando se requiera ejecutar podas de estabilidad, formación o mejoramiento del arbolado urbano en el espacio público de uso público, las entidades responsables señaladas en el artículo quinto del presente Decreto podrán ejecutar las podas de manera técnica, dispondrán de un programa de podas y llevarán un registro pormenorizado de los trabajos realizados que contenga el inventario y la ubicación georeferenciada para cada uno de los individuos y las fichas con reporte fotográfico que demuestre el estado anterior y posterior del tratamiento realizado. Dicho registro será presentado mensualmente al Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente -DAMA- con el fin de realizar control y seguimiento.

Artículo 10.- Situaciones de emergencia: Por razones fitosanitarias, de muerte o de riesgo inminente del arbolado urbano, respaldadas en visitas y conceptos técnicos, según las fichas de evaluación establecidas en el Manual de Arborización para Bogotá, el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente -DAMA- autorizará de manera inmediata la tala requerida. Cuando se trate de talas de emergencia en predios de propiedad privada de estratos 1 y 2 y previa acreditación de afiliación al SISBEN en los niveles 0, 1 y 2 por parte del solicitante, el DAMA asumirá los gastos de evaluación y seguimiento de estas autorizaciones y las obligaciones de compensación serán asumidas por el Jardín Botánico José Celestino Mutis a través de su Programa de Arborización, así como la ejecución de estas talas. En los demás casos, las talas de emergencia en predios de propiedad privada serán asumidas por el propietario, poseedor o tenedor del predio.

Los individuos del arbolado urbano que por situaciones de emergencia se encuentren caídos en espacio público de uso público, deberán ser recogidos por la empresa que preste el servicio público domiciliario de aseo en esa zona.

Artículo 12.- Compensaciones por tala de arbolado urbano. El Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente -DAMA- hará seguimiento y verificará el cumplimiento de las obligaciones de compensación señaladas en los permisos o autorizaciones de tala o aprovechamiento, las cuales se cumplirán de la siguiente manera:

- a) El DAMA definirá la compensación que debe hacerse por efecto de las talas o aprovechamientos, expresada en equivalencias de individuos vegetales plantados -IVP- por cada individuo vegetal talado, indicando el valor a pagar por este concepto.
- b) Con el fin de dar cumplimiento a esta obligación, el titular del permiso o autorización se dirigirá a la Tesorería Distrital donde consignará el valor liquidado por el DAMA con cargo a la cuenta presupuestal Fondo de Financiación del Plan de Gestión Ambiental – Subcuenta – Tala de árboles. La Dirección Distrital de Tesorería enviará mensualmente al Jardín Botánico José Celestino Mutis y al DAMA una relación de los ingresos recaudados por este concepto.

- ..
- c) En desarrollo de obras de infraestructura o construcciones que adelanten entidades públicas donde se tenga previsto un diseño paisajístico que involucre siembra y mantenimiento de arbolado, el DAMA podrá autorizar que las compensaciones se efectúen total o parcialmente mediante la siembra y mantenimiento de arbolado, según lo señale el concepto técnico, atendiendo lo dispuesto en el Manual de Arborización para Bogotá y en coordinación con el Jardín Botánico.
 - d) En predios de propiedad privada de estratos 1, 2 y 3 o cuando se trate de centros educativos, entidades de salud o de beneficio común, el DAMA podrá autorizar que las talas sean compensadas total o parcialmente mediante la siembra y mantenimiento de arbolado, según lo señale el concepto técnico, teniendo en cuenta si existe espacio suficiente y atendiendo lo dispuesto en el Manual de Arborización para Bogotá.
 - e) La compensación fijada en individuos vegetales plantados -IVP- que corresponda a obras de infraestructura o construcciones, públicas o privadas, se liquidará teniendo en cuenta el número de individuos autorizados. Sin embargo, cuando el número de individuos efectivamente talado sea menor al autorizado, el titular del permiso consultará la valoración realizada en el concepto técnico, informará al DAMA acerca de la ejecución de las talas con el fin de hacer el respectivo seguimiento y se hará la reliquidación.
 - f) Las obligaciones de compensación a cargo del Jardín Botánico José Celestino Mutis serán estimadas en individuos vegetales plantados -IVP-, no obstante, se cumplirán a través de su Programa de Arborización que incluye plantación y mantenimiento del arbolado.

Parágrafo.- Un individuo vegetal plantado -IVP- corresponderá al valor de propagación, plantación y mantenimiento durante tres (3) años de un árbol de más de un metro y medio (1.5 mt.) de altura, en términos de salarios mensuales mínimos legales vigentes, según lo establecido por el DAMA en coordinación con el Jardín Botánico José Celestino Mutis. Cada individuo vegetal del arbolado urbano a talar será valorado por el DAMA en IVPs.

Artículo 15.- Medidas preventivas y sanciones. El DAMA hará el seguimiento y control a lo dispuesto en este Decreto y en caso de incumplimiento impondrá las medidas y sanciones a que se refiere el artículo 85 de la Ley 99 de 1993, cuando se incurra en alguna de las siguientes conductas:

1. Tala, aprovechamiento, transplante o reubicación del arbolado urbano sin el permiso otorgado por el DAMA.
2. Deterioro del arbolado urbano y provocación de la muerte lenta y progresiva de individuos, con prácticas silviculturales lesivas tales como anillamiento y envenenamiento con productos nocivos que afecten negativamente su estado fitosanitario.
3. No efectuar la compensación por tala del arbolado urbano.
4. No contar con el salvoconducto de movilización, en caso de requerirlo.
5. Incumplimiento de las obligaciones señaladas en el respectivo permiso o autorización.
6. Siembra de especies no previstas en el Manual de Arborización para Bogotá.
7. Siembra de arbolado urbano en el espacio público de uso público por particulares, cuando dicha actividad no se haga de manera coordinada con el Jardín Botánico.

Artículo 16.- Régimen de transición. Los trámites de permisos y autorizaciones de tala, poda, aprovechamiento, transplante o reubicación del arbolado urbano iniciados antes de la entrada en vigencia del presente Decreto, se ajustarán a lo dispuesto en esta norma.

Los permisos y autorizaciones de tala, poda, transplante o reubicación de árboles aislados en espacio público, solicitados por ciudadanos y otorgados al IDU, IDR y la EAAB, cuyas actividades autorizadas aún no se hayan ejecutado, se entenderán otorgados al Jardín Botánico de conformidad con lo dispuesto por el artículo quinto y el parágrafo del artículo séptimo del presente Decreto.

Las obligaciones de compensación señaladas en actos administrativos expedidos por el DAMA con anterioridad a la vigencia del presente Decreto que aún no se hayan cumplido,

podrán ajustarse a lo aquí dispuesto en materia de compensaciones por tala de arbolado urbano.

3.3 EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA INTERVENCIÓN SOBRE LA COBERTURA ARBÓREA EN BOGOTÁ

Como política Distrital de mejoramiento del espacio público se empezó un programa coordinado de arborización y mantenimiento de su cobertura arbórea para lo cual se adecuó todos los elementos jurídicos, económicos y administrativos que permitieran su ejecución cuyo punto de partida se establece con la expedición del Decreto Distrital 984 de 1998. A continuación se presenta un breve resumen sobre el programa de arborización en cuanto al manejo silvicultural (período 1998-2002), entendido como los tratamientos de tala, poda y traslado de la cobertura arbórea existente y la plantación de nuevos árboles

En la Figura 3.1 se muestra la proporción de los tratamientos efectuados a los casi 163.000 árboles intervenidos durante el período 1998-2002. Es notable que haya existido un equilibrio entre los árboles talados (54%) y los árboles que han sido objeto de tratamiento para su conservación (46%).

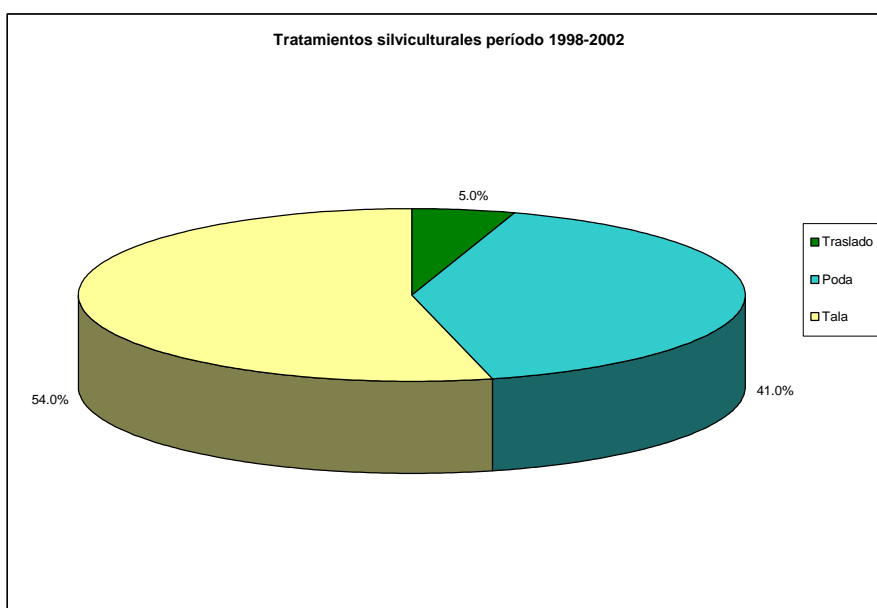


Figura 3.1 Tratamientos silviculturales período 1998-2002

En la Figura 3.2 se puede observar que la cuarta parte de la tala efectuada en Bogotá se realizó a la especie Urapán, debido principalmente al alto grado de presencia de ésta especie.

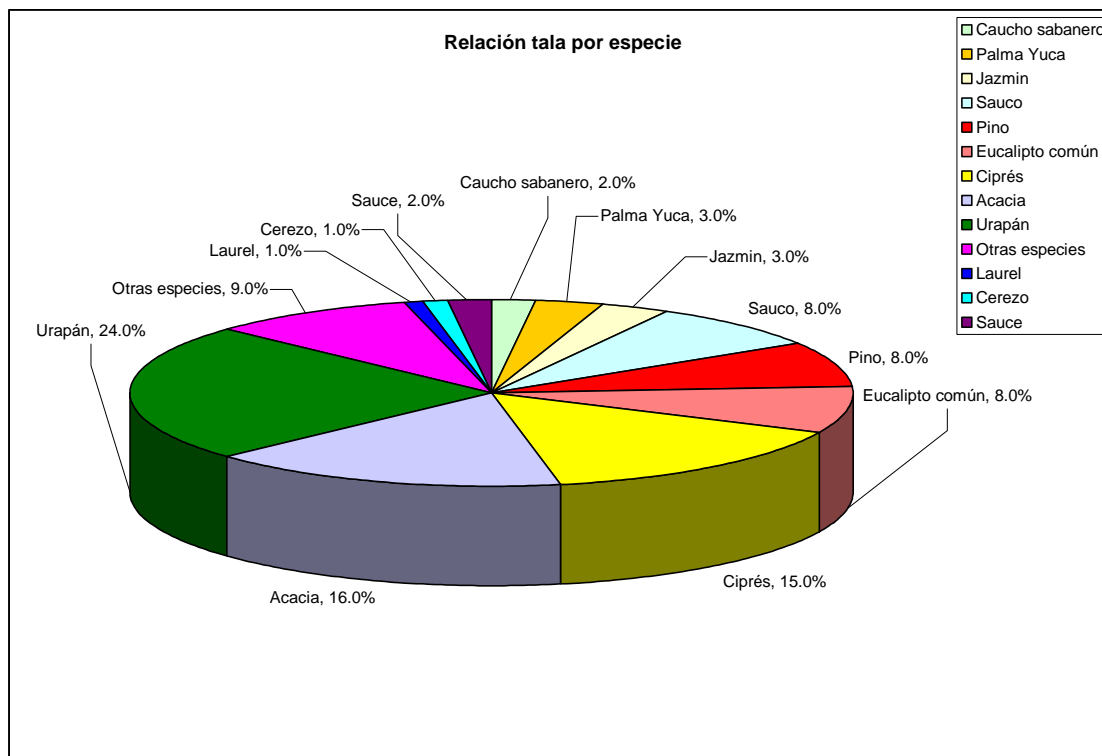


Figura 3.2 Relación tala por especie

De igual manera es notable que entre la acacia y el ciprés configuran un 31% adicional de la aplicación del tratamiento silvicultural de tala. La acacia debe su participación a su susceptibilidad al volcamiento, la vulnerabilidad de su corteza para permitir filtraciones de agua, pudrición localizada y posteriormente la rajadura de ramas y secciones grandes del árbol, en cuanto al ciprés la principal razón es su sobremadurez sumado a su porte alto lo cual lo convierte en un peligro potencial por su eventual volcamiento.

Siguen en su orden el eucalipto, también por problemas de estabilidad, el pino y el saucó cada uno con el 8% en su mayoría por estar ubicados en lugares inadecuados, el jazmín y la palma yuca con el 3% por encontrarse suprimidos y con problemas de establecimiento, el caucho sabanero, el sauce con el 2% y el cerezo con el 1% del total talado generalmente por daños ocasionados a la infraestructura. El número de especies a las cuales se les aplicó el

tratamiento silvicultural de tala fue de 68. Del total de individuos talados, el 74% corresponde a representantes de especies introducidas.

En el gráfico No. 9 se presenta el porcentaje por especie plantada, siendo el caucho sabanero, la eugenia, el Holly liso y el Roble las especies de mayor representatividad ya que entre las cuatro alcanzan el 35% del total plantado. Siguen en orden de representatividad el Calistemo, el Falso Pimiento y el Guayacán de manizales cada uno con el 5%, el corono, el ligustro, el Hayuelo y el estoraque o liquidambar cada uno con el 4% y el Chicalá, el Sangregao, el Pino romerón, el Nogal, el Sauce, el Cerezo y el Siete cueros cada uno con el 2% de participación.

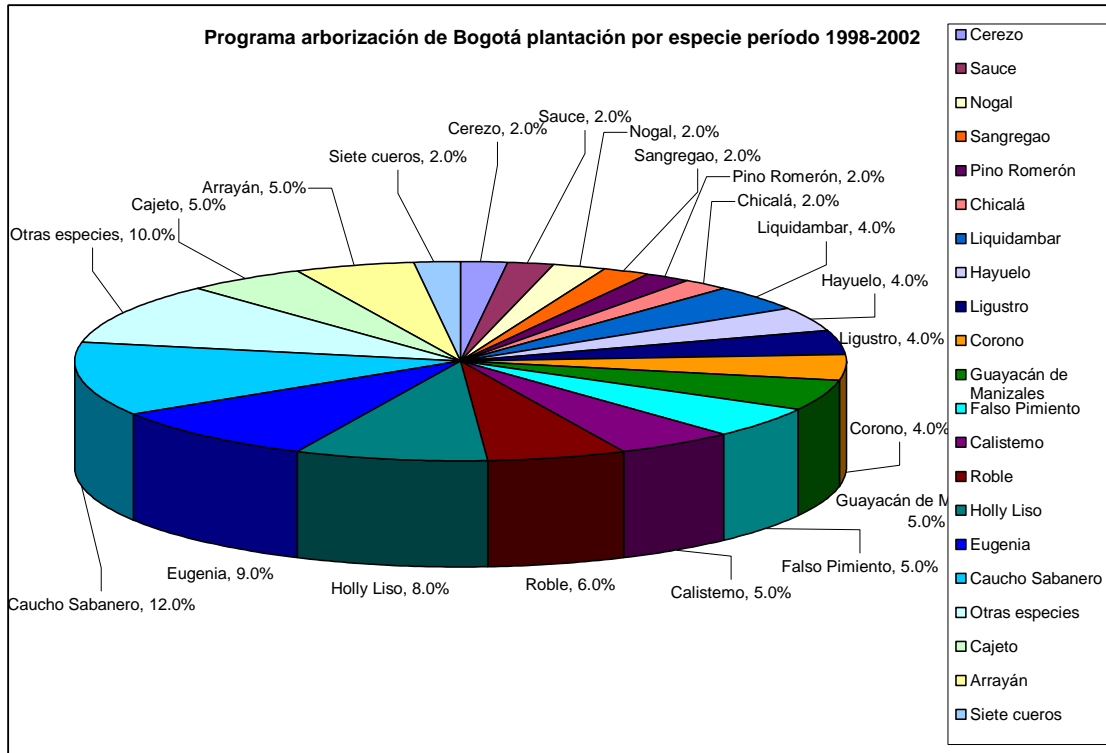


Figura 3.3 Resultados programa de arborización en Bogotá

4. DESCRIPCIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

El presente capítulo se da una breve descripción a la protección de los sistemas de potencia, esto con el fin de conocer y realizar un mejoramiento de la seguridad y el mantenimiento detectivo en los sistemas de distribución.

4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

- Relé: es un elemento eléctrico diseñado para interpretar condiciones de entrada de una manera preestablecida, después de esto, condiciones específicas se encuentran para responder con la finalidad de causar operaciones de contacto o cambios abruptos similares en circuitos eléctricos de control asociados. Las entradas son usualmente eléctricas, pero pueden ser mecánicas, térmicas u otras cantidades.

Los relés pueden ser clasificados según su función, entrada, características de desempeño o principios de operación. La clasificación por función es la más usada y en ésta se destacan cinco categorías básicas de relés:

- a) Protectivos
- b) Reguladores
- c) Reconectadores de verificación sincrónica o de sincronización
- d) De monitoreo

Los relés protectivos tienen como función detectar líneas defectuosas o aparatos u otras condiciones del sistema de potencia de naturaleza anormal o peligrosa e iniciar la acción apropiada por parte del circuito de control. Los relés protectivos son el cerebro en la detección de problemas, pero siendo elementos diseñados para soportar poca energía, no tienen la capacidad de abrir y aislar el área del problema en un sistema de potencia. Los cortacircuitos y varios tipos de interruptores circuitales se usan para esto y se podría decir que proveen el “músculo” para el aislamiento por falla.

- Fusibles: Son elementos de protección contra cortocircuitos, se utilizan en baja tensión acompañados de interruptores manuales o contactores y en media tensión acompañados de seccionadores de carga.
- Reconnectadotes: Un reconnector es un dispositivo de protección con la capacidad de detectar e interrumpir una sobrecorriente y recerrarse de nuevo automáticamente reenergizando la línea. Si la falla es permanente, el reconnector se quedará abierto después de cierto número de operaciones (lentas y rápidas) y aísla de este modo la sección del circuito afectada. Cuando la falla es transitoria el reconnector opera abierto y cerrando de nuevo, eliminando de ésta forma una salida prolongada del circuito.

Los reconnectoradotes pueden ser monocolors o tripulares. Los monopolares se utilizan para proteger líneas monofásicas, tales como ramas o derivaciones de un alimentador trifásico. También se utilizan en sistemas trifásicos donde la carga es predominante monofásico. Así, cuando sucede una falla línea a tierra, la fase afectada puede restaurarse y las otras dos seguir energizadas.

Los reconnectoradotes tripulares se utilizan cuando se requiere bloquear todo el sistema para cualquier falla monofásica. Estos reconnectoradotes tienen dos formas de operar: disparo monofásico y disparo trifásico.

- Seccionalizadores: Es un dispositivo de protección que aísla automáticamente secciones de línea de un sistema de distribución. Se conecta en serie con un reconnector. El seccionalizador no interrumpe corrientes de fallas, solo cuenta el número de veces que el reconnector o el interruptor del lado de la fuente ha interrumuido una corriente de falla más allá del seccionalizador. Si el reconnector interrumió dos veces y el seccionalizador ha sido ajustado para dos operaciones del reconnector, entonces el seccionalizador abrirá sus contactos antes de que el reconnector haya cerrado por tercera vez tratando de energizar la línea.

El seccionalizador está ubicado en serie con el reconnector pero a una distancia remota de éste. Los seccionalizadores pueden ser monopolares o tripulares con

control hidráulico o electrónico, con interrupción en aceite, en vacío. Los diferentes tipos de seccionalizadores tienen una forma de operación similar.

Es importante tener en cuenta que el sistema de potencia está dividido en 6 diferentes zonas de protección:

- Generadores y unidades generador-transformador
- Transformadores
- Buses
- Líneas (transmisión, subtransmisión y distribución)
- Equipo de utilización (motores, cargas estáticas, etc.)
- Banco de condensadores y/o reactancias

4.2 PROTECCIÓN DE CIRCUITOS PRIMARIOS

La protección de circuitos primarios se hace a través de la combinación de interruptores, reconectadores, seccionalizadores y fusibles. Los fusibles en los ramales laterales, dentro de la sección del circuito protegido por el interruptor se seleccionan de tal manera que una falla temporal es liberada por el disparo instantáneo del interruptor antes que el fusible se dañe.

Si la falla es permanente, el fusible libera la falla antes de que el interruptor o reconectador tenga oportunidad de operar con disparo temporizado. En redes aéreas, la mayoría de las fallas de naturaleza transitoria las despeja el interruptor o reconectador, dejando intacto el fusible.

4.3 REDES DE BAJA TENSIÓN

Los circuitos secundarios constituyen la parte del sistema en el cual se transporta la energía eléctrica desde el secundario del transformador de distribución hasta cada uno de los usuarios con tensiones menores de 1000V, dichos usuarios presentan consumo residencial, pequeñas industrias, comercios y el alumbrado público.

- *Topología*: Para la configuración de las redes de baja tensión se presentan dos alternativas sin redes secundarias y con redes secundarias. En estos criterios se propone que para la red del sector residencial y con alimentación monofásica de media tensión no se utilice red secundaria, tal como los barrios o urbanizaciones residenciales y para los usuarios de sectores, comerciales e industriales alimentación trifásica de la red secundaria.

- *Distribución en baja tensión sin redes secundarias*: Con la ausencia de redes secundarias todas las acometidas partirán del poste del transformador directamente hasta los usuarios. Este esquema se aplica para usuarios monofásicas de estratos 1 a 4 y con redes aéreas.

- *Distribución en baja tensión con redes secundarias*: se utiliza el esquema radial, el cual es el más común en las configuraciones empleadas para redes de distribución secundaria, se caracteriza por ser de fácil diseño y operación. La longitud de los ramales se toma por el tamaño de las cuadras que varía entre 80 y 100 metros. Este esquema se aplica para usuarios de sectores comerciales e industriales y para las redes subterráneas de los estratos 5 y 6.

4.4 AISLAMIENTO Y PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

El deterioro del aislamiento eléctrico depende tanto de la magnitud del esfuerzo aplicado, como de la duración de tiempo de este esfuerzo.

En el caso de líneas de transmisión los esfuerzos del aislamiento son prácticamente los esfuerzos de voltaje a las cuales está sujeta la línea. Se han normalizado varias categorías de esfuerzos por voltajes, siendo las principales:

- Esfuerzos causados por el voltaje del sistema a 60 Hz.
- Esfuerzos causados por sobrevoltajes: Temporales, de conmutación y descargas atmosféricas.

Los sobrevoltajes son escasos y de corta duración, mientras que el voltaje del sistema, aunque relativamente de poca magnitud, ocasionan un esfuerzo permanente sobre el aislamiento. Los sobrevoltajes se definen de acuerdo con las normas como cualquier voltaje transitorio entre fase y tierra o entre fases, cuyo valor pico es mayor que el valor pico del voltaje del sistema.

Los sobrevoltajes son fenómenos transitorios pero se han distinguido de acuerdo con su duración y amortiguamiento en una forma general para su estudio, teniendo así los sobrevoltajes temporales, los de conmutación y los de descargas atmosféricas.

Los sobrevoltajes temporales son voltajes oscilatorios entre fase y tierra o entre fases, de relativa larga duración o de amortiguamiento débil. Estos se originan principalmente por: fallas, cambios súbitos de carga, efecto ferranti, entre otros.

4.4.1 Propiedades estadísticas

El voltaje de resistencia dieléctrica (withstand voltaje) no es una cantidad que pueda determinarse en forma directa sino a través de aplicación repetitiva de voltajes de impulso. El voltaje de resistencia dieléctrica V_w se puede definir como aquel valor de voltaje cuya única aplicación no causa descarga disruptiva pero la aplicación de un valor infinitesimalmente mayor sí causa descarga. Sin embargo, si la prueba se repitiera, podría verse que el segundo valor de V_w sería diferente. Entonces, aunque el voltaje V_w de un equipo, es una cantidad definible, ésta es únicamente definible en términos estadísticos. Este valor es una cantidad aleatoria caracterizada por un valor medio y por alguna medida de dispersión que es generalmente la desviación normal.

La función de probabilidad de descarga disruptiva para un valor de voltaje V_T está definida por:

$$F(V_T) = P(V_w < V_T)$$

Para espaciamientos en sistemas de alta tensión, esta función se aproxima a una distribución normal, con valor medio correspondiente al voltaje crítico de flameo (CFO) y es el valor pico del impulso que bajo condiciones específicas causa flameo sobre el aislamiento el 50% de las veces aplicada.

$$F(V_T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{V_T} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$$

El objetivo del diseño del aislamiento es asegurar que éste tiene una rigidez dieléctrica suficiente para resistir los esfuerzos sobre él, ejercidos por los sobrevoltajes aplicados.

5. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

En un sistema de transmisión o de distribución de energía eléctrica, las líneas o las redes eléctricas están expuestas a diferentes motivos de fallas que causan interrupción del servicio eléctrico, en las que se encuentran principalmente las debidas a la vegetación. Esta vegetación puede caer sobre la red eléctrica produciendo la caída de una o varias fases o puede crecer hasta tocar una de las fases y producir un corto circuito fase – tierra.

Los programas creados para evitar las interrupciones del servicio eléctrico debido al crecimiento o caída de la vegetación sobre las redes eléctricas son llamados Programas de Gestión de la Vegetación sobre la Servidumbre. Estos programas deben ser ejecutados por los operadores de red de una forma segura y ambientalmente viable. El objetivo de estos programas es el de suministrar seguridad a los servicios de transporte de energía eléctrica manteniendo una relación armoniosa con el ambiente. La servidumbre mantenida correctamente es esencial para proveer seguridad a los trabajadores y a los usuarios.

Para obtener un modelo de gestión de vegetación adecuado desde el punto de vista de costos es necesario obtener inicialmente los modelos de confiabilidad, de mantenimiento y de costos que hacen parte de los sistemas de transmisión y distribución. La metodología sugerida para las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica en la gestión de la vegetación que existe alrededor de sus redes consiste, básicamente de ocho pasos que se presentan en la y que se explican en los siguientes capítulos.

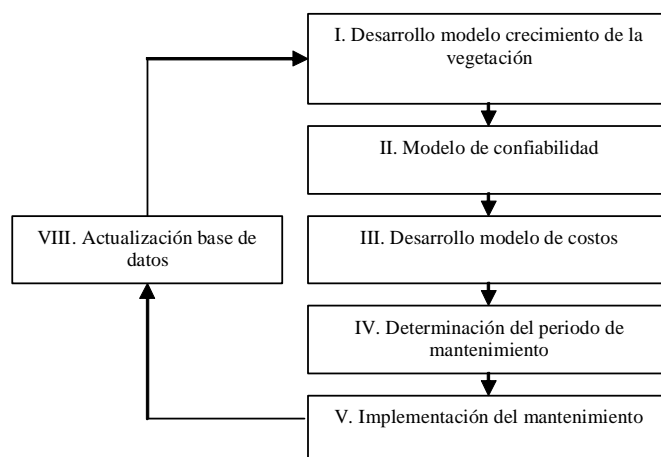


Figura 5.1 Modelo gestión de la vegetación

5.1 MODELO CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN

5.1.1 Aspectos generales

Las funciones o ecuaciones de crecimiento describen las variaciones que experimentan el tamaño de un organismo o una población con la edad. El crecimiento biológico, que es el resultado de un gran número de procesos complejos, puede resumirse de una forma muy simple, particularmente cuando el organismo o población analizada es un árbol.

En el caso de los árboles, su crecimiento es el resultado de la interacción entre dos factores opuestos: por una parte está la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado, que depende del potencial biótico del individuo, de su actividad fotosintética, de la absorción de nutrientes, de los procesos catabólicos y anabólicos, etc.; en el lado opuesto se encuentran las restricciones al crecimiento, impuestas por el entorno en el que se desenvuelve dicho individuo (competencia con otros organismos, limitación de recursos, procesos respiratorios y estrés) y por su propia condición de ser vivo (mecanismos de autorregulación del crecimiento y envejecimiento).

Si se representa la evolución en el tamaño (diámetro, altura, área asimétrica volumen, etc.) de un árbol o de una masa forestal a lo largo de su vida se obtiene una curva, denominada sigmoideo, cuyo patrón se mantiene sorprendentemente estable, con independencia de la especie de que se trate o de los cambios y fluctuaciones del entorno en que se desarrolle. La curva sigmoideo presenta dos características fundamentales, que derivan de la interacción entre los dos factores opuestos que condicionan el crecimiento, comentados anteriormente: tiene un punto de inflexión y una asíntota horizontal.

En la Figura 5.2 se ha representado una curva sigmoideo, que describe la evolución con el tiempo del tamaño de cualquier variable de un árbol o una masa forestal (diámetro, altura, área asimétrica, volumen, etc.), junto con la curva de su primera derivada, que corresponde al crecimiento corriente de dicha variable (representada a una escala mayor para facilitar su comparación). En dicha figura se puede apreciar cómo inicialmente, en las primeras edades, el peso del factor positivo es mucho mayor que el de las restricciones o factor negativo, por

lo que el crecimiento se dispara, dando lugar a una curva de evolución cóncava hacia arriba. A medida que se desarrolla el individuo las restricciones van aumentando, de tal manera que se llega a producir un cambio en la curvatura de la gráfica de evolución (se produce un punto de inflexión), que corresponde con el valor máximo de la curva de crecimiento corriente. A partir de ese momento, y puesto que siguen aumentando las restricciones, el crecimiento comienza a ralentizarse, lo que significa que la curva de crecimiento disminuye paulatinamente y la de evolución aumenta cada vez más despacio. Esta tendencia continua hasta que, finalmente, los factores que favorecen y se oponen al crecimiento se igualan, por lo que cesa el crecimiento y se estabiliza el tamaño del individuo, hecho que corresponde matemáticamente con la asíntota horizontal.

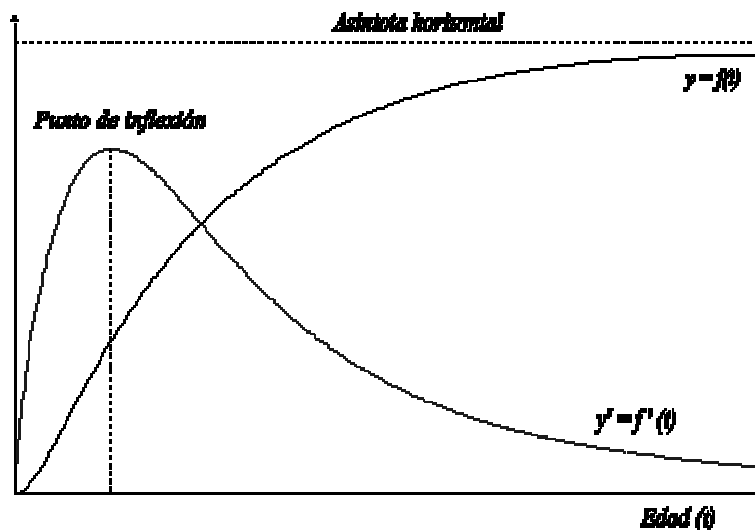


Figura 5.2 Características fundamentales de la curva sigmoidea y su primera derivada

Para un árbol la rapidez de su crecimiento además de los factores ya mencionados también depende de una serie de factores como: clima, calidad de sitio, densidad (competencia), etc.

5.1.2 Modelos de crecimiento de la vegetación

Un modelo de crecimiento predice valores futuros de ciertas salidas, por ejemplo el volumen de un árbol, dado ciertas entradas (variables de control) tales como determinados tratamientos silviculturales (Ej. Poda). Tanto las entradas como las salidas son funciones del tiempo.

La idea es caracterizar el estado del sistema en cualquier instante del tiempo de tal modo que dado el estado actual el futuro no dependa del pasado. “A grandes rasgos, un estado de un sistema en un instante dado es la información necesaria para determinar el comportamiento del sistema desde ese instante en adelante”². Con el fin de no depender del pasado, el estado puede ser considerado “como una suerte de almacenamiento de información o memoria, o una acumulación de causas anteriores”³ y “una cierta representación compacta de la actividad anterior del sistema suficientemente completa para que nos permita predecir, en base a las entradas, exactamente cuáles serán las salidas, y también actualizar el estado mismo”⁴

Sea el estado en un instante dado t especificado por una lista de n números (variables de estado), o sea, por un vector de estado n -dimensional $\mathbf{x}(t)$. Las entradas y salidas son también vectores de dimensión finita $\mathbf{u}(t)$ y $\mathbf{y}(t)$, respectivamente (es posible un planteamiento más general, pero generalmente no es necesario). Entonces el comportamiento del sistema queda descrito por una función de transición.

$$[1] \quad x(t) = F[x(t_0), U, t - t_0]$$

y una función de salida

$$[2] \quad y(t) = g[x(t)]$$

[1] da el estado en cualquier instante t en función del estado en algún otro instante t_0 , de las entradas (como función del tiempo, denotada por U), y del tiempo transcurrido entre t_0 y t . La función de salida [2] da las salidas actuales en función del estado actual. Una función de transición debe satisfacer ciertas condiciones:

1). (Consistencia) Si el tiempo transcurrido es nulo no hay cambio, o sea,

² Zadeh

³ Kalman

⁴ Padulo

$$F[x(t), U, 0] = x(t) \text{ para todo } t, x(t), U$$

2). (Composición o propiedad de semigrupo) El resultado de proyectar el estado primero desde t_0 hasta t_1 , y luego desde t_1 hasta t_2 , debe ser el mismo que el de la proyección en una etapa desde t_0 hasta t_2 :

$$F[F[x(t_0), U, t_1 - t_0], U, t_2 - t_1] = F(x(t_0), U, t_2 - t_0) \text{ para todo } t_0 \leq t_1 \leq t_2$$

3). (Causalidad) Un cambio de estado puede ser afectado por entradas sólo dentro del intervalo de tiempo correspondiente:

$$F[x(t_0), U_1, t_1 - t_0] = F[x(t_0), U_2, t_1 - t_0]$$

$$\text{Si } u_1(t) = u_2(t)$$

$$\text{Para } t_0 \leq t \leq t_1$$

Las funciones de transición generadas por integración de ecuaciones diferenciales (o sumatoria de ecuaciones en diferencias en el caso de tiempos discretos) satisfacen automáticamente esas condiciones. El modelo puede entonces plantearse como:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u)$$

$$y = g(x)$$

En el enfoque de espacio de estados, entonces, se evita el tratar de modelar directamente las complejas relaciones entre entradas y salidas a través del tiempo. En lugar de ello, se describe el estado del sistema en cada instante, y se modela la tasa de cambio de estado [3]. La descripción del estado debe ser tal que, con suficiente aproximación, los estados futuros queden determinados por el estado actual y las acciones futuras, y cualesquiera cantidades de interés puedan determinarse dadas las variables de estado.

Los tratamientos silvícolas (por ejemplo podas y raleos) normalmente ocurren en instantes determinados por lo que con una descripción adecuada del estado causan un cambio de estado instantáneo. Por lo tanto, se puede modelar el crecimiento de árboles entre tratamientos como un sistema libre, donde la tasa de cambio del estado es una función sólo del estado actual.

5.1.2.1 Modelo de crecimiento en altura e índice de sitio

El crecimiento en altura de un modelo constituye un subsistema independiente que puede desarrollarse en forma separada. Partiendo de un punto inicial dado (por ejemplo $H = 0$ a $t = 0$) una función del tipo genera una curva única para cada sitio. Para cuantificar la calidad de sitio, se define el índice de sitio como la altura alcanzada a una edad clave especificada tal como 20 o 50 años.

Las alturas observadas varían debido a variaciones en las condiciones de crecimiento y a errores de medición. Por lo tanto, ya que la calidad de sitio es una propiedad del sitio, el índice de sitio debe definirse como una cierta altura promedio, más probable, o predicha, que alcanzaría un árbol hipotético creciendo en este sitio, y no como la altura observada a la edad clave en un rodal determinado.

Para estimar el índice de sitio cuando se tiene alturas a edades distintas de la edad clave, se usan curvas (o ecuaciones) de índice de sitio, que son una familia de curvas que representa las trayectorias H-t para cada valor del índice de sitio.

Se analizaron diferentes tipos de modelos de crecimiento en altura, con el fin de obtener el mejor ajuste de regresión a través del uso de distintas pruebas estadísticas. En primer lugar se estudió una de las ecuaciones más usadas en el área forestal desarrollada por Chapman-Richards, y cuya forma diferencial es la siguiente:

$$[1] \quad \frac{dH}{dt} = \frac{b}{c} (a^c H^{1-c} - H)$$

Como también la ecuación de Korf.:

$$[2] \quad \frac{dH}{dt} = \frac{c}{b} H (a - \ln H)^{1+1/c}$$

Ésta última ecuación principalmente con $c = 1$. El concepto de índice de sitio requiere que un solo parámetro (a , b , c , o alguna función de éstos) varíe con el sitio, siendo el resto igual para todos los sitios. Una opción común es tomar a en [1] o [2] como el parámetro índice. En ese caso las curvas se llaman anamórficas, porque las curvas individuales difieren sólo por un cambio de escala en el eje H . Todos los otros tipos de curva se han llamado polimórficas, lo que puede suceder cuando el parámetro de índice de sitio sea b y las curvas difieren entonces en la escala del eje t .

La integración de [1] y [2] da las siguientes funciones de transición global, respectivamente:

$$H(t) = a \left[1 - \left(1 - \frac{H(t_0)^c}{a^c} \right) e^{-b(t-t_0)} \right]^{1/c}$$

$$\ln H(t) = a - \left[\frac{b}{t - t_0 + b(a - \ln H(t_0))^{-1/c}} \right]^c$$

Donde:

H = Altura (m)

t = Tiempo (años)

a , b , c = Parámetros a determinar mediante el ajuste de regresión

En general, los árboles no siguen exactamente una curva dado un índice de sitio. Cuando aparece una nueva observación altura-edad que se desvía de la tendencia proyectada, el procedimiento usual hace que el rodal siga en adelante la curva que pasa por el nuevo punto (Ver Figura 5.3). Por lo tanto, se cambia el índice de sitio a aquél para el cual la función de transición llevaría el origen al nuevo punto. Esto puede racionalizarse si se piensa que la nueva información justifica una actualización de la calidad de sitio estimada. Por otro lado, si pareciera que se tiene una estimación confiable basada en otra información y que la desviación se debe a condiciones climáticas anormales o a otras razones, sería preferible

continuar con el nuevo punto altura-edad como condición inicial en la función, manteniendo el valor del parámetro de sitio estimado anteriormente.

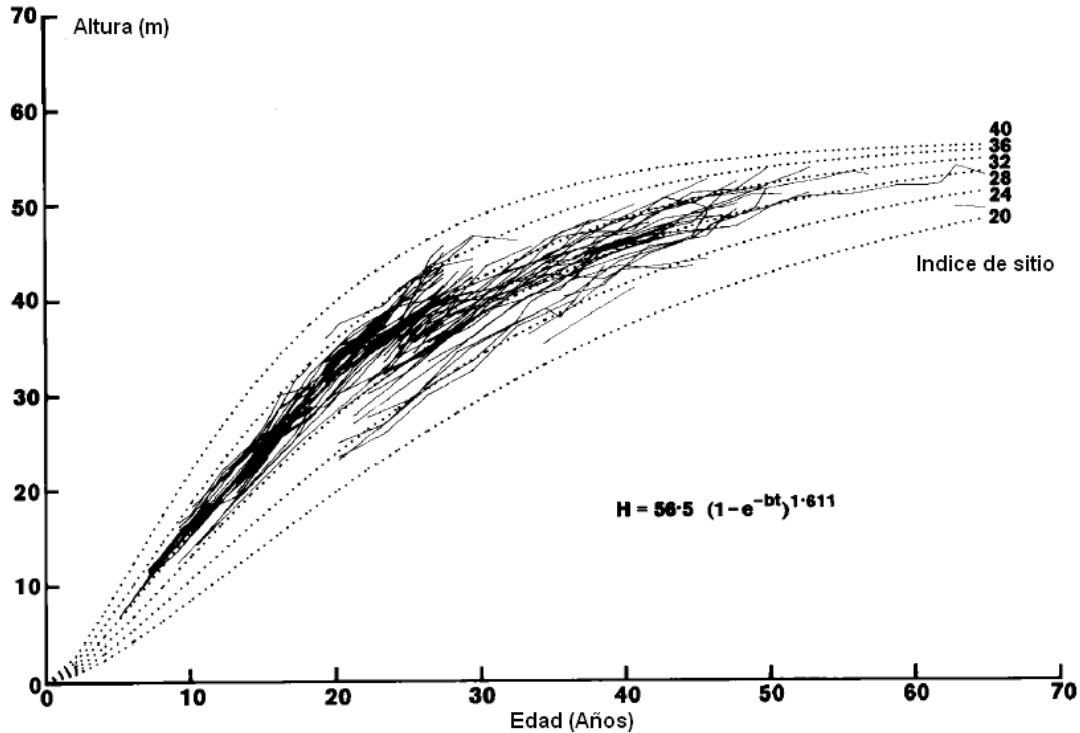


Figura 5.3 Curvas de crecimiento-índice de sitio (García)

Se podría obtener un mejor ajuste a los datos si las curvas no son forzadas a pasar por el origen, dejando el punto inicial como otro parámetro a ser estimado, ya que por diferentes circunstancias, tales como malezas, se pueden producir variaciones substanciales en el crecimiento inicial en la altura, por lo que éstos efectos se pueden modelar desplazando el origen de las curvas. Con condiciones de establecimiento desconocidas y un origen flotante, la calidad de sitio podría estimarse dadas dos o más observaciones. El sitio es representado por un parámetro de la función de transición que influencia la tasa de crecimiento, pero no determina necesariamente el tamaño alcanzado a una edad dada. Se podría usar un parámetro de sitio variable en el tiempo para seguir los efectos de cambios en el clima.

5.1.2.2 Modelo de regresión relación altura – diámetro

La relación de la altura – diámetro es empleada por muchos modelos de predicción para estimar la altura promedio de los árboles de un diámetro o clase diamétrica dada. Se

ensayaron varios modelos de regresión lineal y no lineal para estimar la relación de la altura en función del diámetro a la altura de pecho y se probó la efectividad del ajuste de regresión de los modelos mediante el uso de estimadores de predicción y precisión.

La medición de diámetros a altura de pecho de los árboles es un proceso relativamente rápido y sencillo, pero las alturas implican un proceso más lento y costos por lo que, generalmente, se toman muestras con errores de medición. Los pares de datos (altura, diámetro) obtenidos en una muestra son utilizados para construir una ecuación que estime la altura de todos los árboles a través de su diámetro a la altura de pecho mediante técnicas de regresión lineal y menos frecuentemente técnicas de regresión no lineal.

Se seleccionaron los siguientes modelos:

$$[1] \ln H = a_1 + a_2 \ln D + \varepsilon$$

$$[2] H = a_1 + a_2 \left(\frac{1}{D}\right) + \varepsilon$$

$$[3] H = a_1 + a_2 D + a_3 D^2 + \varepsilon$$

Donde:

H = Altura (m)

D = Diámetro altura de pecho (cm)

a_1, a_2, a_3 = Parámetros a determinar mediante el ajuste de regresión

Algunos se caracterizan por ser flexibles, sencillos y de fácil interpretación biológica del comportamiento de los árboles (modelos 1 y 2). Otros como los modelos polinomiales (modelo 3) a pesar de no tener interpretación biológica son de uso común y se fundamentan en el ajuste de los datos a segmentos de curvas que logran maximizar el R^2 .

El modelo 1 está basado en las funciones de potencia de la forma $h = b_0 x \exp^{b/d}$ los cuales se comportan asintóticamente para diámetros grandes, éste modelo implica una transformación logarítmica. El modelo 2 es asintótico para diámetros grandes. El modelo 3 es de tipo polinómico, muy comunes en estudios dasométricos, pero se debe tener en cuenta

que los modelos polinómicos superiores al grado 3 al realizar extrapolaciones resultan en curvas serpenteantes y sin sentido.

5.1.2.3 Modelo de crecimiento en volumen

Para el modelo de crecimiento en volumen (V) se ha utilizado la ecuación de crecimiento derivada de la función de Richards y parametrizada del índice de sitio obtenido de las curvas de calidad de estación ajustadas para la especie:

$$V = c_1 \cdot IS^{c_4} \cdot \left[1 - \exp(-c_2 \cdot t) \right]^{c_3 \cdot IS^{c_5}}$$

Donde:

V = Volumen de cada árbol (m^3)

IS = Índice de sitio

t = Edad (años)

c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 = Parámetros a determinar mediante el ajuste de regresión

Al incluir el índice de sitio como variable independiente en el exponente se garantiza la obtención de una familia de curvas polimórficas con diferentes puntos de inflexión. También se ha incluido el índice de sitio en el término multiplicador inicial, que es el que marca la asíntota horizontal de cada curva que, lógicamente depende, entre otras cosas, de las características de la estación.

Además del modelo de volumen anterior se analizó el siguiente modelo de volumen, el cual tiene como variables independiente el diámetro (D) de área de copa y la altura del árbol (H):

$$V = f_1 + f_2 \cdot (D^2 \cdot H)$$

Donde:

V = Volumen de cada árbol (m^3)

D = Diámetro a altura de pecho (cm)

H = Altura (m)

f_1, f_2 = Parámetros a determinar mediante el ajuste de regresión

5.1.2.4 Modelo relación diámetro – área de copa

Mediante estudios realizados por el Jardín Botánico a través de diferentes mediciones para diferentes tipos de especies se establecieron relaciones alométricas del diámetro del tallo con la altura y el área de copa, utilizando el método de mínimos cuadrados. El modelo se fundamenta en la relación alométrica de altura – diámetro de la forma funcional:

$$A = b_1 \cdot D^{b_2}$$

Donde:

A = Área de copa

D = Diámetro a altura de pecho

b_1, b_2 = Parámetros a determinar mediante el ajuste de regresión

Ésta función pasa por el origen pero no es asintótica para diámetros grandes.

5.1.3 Estimación de parámetros y pruebas estadísticas

Una vez formulado un modelo que contiene parámetros desconocidos, es necesario estimar esos parámetros. Los modelos y técnicas estadísticas permiten formular y abordar de modo racional problemas de información incompleta y producir usualmente soluciones razonables. Mediante el presente capítulo se presenta las diferentes pruebas estadísticas utilizadas como criterio de evaluación para los diferentes tipos de modelos, esto con el fin de tener una mejor predicción sobre el crecimiento de la vegetación.

Pocas son las publicaciones que proporcionan información con respecto al crecimiento en altura y en diámetro para especies de la sabana de Bogotá, así como las correlaciones que pueden existir entre diversos factores. De un estudio realizado al “*Eucalyptus globulus*” se obtuvieron datos de crecimientos con los cuales se analizaron los diferentes modelos (Tabla 5.1).

Con el fin de validar los supuestos en los que se basa la regresión lineal se presentan algunas pruebas basadas en métodos gráficos y numéricos. Con el fin de averiguar si existe autocorrelación se debe tener en cuenta que el supuesto de no autocorrelación del modelo se relaciona con las perturbaciones u_t las cuales no pueden ser observadas directamente. En su lugar, se dispone de sus valores aproximados, los residuales \hat{u}_t que se obtienen de la regresión por mínimos cuadrados. Un examen visual de \hat{u}_t puede proporcionar información útil sobre autocorrelación, como de heteroscedasticidad, se pueden graficar frente al tiempo, de tal forma que si presentan algún patrón es posible que las u_t no sean aleatorias.

Se puede graficar \hat{u}_t frente a \hat{u}_{t-1} , es decir, el residual en el tiempo t frente a su valor en el tiempo $(t-1)$.

Tabla 5.1 Datos de crecimiento del Eucalyptus
Crecimiento Eucalyptus

Edad (t)	Altura (H)	DAP (D)
(años)	(m)	(cm)
1	7.7	2.2
2	8.8	3.1
3	9.1	4.6
4	10.5	6.9
5	12.4	12.4
6	12.7	14.2
7	14	14.8
8	15	16.3
9	15.5	16.6
10	16	17.1
11	18	17.6
12	18.3	18.7
13	19.3	18.9
14	19.6	19.5
15	21.1	19.9
16	22	21
17	23.1	21.3
18	23.6	22.3
19	26	23.4
20	26.7	23.6
21	27.9	24.6
22	30	25.7
23	32.2	27.8
Índice de sitio = 22		

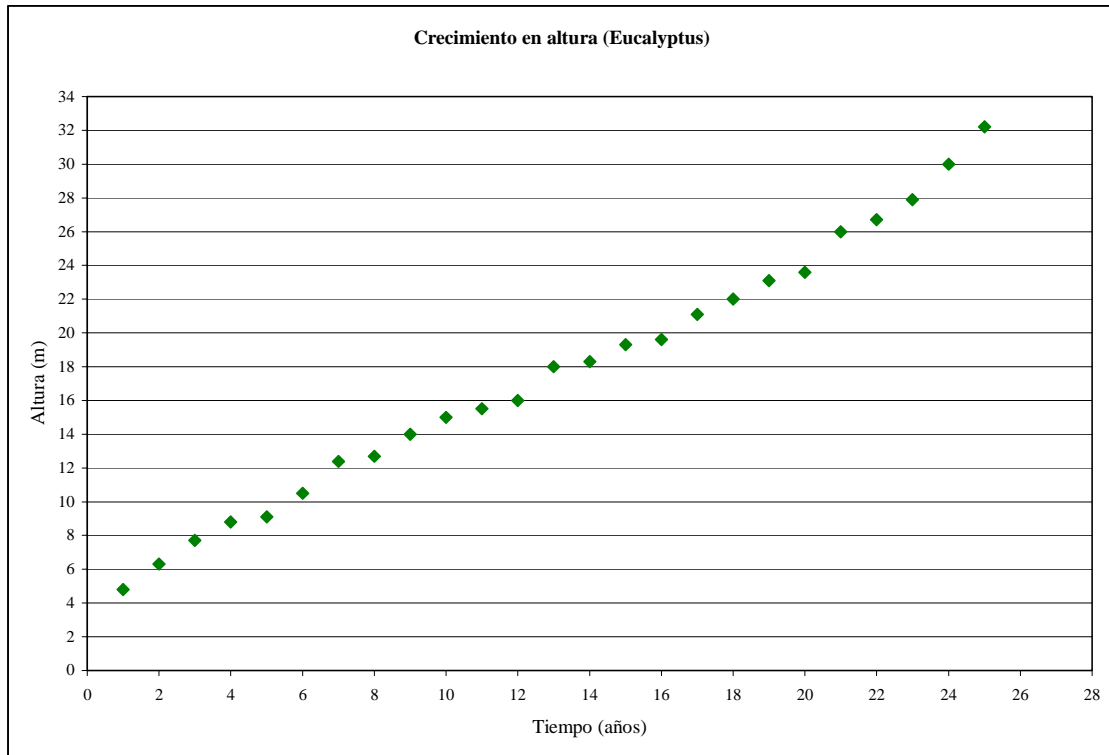


Figura 5.4 Crecimiento en altura (Eucalyptus)

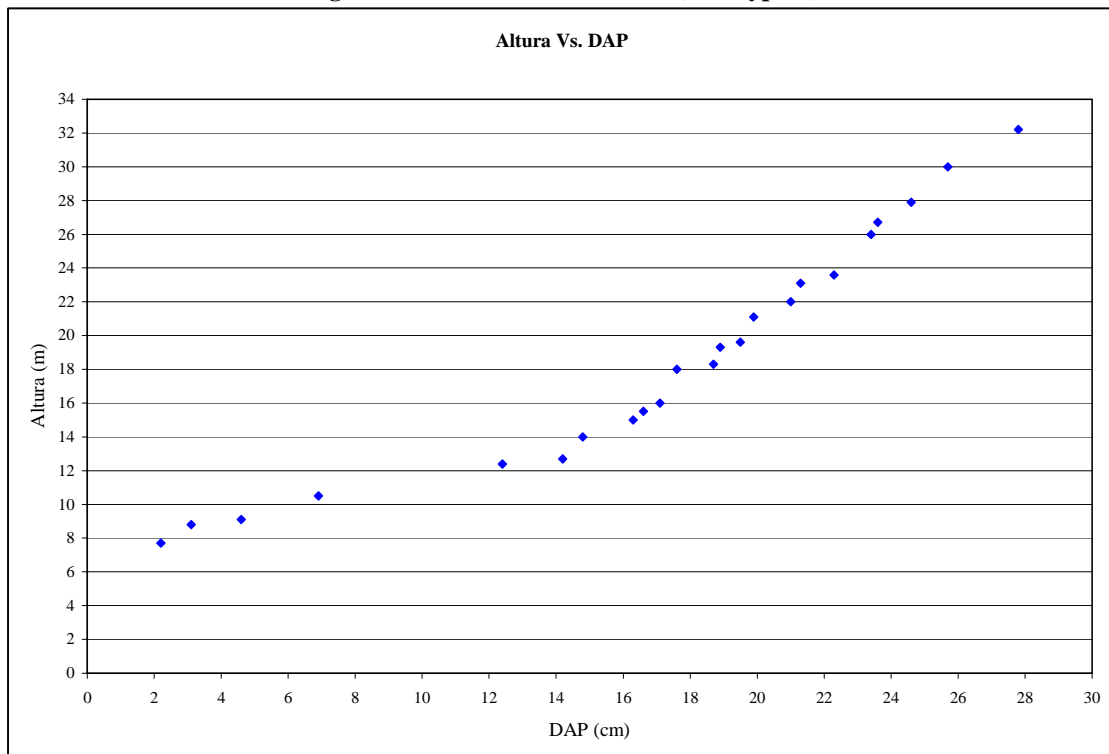


Figura 5.5 Crecimiento Altura Vs. Diámetro a altura de pecho (Eucalyptus)

5.1.3.1 Modelo crecimiento en altura

Se tienen los dos siguientes modelos de crecimiento de altura:

$$[1] \quad \frac{dH}{dt} = \frac{b}{c} (a^c H^{1-c} - H) \Leftrightarrow y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

$$[2] \quad \ln H = a - b \left(\frac{1}{t} \right) \Leftrightarrow \ln y = \beta_0 + \beta_1 X_1$$

Los datos consisten en valores de altura (H) para diferentes tiempos (t), pero normalmente no se tienen mediciones de los valores de las derivadas. La metodología utilizada para el cálculo de los valores aproximados de las derivadas para [1] y [2] consiste en usar diferencia entre observaciones adyacentes. Si (h_1, t_1) y (h_2, t_2) son dos observaciones consecutivas, entonces $(h_2 - h_1) / (t_2 - t_1)$ es una aproximación de dH/dt para: $t = (t_1 + t_2) / 2$. No se deben usar pares de mediciones donde un tratamiento ha producido un cambio de estado entre las dos fechas de medición. Con todos los pares de medición sucesivas apropiados, las ecuaciones para cada una de las variables de estado puede entonces ser ajustada por mínimos cuadrados.

Mediante la herramienta computacional Excel se obtuvo la siguiente regresión para el modelo [1]:

Tabla 5.2 Resultados regresión modelo 1 de crecimiento en altura

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.8860
R Square	0.7850
Adjusted R Square	0.7298
Standard Error	0.6330
Observations	24

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	2	32.1842	16.0921	40.1583	6.66283E-08
Residual	22	8.8158	0.4007		
Total	24	41			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
$H^{(1-c)}$	1.0755	0.5138	2.0934	0.0481	0.0100	2.1410
H	0.0302	0.0147	2.0505	0.0498	0.0003	0.0607

A partir del resultado de la Tabla 5.2 se puede concluir que al hacer un análisis global del modelo de regresión (prueba F) bajo la hipótesis nula ($H_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$) e hipótesis alterna ($H_a = \beta_1 \neq \beta_2 \neq 0$) se obtuvo un p-value (6.66E-6 %) menor que el nivel de significancia escogido (5%), por lo que se puede concluir que a nivel global el modelo de regresión es significativo (rechaza la H_0), así mismo al tener un coeficiente de determinación (R^2) de 0.785 indica que en un 78.5% de la variación total de la altura (variable dependiente) es explicada por el modelo de regresión.

A nivel de significancia individual de cada una de las variables independientes se tiene que el p-value (4.8% y 4.9% respectivamente) para cada estadístico t es menor al nivel de significancia escogido (5%) por lo que se rechaza cada una de las hipótesis nulas ($H_0 = \beta_1 = 0$ y $H_0 = \beta_2 = 0$), y se comprueba la significancia estadística de cada parámetro estimado. También se puede concluir que con un 95% de confianza intervalos como (0.0003 a 0.0607) contendrán el verdadero β_2 , así como intervalos entre (0.01 a 2.14) contendrán el verdadero β_1 .

Las Figura 5.6 y Figura 5.7 presentan la prueba de detección de la autocorrelación:

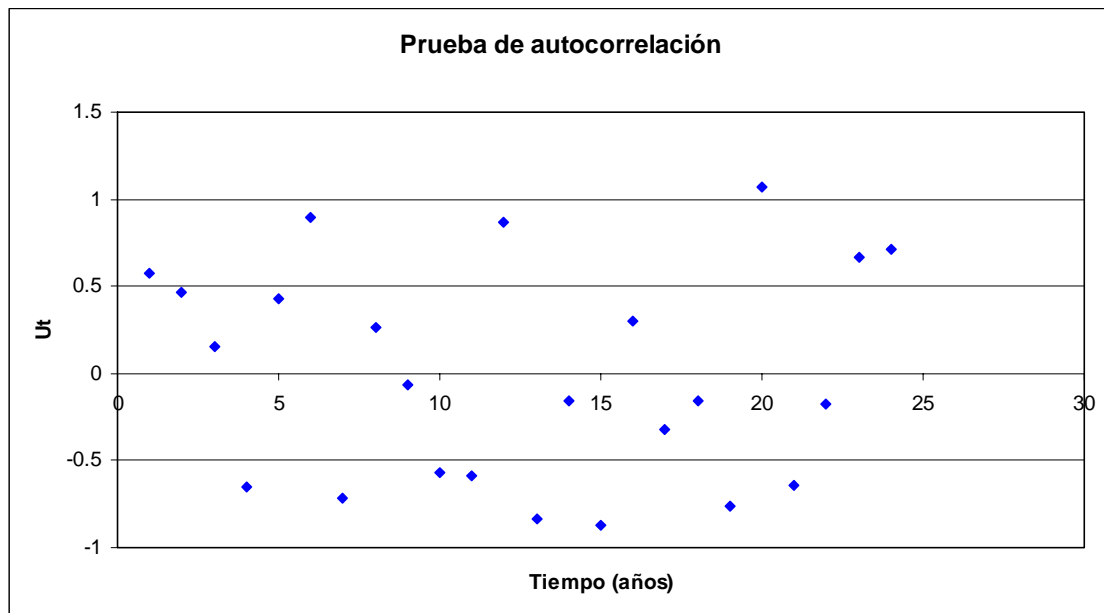


Figura 5.6 Prueba de autocorrelación-modelo 1 de crecimiento de altura

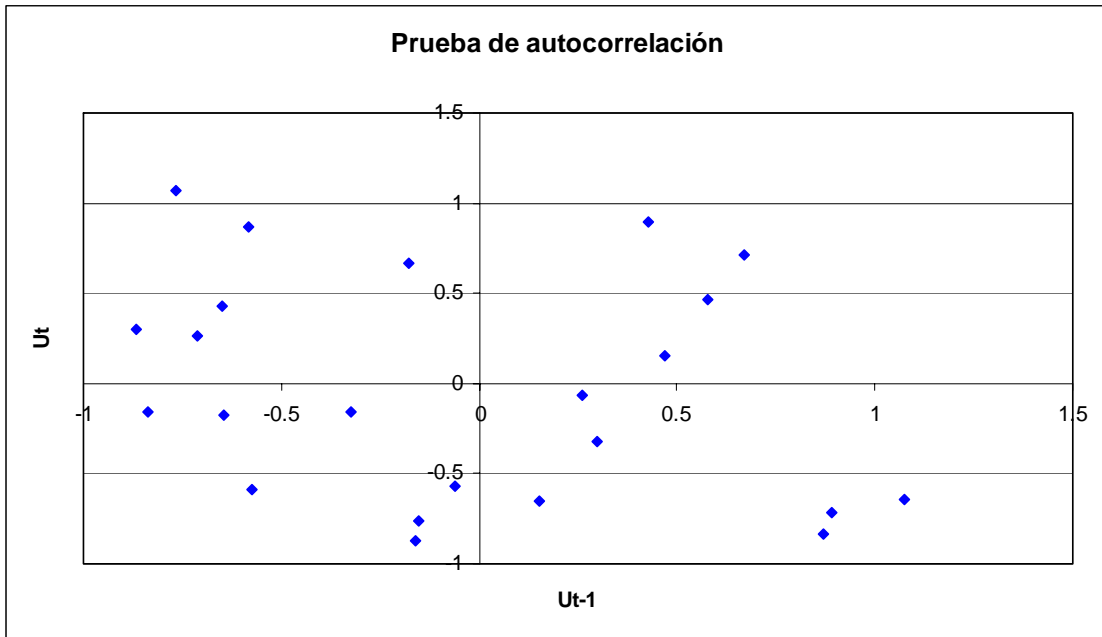


Figura 5.7 Prueba 2 de autocorrelación-modelo 1 de crecimiento de altura

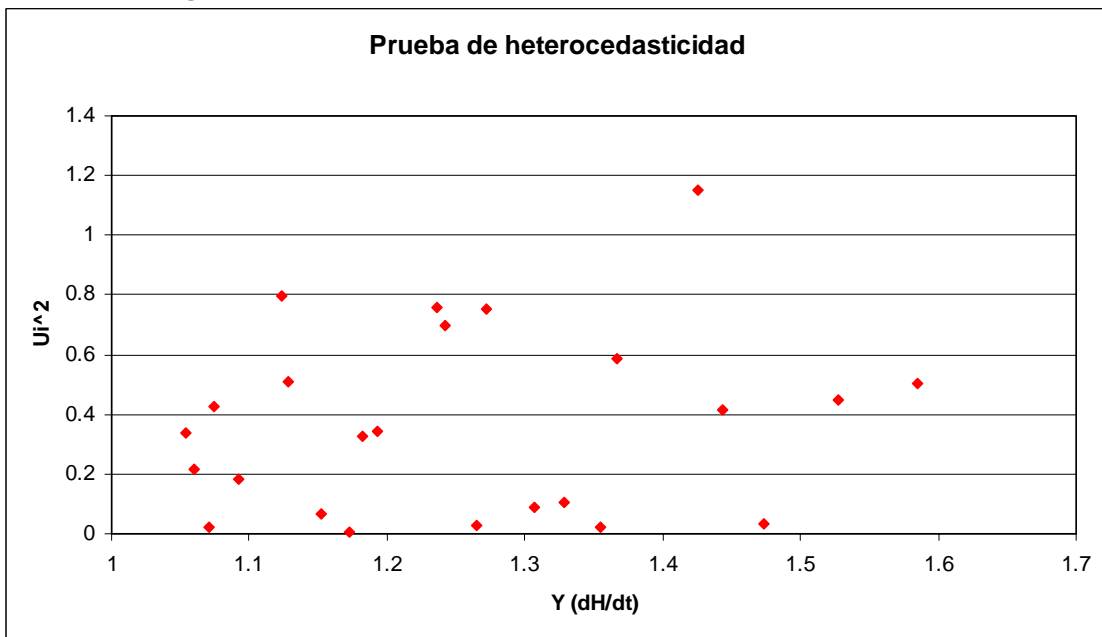


Figura 5.8 Prueba de heteroscedasticidad-modelo 1 de crecimiento de altura

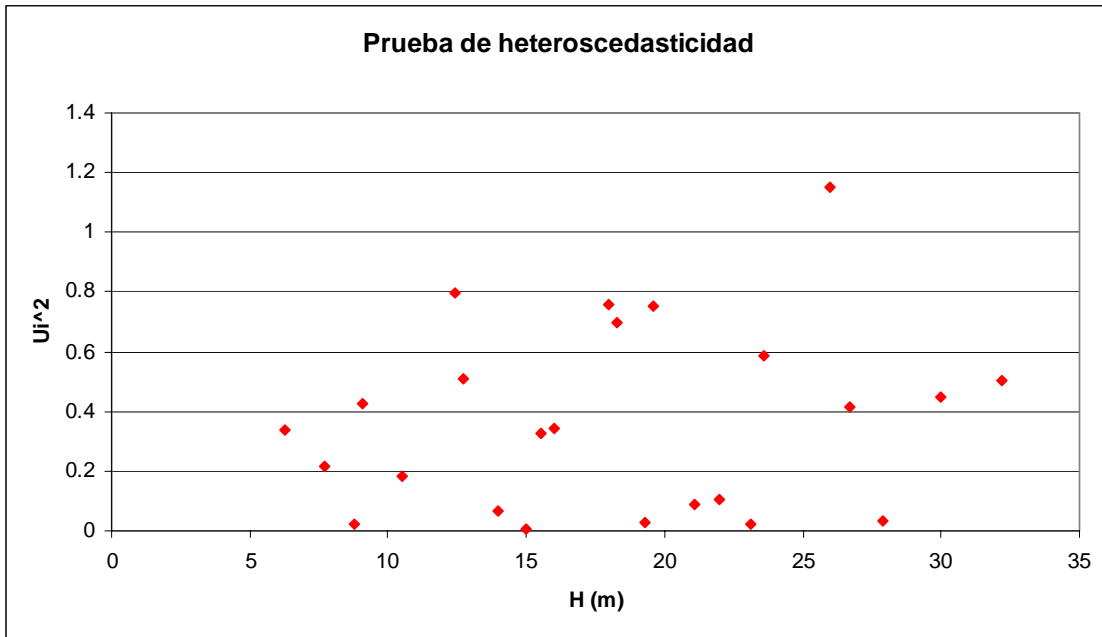


Figura 5.9 Prueba 2 de heteroscedasticidad-modelo 1 de crecimiento de altura

Para el modelo 2 de crecimiento en altura los resultados de la regresión son los siguientes:

Tabla 5.3 Resultados regresión modelo 2 de crecimiento en altura

Regression Statistics	
Multiple R	0.7929
R Square	0.6287
Adjusted R Square	0.6118
Standard Error	0.2795
Observations	24

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	2.9089	2.9089	37.2457	3.83591E-06
Residual	22	1.7182	0.0781		
Total	23	4.6270			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	3.0776	0.0719	42.81	1.1E-22	2.9285263	3.22670611
1/t	-1.6970	0.2781	-6.103	3.8E-06	-2.2737143	-1.1203541

A partir del resultado de la Tabla 5.3 se puede concluir que al hacer un análisis global del modelo de regresión (prueba F) bajo la hipótesis nula ($H_o = \beta_0 = \beta_1 = 0$) e hipótesis alterna ($H_a = \beta_0 \neq \beta_1 \neq 0$) se obtuvo un p-value (0.0004%) menor que el nivel de significancia escogido (5%), por lo que se puede concluir que a nivel global el modelo de regresión es

significativo (rechaza la H_0), así mismo al tener un coeficiente de determinación (R^2) de 0.628 indica que en un 62.8% de la variación total de la altura (variable dependiente) es explicada por el modelo de regresión.

A nivel de significancia individual de cada una de las variables independientes se tiene que el p-value (1.10E-20 % y 0.00038% respectivamente) para cada estadístico t es menor al nivel de significancia escogido (5%) por lo que se rechaza cada una de las hipótesis nulas ($H_0 = \beta_0 = 0$ y $H_0 = \beta_1 = 0$), y se comprueba la significancia estadística de cada parámetro estimado. También se puede concluir que con un 95% de confianza intervalos como (-2.27 a -1.12) contendrán el verdadero β_1 , así como intervalos entre (2.93 a 3.23) contendrán el verdadero β_0 .

5.1.3.2 Modelo crecimiento en diámetro a altura de pecho (DAP)

Se tienen los dos siguientes modelos de crecimiento de altura:

$$[1] \ln H = a_1 + a_2 \ln D$$

$$[2] H = a_1 + a_2 \left(\frac{1}{D} \right)$$

Los resultados obtenidos para cada uno de los modelos estudiados se presentan a continuación:

Tabla 5.4 Resultado regresión modelo 1 DAP

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.663
R Square	0.440
Adjusted R Square	0.413
Standard Error	5.369
Observations	23

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	475.794	475.794	16.507	0.0006
Residual	21	605.310	28.824		
Total	22	1081.104			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	22.87	1.52	15.02	1.0534E-12	19.70	26.04
1/D	-45.02	11.08	-4.06	0.0006	-68.07	-21.98

A partir del resultado de la Tabla 5.4 se puede concluir que al hacer un análisis global del modelo de regresión (prueba F) bajo la hipótesis nula ($H_o = a_1 = a_2 = 0$) e hipótesis alterna ($H_a = a_1 \neq a_2 \neq 0$) se obtuvo un p-value de 0.05% menor que el nivel de significancia escogido (5%), por lo que se puede concluir que a nivel global el modelo de regresión es significativo (rechaza la H_0).

A nivel de significancia individual de cada una de las variables independientes se tiene que el p-value (1.05E-10 % y 0.05% respectivamente) para cada estadístico t es menor al nivel de significancia escogido (5%) por lo que se rechaza cada una de las hipótesis nulas ($H_o = a_1 = 0$ y $H_o = a_2 = 0$), y se comprueba la significancia estadística de cada parámetro estimado. También se puede concluir que con un 95% de confianza intervalos como (19.7 a 26.04) contendrán el verdadero a_1 , así como intervalos entre (-68.07 a -21.98) contendrán el verdadero a_2 .

A partir del resultado de la Tabla 5.5 se puede concluir que al hacer un análisis global del modelo de regresión (prueba F) bajo la hipótesis nula ($H_o = a_1 = a_2 = 0$) e hipótesis alterna ($H_a = a_1 \neq a_2 \neq 0$) se obtuvo un p-value (1.85E-7 %) menor que el nivel de significancia escogido (5%), por lo que se puede concluir que a nivel global el modelo de regresión es significativo (rechaza la H_0), así mismo al tener un coeficiente de determinación (R^2) de 0.827 indica que en un 82.7% de la variación total de la altura (variable dependiente) es explicada por el modelo de regresión.

A nivel de significancia individual de cada una de las variables independientes se tiene que el p-value (6.5E-7 % y 1.85E-7 % respectivamente) para cada estadístico t es menor al nivel de significancia escogido (5%) por lo que se rechaza cada una de las hipótesis nulas ($H_o = a_1 = 0$ y $H_o = a_2 = 0$), y se comprueba la significancia estadística de cada parámetro estimado. También se puede concluir que con un 95% de confianza intervalos como (1.08 a 1.71) contendrán el verdadero a_1 , así como intervalos entre (0.43 a 0.66) contendrán el verdadero a_2 .

Tabla 5.5 Resultado regresión modelo 2 DAP

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.909
R Square	0.827
Adjusted R Square	0.819
Standard Error	0.173
Observations	23

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	3.015	3.015	100.519	1.852E-09
Residual	21	0.630	0.030		
Total	22	3.645			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	1.40	0.15	9.32	6.501E-09	1.08	1.71
ln D	0.54	0.05	10.03	1.852E-09	0.43	0.66

5.1.4 Factores condicionantes

Los factores condicionantes se refieren a los factores que limitan o llegan a impedir la arborización o la instalación de una especie de árbol en alguna localización determinada. Pueden ser factores condicionantes naturales, ambientales y artificiales, que a su vez pueden ser de carácter físico o institucional (normas legales o políticas de cara.

5.1.4.1 Precipitación total anual

La precipitación total anual es un condicionante de importancia para la supervivencia de los árboles. Aunque la disponibilidad de agua para un árbol sembrado en una región geográfica definida, no sólo está determinada por el suministro (precipitación), sí es un factor de alto peso en ésta disponibilidad. Para muchas especies de árboles se conoce el rango de precipitación en el cual usualmente se encuentran o en el cual logran sobrevivir.

Bogotá presenta un ciclo bimodal de lluvias siendo marzo, abril y mayo los meses del primer periodo de invierno y octubre y noviembre los del segundo periodo de invierno. Las máximas precipitaciones ocurren en los meses de abril y octubre. Los meses secos son enero, febrero, junio, julio, agosto y septiembre. Entre abril y mayo se estima que ocurre el

24.4% de la lluvia anual. Entre octubre y noviembre se estima que cae un 28.6% de la lluvia anual. El periodo seco de mitad de año es más fuerte que el de final y comienzo de año. El régimen bimodal es válido prácticamente para toda la ciudad de Bogotá y es el propio de la cuenca media del río Magdalena. Hacia el suroriente de la ciudad el régimen de lluvias es más parecido al de la vertiente oriental de la cordillera oriental por su mayor proximidad a la cuenca del Orinoco. Este régimen comprende un solo periodo lluvioso de abril a noviembre y un periodo seco de diciembre a marzo.

La precipitación promedio anual en Bogotá se encuentra entre 563.3mm y 1294.4mm. En el primer periodo de invierno del año, las precipitaciones mensuales se encuentran entre 73mm y 160.7mm. En el segundo periodo la precipitación se encuentra entre 72.4 y 202.7mm. Los valores más altos de precipitación anuales ocurren en las estaciones de los cerros orientales. Los valores más bajos ocurren hacia el occidente y suroccidente. En el suroccidente en los sectores del Tunjuelo, Sierra Morena, Venecia y sur de Bosa los valores de precipitación anuales se encuentran por debajo de 600mm. La mayor parte de la ciudad se encuentra en el rango entre 700 y 1000mm.

De la Figura 5.10 se puede observar un mapa temático dividiendo la ciudad y zonas aledañas en 8 zonas, donde se distribuye la precipitación en franjas de isoyetas cada 100mm. En éste mapa se observa que la mayor parte de la ciudad de Bogotá se encuentra en el rango de 801-1000 mm/año. Los extremos más bajos (600-700mm) se encuentran en la zona de Soacha, Bosa, Fontibón y lo mismo al norte en una pequeña zona del Parque Sopló. Los extremos más altos (1101-1300 mm/año) se encuentran en la región de los cerros orientales.

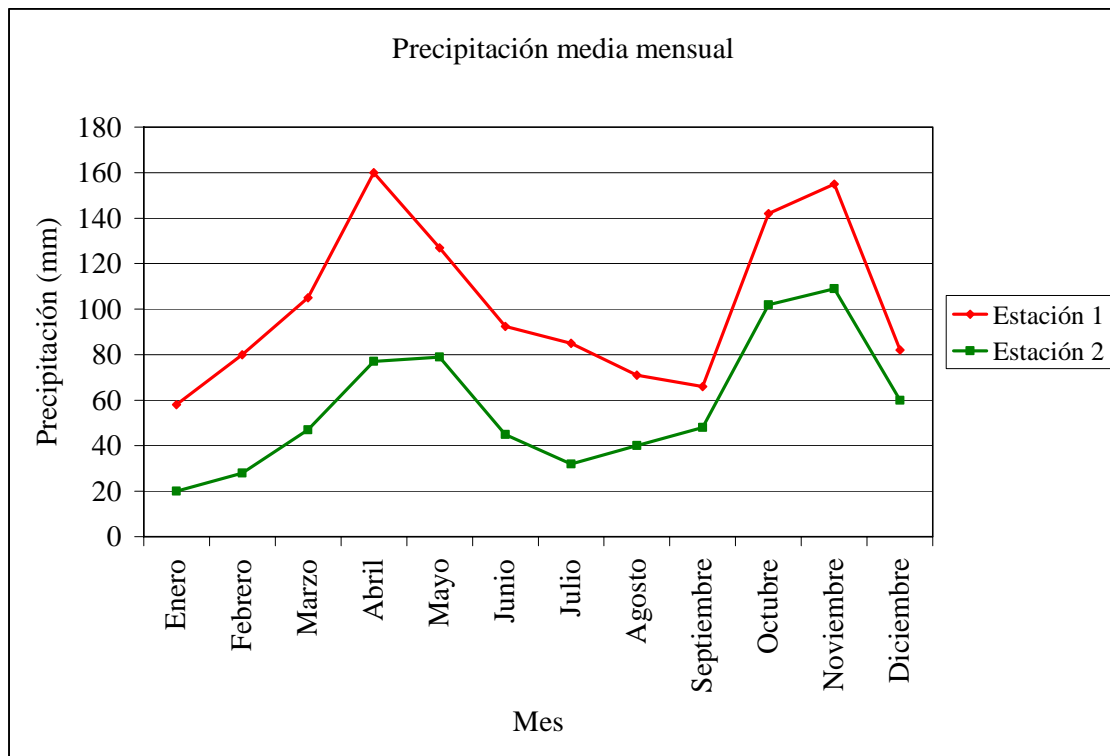


Figura 5.10 Precipitación media mensual

5.1.4.2 Suelos

En las ciudades la mayor parte del suelo está cubierta por cemento, asfalto o piedra. El suelo ha perdido su cobertura natural de vegetación y el intercambio natural de gases entresuelo y aire es reducido. Estos suelos pierden materia orgánica que no puede ser reintroducida. Los organismos del suelo mueren por falta de comida y de oxígeno. El proceso de construcción y el peso de los edificios compactan el suelo, lo cual restringe el flujo del agua en él. Los suelos de las ciudades usualmente son más compactos, cargados de agua, impermeables al flujo de agua y deficientes en materia orgánica.

Los suelos de la ciudad son un condicionante de importancia para la supervivencia de los árboles, pues no sólo son la base de soporte de los árboles, lo cual implica características físicas y dinámicas, sino que también son fuente de nutrientes y reservorio de agua para ellos. Todo lo anterior implica el conocimiento de no sólo que tipo de suelo existe en cada zona de la ciudad sino de las diferentes características físicas y químicas asociadas a dicho suelo.

En la ciudad de Bogotá se estableció un mapa de polígonos donde se detallan siete diferentes series de suelos:

- Serie Monserrate
- Serie Cruz Verde
- Serie Bojacá
- Suelos de los coluvios
- Serie Techo
- Serie Tibaitatá
- Serie Río Bogotá

Cada uno de los tipos de suelos anteriores comprende características químicas y físicas que lo describen. Las características asociadas a cada uno de los tipos de suelo son las siguientes:

- Fisiografía: quebrado, plano, ondulado.
- Pendiente: rango en porcentaje
- Textura: arena, arcilla, limo-arcilla, limo, roca
- Profundidad: superficial, poco profundo, moderado, profundo.
- Drenaje: pobre, moderado, rápido.
- Acidez: muy ácido, ácido, ligeramente ácido.
- Fertilidad: baja, moderada, alta.

La información correspondiente a los árboles respecto al tipo apropiado de suelos para su supervivencia indica el tipo de suelo que corresponde con lo presentado en la cobertura de tipos de suelo. El tipo de suelo ya implica las siete características asociadas. En la Tabla 5.6 se puede observar el mapa de zonificación de suelos para Bogotá en la forma como fue usada para constituir un factor condicionante. En la zona urbana se consideró que el suelo no es un suelo natural sino un suelo de relleno. Sin embargo, es posible que los suelos naturales se encuentren al excavar unos cuantos metros por debajo de la superficie urbana. Las siete series de suelos encontradas en la ciudad de Bogotá se pueden observar en la siguiente tabla, con sus siete parámetros más significativos:

Tabla 5.6 Tipos suelo Bogotá

MONSERRATE	<i>Fisiografía</i>	Quebrada	TECHO	<i>Fisiografía</i>	Plano
	<i>Pendiente</i>	>30% y >50%		<i>Pendiente</i>	<2%
	<i>Textura</i>	Arenas		<i>Textura</i>	Limo arcilla
	<i>Profundidad</i>	Superficial		<i>Profundidad</i>	Moderada
	<i>Drenaje</i>	Rápido		<i>Drenaje</i>	Pobre
	<i>Acidez</i>	Muy ácido		<i>Acidez</i>	Ácidos
	<i>Fertilidad</i>	Baja		<i>Fertilidad</i>	Moderada
CRUZ VERDE	<i>Fisiografía</i>	Quebrada	TIBAITATA	<i>Fisiografía</i>	Plana
	<i>Pendiente</i>	12-30%		<i>Pendiente</i>	<1%
	<i>Textura</i>	Arcilla		<i>Textura</i>	Arcillas
	<i>Profundidad</i>	Profundos		<i>Profundidad</i>	Variable
	<i>Drenaje</i>	Moderado		<i>Drenaje</i>	Moderado
	<i>Acidez</i>	Muy ácidos		<i>Acidez</i>	Ligeramente ácidos
	<i>Fertilidad</i>	Baja		<i>Fertilidad</i>	Alta
BOJACA	<i>Fisiografía</i>	Ondulado	RIO BOGOTÁ	<i>Fisiografía</i>	Plana
	<i>Pendiente</i>	7-30%		<i>Pendiente</i>	
	<i>Textura</i>	Arcilla		<i>Textura</i>	Arcilla
	<i>Profundidad</i>	Profundos		<i>Profundidad</i>	Poco profundo
	<i>Drenaje</i>	Moderado		<i>Drenaje</i>	Pobre
	<i>Acidez</i>	Muy ácidos		<i>Acidez</i>	Ligeramente ácido
	<i>Fertilidad</i>	Baja		<i>Fertilidad</i>	Moderada
COLUVIOS	<i>Fisiografía</i>	Ondulado	TABLA CLASIFICACIÓN SUELOS BOGOTÁ		
	<i>Pendiente</i>	<12%			
	<i>Textura</i>	Arenas			
	<i>Profundidad</i>				
	<i>Drenaje</i>	Rápido			
	<i>Acidez</i>	Ácidos			

Con la información existente en la ficha y con el conocimiento y experiencia de los expertos se calificó cada serie de suelos, para cada especie. La calificación encontrada fue de 0 a 5, donde 5 corresponde a un suelo excelente para una especie, 4 es buen suelo, 3 es regular, 2 es malo, 1 es muy mal suelo y 0 califica a un suelo que no es viable naturalmente para una especie.

La calificación necesariamente se debe hacer teniendo en cuenta todas las siete características predominantes de manera integral y no por separado puesto que los suelos

son unidades complejas y únicas que no son el producto de la suma de algunos parámetros. Además, no existen datos suficientes para las especies donde se especifique cada uno de los siete parámetros de las series de suelos por separado, para todas las especies.

5.1.4.3 Brillo Solar

La luz solar es indispensable para el desarrollo de la fotosíntesis y por lo tanto para el crecimiento de las plantas. Algunas veces el crecimiento de una planta puede estar limitado por la cantidad de luz y no por la disponibilidad de agua. Los árboles además, se clasifican en diferentes tipos según la cantidad e intensidad de luz solar que requieran. Algunos árboles gustan de la sombra y requieren de árboles grandes que puedan aportarla. Otras especies gustan de mucha luz solar y crecen de mejor forma si disponen de ella. El brillo solar fue considerado un condicionante ambiental para el crecimiento de polígonos con tres rangos y clasificaciones de brillo solar que coinciden con la clasificación de los árboles en tres tipos. Los rangos para brillo solar considerados son los siguientes:

- Brillo solar bajo: menor a 1343 horas/año
- Brillo solar medio: 1343-1498 horas año
- Brillo solar alto: mayor o igual a 1498 horas/año

Se realizó un mapa de la ciudad de Bogotá de las diferentes intensidades de brillo solar medido a partir del número de horas de brillo solar promedio anual. La justificación para tener en cuenta este factor se basa en que en la ciudad existen diferencias para este, aunque si bien no es determinístico, ni de gran peso, si es una variable que suma o resta beneficios significativos de número de horas para generar tres zonas diferenciadas en la ciudad con alto, medio y bajo brillo solar.

La anterior zonificación se puede observar en la Figura 5.11 Valores medios de brillo solar multianuales. En éste mapa se observa que la mayor parte de la ciudad se encuentra en el rango medio. El rango bajo ocurre en el sur oriente de la ciudad y en los cerros orientales, debido a una mayor nubosidad y el rango alto incluye el sur de la ciudad (Bosa y Soacha).

En la Figura 5.11 se puede observar los valores medios de brillo solar multianuales, el cual tiene un comportamiento acorde con el ciclo bimodal de las lluvias. En los meses en que la precipitación es mayor, las horas de brillo solar diarias efectivas disminuyen debido a la nubosidad (abril, mayo, octubre y noviembre). En estos meses de invierno las horas de brillo solar mensuales están entre 71.1 y 130.3. En los meses de verano el número de horas de sol mensuales está entre 119.2 y 191.4.

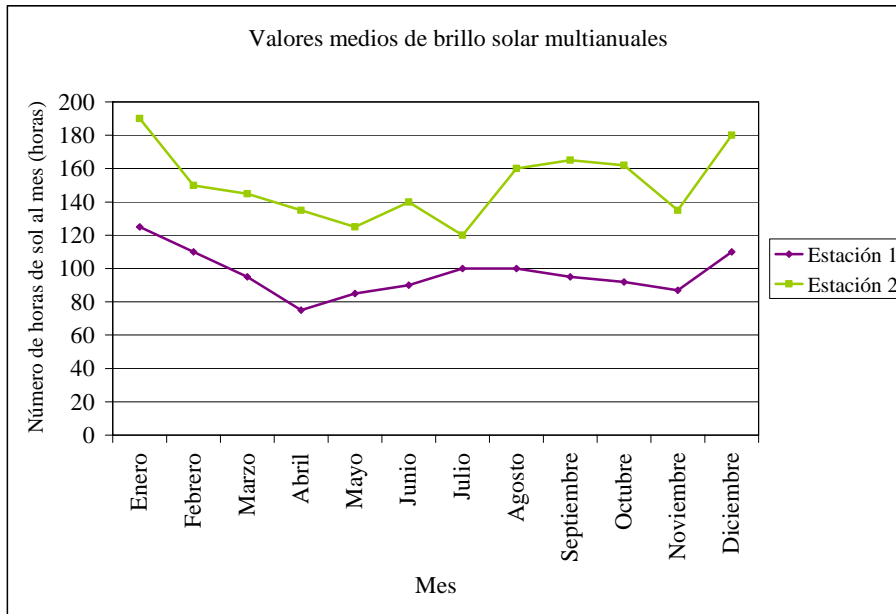


Figura 5.11 Valores medios de brillo solar multianuales

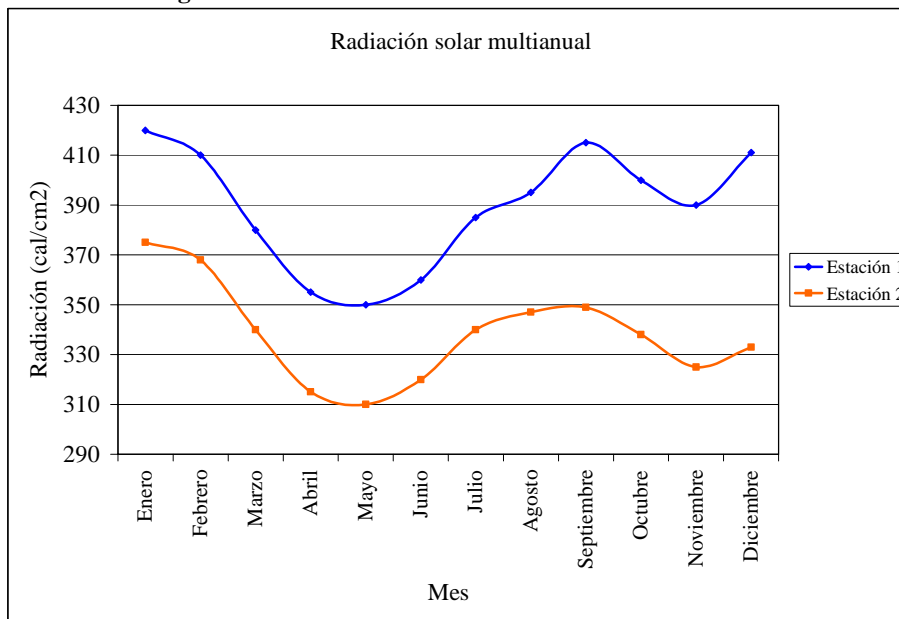


Figura 5.12 Radiación solar multianual

En cuanto a las especies están clasificadas como heliófitas (aquellas especies que prefieren desarrollarse a plena exposición solar), semiumbriófilas (especies con indiferencia en cuanto a brillo solar pero que no están cómodas en los extremos) y umbriófilas (especies que prefieren la sombra para un mejor desarrollo).

Las especies umbriófilas, se desarrollan mejor en los sitios donde existe menor brillo solar y las especies semiumbriófilas en los sitios de medio brillo solar.

Las especies heliófitas que requieren de brillo solar alto tienen un comportamiento excelente en donde el brillo solar es alto; en donde el brillo solar es medio su comportamiento es bueno y en donde el brillo solar es bajo su comportamiento es regular. Es importante aclarar que el comportamiento no es malo en ningún caso puesto que esta variable o factor condicionante no es crítico, pero sí importante.

5.1.4.4 Clima

La temperatura sigue un régimen térmico bimodal. Las temperaturas promedio máximas se presentan en los meses de invierno como marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. Lo anterior se debe a los bajos valores en las temperaturas que se presentan en las horas de la noche en los meses de verano. En los meses de verano en que el cielo está despejado, las temperaturas son más altas durante el día pero la tendencia a la ocurrencia de heladas es mayor debido a la más rápida pérdida del calor de la superficie de la tierra, esto ocasiona temperaturas menores en la noche en los meses de verano que bajan los promedios diarios con relación a los meses de invierno.

Los valores máximos son los valores de temperatura más altos registrados para cada mes. Se presentan en diciembre, enero o marzo y están entre 18.7 °C y 21.4°C. Las temperaturas mínimas absolutas mensuales siguen una tendencia bimodal con las temperaturas más altas en los meses de invierno (abril, mayo, junio, octubre y noviembre). Las temperaturas mínimas más altas se presentan en mayo con valores entre 4.3°C y 7.3°C. Las temperaturas mínimas más bajas se presentan en diciembre, enero, febrero y septiembre con valores que se encuentran entre 1.6°C y 6.3°C. Las estaciones con temperaturas mínimas más altas son las estaciones con temperaturas medias y máximas más bajas, esto debido a la tendencia al

enfriamiento más rápido de la superficie terrestre en horas de la noche, en zonas en que se ha presentado un periodo diurno con baja nubosidad y por lo tanto mayor radiación solar y temperatura.

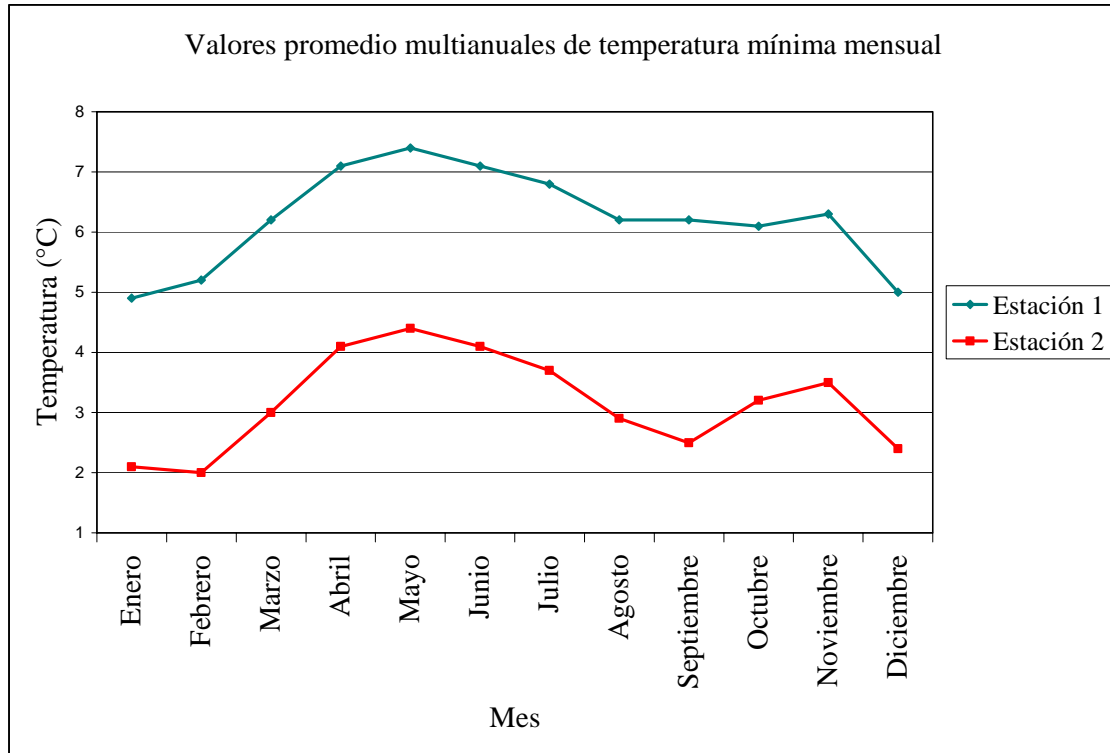


Figura 5.13 Valores multianuales de temperatura mínima mensual

Las temperaturas diarias en Bogotá tienen amplitudes de hasta 27°C. La amplitud corresponde a la diferencia entre el máximo absoluto y el mínimo absoluto a nivel diario. Los valores mínimos se presentan en las horas de la madrugada y en las primeras horas de la mañana. Los valores máximos se presentan entre las 12 y las 14 horas.

Las temperaturas promedio máximas se presentan en los meses de invierno como marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. En los meses de invierno las temperaturas medias se encuentran entre 11.7°C y 14.9°C. En los meses de verano las temperaturas medias se encuentran entre 10.95°C y 14.5°C presentándose los menores valores en julio.

Los valores máximos son los valores de temperatura más altos registrados para cada mes. Se presentan en diciembre, enero o marzo y están entre 18.7°C y 23.5°C. Las temperaturas

máximas descienden drásticamente en el mes de julio para localizarse en un rango de 16.9°C a 21.4°C.

Las temperaturas mínimas más altas se presentan en mayo con valores entre 4.3°C y 7.3°C. Las temperaturas mínimas más bajas se presentan en diciembre, enero, febrero y septiembre con valores que se encuentran entre 1.6°C y 6.3°C.

5.1.4.5 Ocurrencia de heladas

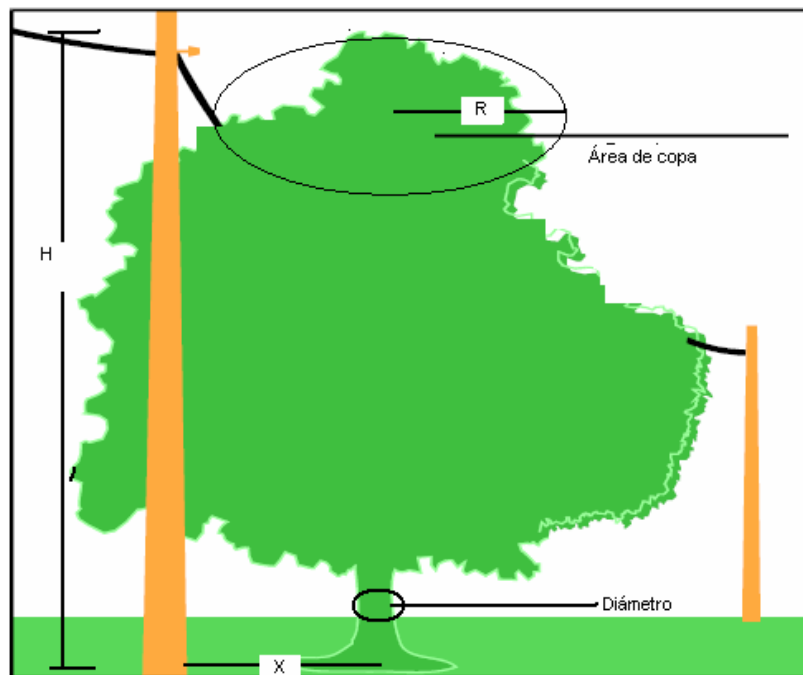
En Bogotá existen zonas con ocurrencia de heladas por mínimas temperaturas en ciertas horas y de manera repetitiva y existen otras zonas sin presencia o con mínima repetición. Se generó un mapa temático donde se dividió la ciudad en dos grandes zonas: con ocurrencia significativa de heladas (menor o igual a 0.5°C) o sin ocurrencia significativa (mayor que 0.5°C). Las especies presentan datos al respecto de resistente o no resistente, pero en algunos casos medianamente resistentes a este factor condicionante.

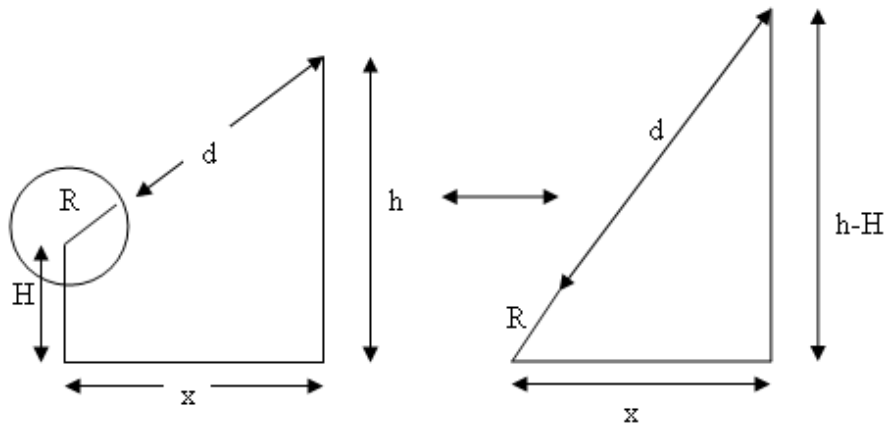
5.2 MODELO DE CONFIABILIDAD

Al considerar el problema de confiabilidad es necesario determinar diferentes variables de interés tales como distribución de vida o de fallas, tasa de fallas, disponibilidad, mantenibilidad etc., así la confiabilidad se puede definir en términos probabilísticas como la probabilidad de un componente, dispositivo o sistema para realizar su función adecuadamente durante el periodo de tiempo deseado y bajo condiciones encontradas. Significa que el componente o sistema debe funcionar adecuadamente en el intervalo de tiempo $[0, t]$.

Una vez obtenido los distintos modelos de crecimiento de la vegetación es necesario establecer una metodología que permita establecer cuándo hay contacto de una determinada especie con una de las fases de la línea de distribución y así mismo la probabilidad de falla, esto con el fin de establecer el periodo de mantenimiento. A continuación se presenta los pasos de la metodología utilizada.

1. Se obtiene la distancia entre el conductor y el árbol a través de su área de copa. Para ello se tiene el siguiente modelo geométrico:





Donde:

H: Altura del árbol

R: Radio de copa del árbol

x: Distancia entre poste de red y el árbol

h: Altura de la red eléctrica

d: Distancia entre el conductor y el radio de copa del árbol.

Por lo tanto,

$$(d + R)^2 = x^2 + (h - H)^2$$

2. La altura del árbol (H) se obtiene a partir del modelo de crecimiento de ésta variable

(3). El radio del área de copa (R) se obtiene de la siguiente relación:

$$A = \text{Largo}_{\text{copa}} \times \text{Ancho}_{\text{copa}} \approx \text{Ancho}_{\text{copa}}^2 \approx (2R)^2$$

Donde:

A: Área de copa

Por lo tanto, de (9) se tiene que:

$$R \approx \frac{A^{1/2}}{2}$$

El área de copa (A) se encuentra a partir del modelo ya establecido (7), el cual depende del (DAP) y éste último de la altura (6), por lo que se utilizan cada uno de los tres modelos (altura, DAP y área de copa) de manera consecutiva.

3.El siguiente paso consiste en asignar las probabilidades de falla a partir de la distancia d entre el conductor y el radio de copa del árbol. Para ello se tiene en cuenta el concepto sobre el nivel de aislamiento eléctrico de una línea.

El voltaje de resistencia eléctrica se define como aquel valor de voltaje cuya única aplicación no causa descarga disruptiva, se caracteriza como una variable aleatoria con un valor medio (Critical flashover voltage, CFO) y por alguna medida de dispersión que es generalmente la desviación normal. El objetivo del diseño de aislamiento es asegurar que éste tiene una rigidez dieléctrica suficiente para resistir los esfuerzos, los cuales serían en éste caso el contacto con la vegetación que puede producir corto circuito.

La función de distribución de descarga disruptiva para un valor de voltaje está definida por:

$$P(V) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^y e^{-z^2/2} dz$$

Donde:

$$Z = \frac{V_c - CFO}{\sigma}$$

σ : Desviación estándar

V_c : Voltaje de cresta

$$V_c = \frac{V_{\text{nominal}} \times \text{factor} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Por lo tanto, en primer lugar, se obtiene el valor del CFO a partir de su relación con la distancia (d) de espaciamiento alrededor de la línea:

$$CFO = \frac{d - k_1}{k_2}$$

4.Posteriormente se calcula el valor de z para obtener la probabilidad de falla $P(z)$ de la distribución normal.

La muestra de manera esquemática el proceso descrito anteriormente para realizar la asignación de las probabilidades de falla del sistema causadas por el contacto de la vegetación.

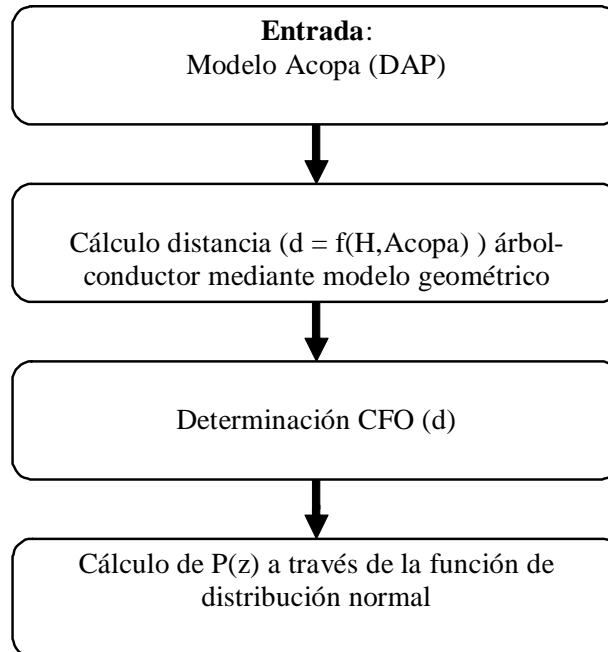


Figura 5.14 Proceso de obtención de las probabilidades de falla

5.3 MODELO DE COSTOS

Un programa de mantenimiento preventivo diseñado cuidadosamente es beneficioso por la disponibilidad que se tiene del sistema, que se representa en menores costos comparado con el mantenimiento correctivo. El objetivo de un programa de mantenimiento preventivo es el de reducir al mínimo el costo de interrupción (determinado en los indicadores de calidad del servicio FES y DES) o reducir al mínimo el tiempo que transcurre antes de iniciar la reparación del sistema. Para alcanzar una o ambas metas, los intervalos de tiempo para realizar el mantenimiento preventivo se deben determinar con base en las ya determinadas probabilidades de falla causadas por la vegetación.

Los costos de mantenimiento correctivo aumentan mientras que el intervalo del mantenimiento aumenta. Esto es porque la probabilidad de la falla aumenta más mientras más tiempo transcurre para realizar un mantenimiento correctivo. Por otro lado, los costos de mantenimiento preventivo disminuyen mientras que el intervalo del tiempo aumenta. Esto es porque cuanto más tiempo transcurre, poco son los reemplazos o reparaciones que se realizan. Debido a lo anterior es necesario determinar un costo mínimo de mantenimiento correctivo y preventivo.

5.3.1 Determinación del periodo de mantenimiento

Bajo una política de reemplazo en la edad óptima, las unidades se substituyen cuando fallan o después del tiempo de operación, t , cualquiera ocurra primero. El tiempo óptimo del reemplazo se determina minimizando la función de costo por unidad de tiempo, dada por Barlow:

$$CUT(t) = \frac{\text{Costo total de reemplazo esperado por ciclo}}{\text{Longitud de ciclo esperado}}$$

$$CUT(t) = \frac{C_{mp} \cdot R(t) + C_{mc} \cdot (1 - R(t))}{\int_0^t R(s) ds}$$

Donde:

C_{mp} : Costo de reemplazo previsto

C_{mc} : Costo de reemplazo no previsto

IEM-I-17-05

$R(t)$: Probabilidad de no falla sobre el tiempo

El intervalo óptimo del tiempo del reemplazo, t , que minimiza el costo por unidad de tiempo se determina hallando t de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial CUT(t)}{\partial t} = 0$$

6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La validación de la metodología para obtener las probabilidades de falla y por tanto el periodo de mantenimiento de la vegetación alrededor de las redes de distribución fue desarrollada para dos especies de la sabana de Bogotá: Eucalipto (Especie 1) y Aliso (Especie 2).

La Figura 6.1 muestra de manera esquemática el proceso para disminuir la incertidumbre en cuanto al control o poda periódico que se realiza sobre la servidumbre de las redes.

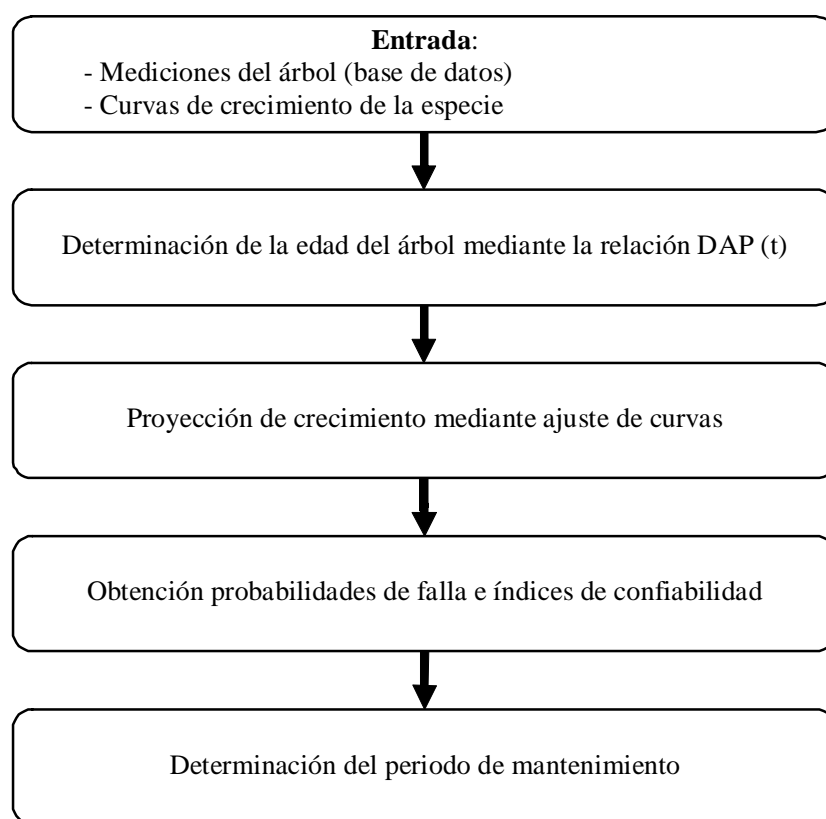


Figura 6.1 Flujograma metodología de validación

La Tabla 6.1 presenta una muestra de los datos obtenidos a partir de la estimación de cada uno de los parámetros de los modelos de regresión para la especie 1 y tomando un nivel de voltaje nominal de 13.8 kV y una desviación estándar del 5%.

Tabla 6.1 Muestra crecimiento estimado para la especie 2

Tiempo (t)	Altura (H)	DAP (D)	Acopa (A)	Radio (R)	Distancia (d)	CFO	z	Pfalla P(z)
años	m	cm	cm ²	cm	(cm)	kV		Prob.falla
0	0.010	6.28	75651.95	137.52	1161.51	6603.78	-19.13	0.00%
1	0.782	6.44	78773.78	140.33	1081.55	6148.82	-19.07	0.00%
2	1.886	6.68	83617.92	144.58	966.84	5496.22	-18.95	0.00%
3	3.122	6.97	89632.44	149.69	838.13	4763.91	-18.79	0.00%
4	4.418	7.30	96718.59	155.50	702.78	3993.92	-18.56	0.00%
5	5.733	7.67	104881.80	161.93	564.85	3209.17	-18.21	0.00%

La Figura 6.2 muestra la evolución en el tiempo del crecimiento en altura de las dos especies estudiadas. Mediante extrapolación se observa un incremento superior y de mayor rapidez en los valores estimados de la altura para la especie 1, el cual tiene una asíntota horizontal de aproximadamente 32 metros de altura.

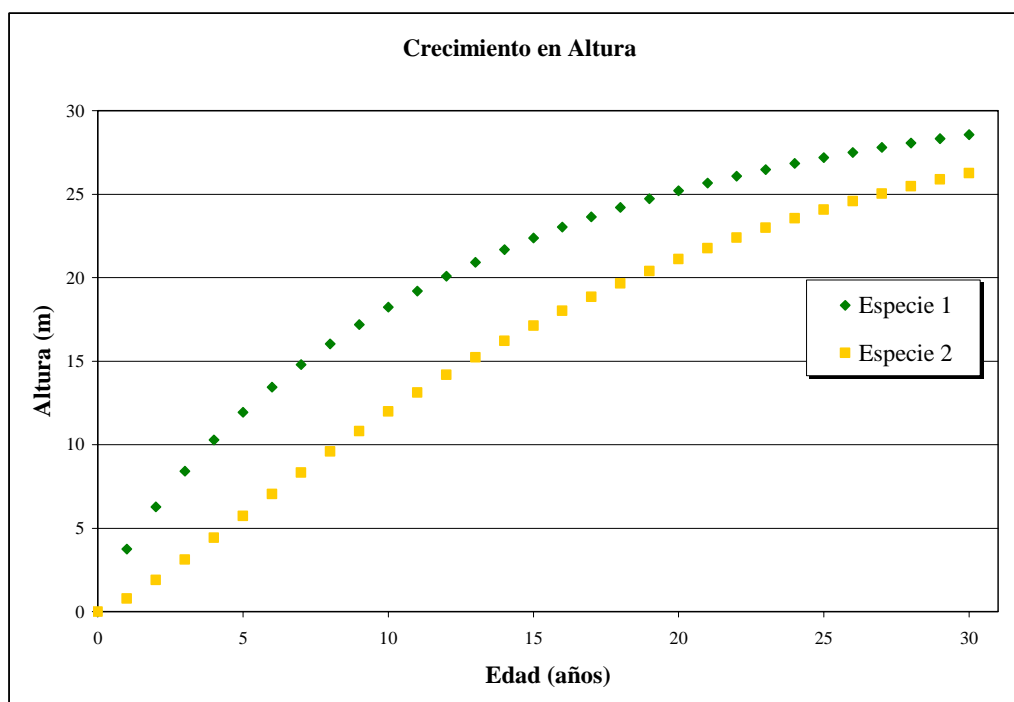


Figura 6.2 Evolución del crecimiento en altura

La relación DAP con respecto a la edad de la especie se presenta en la Figura 6.3. La relación entre el DAP y el área de copa (Figura 6.4) para la especie 2 tiene un rápido crecimiento especialmente después de un diámetro de 10 centímetros, esto debido

principalmente a la forma del modelo de regresión utilizada en el estudio, la cual no es asintótica para diámetros muy grandes.

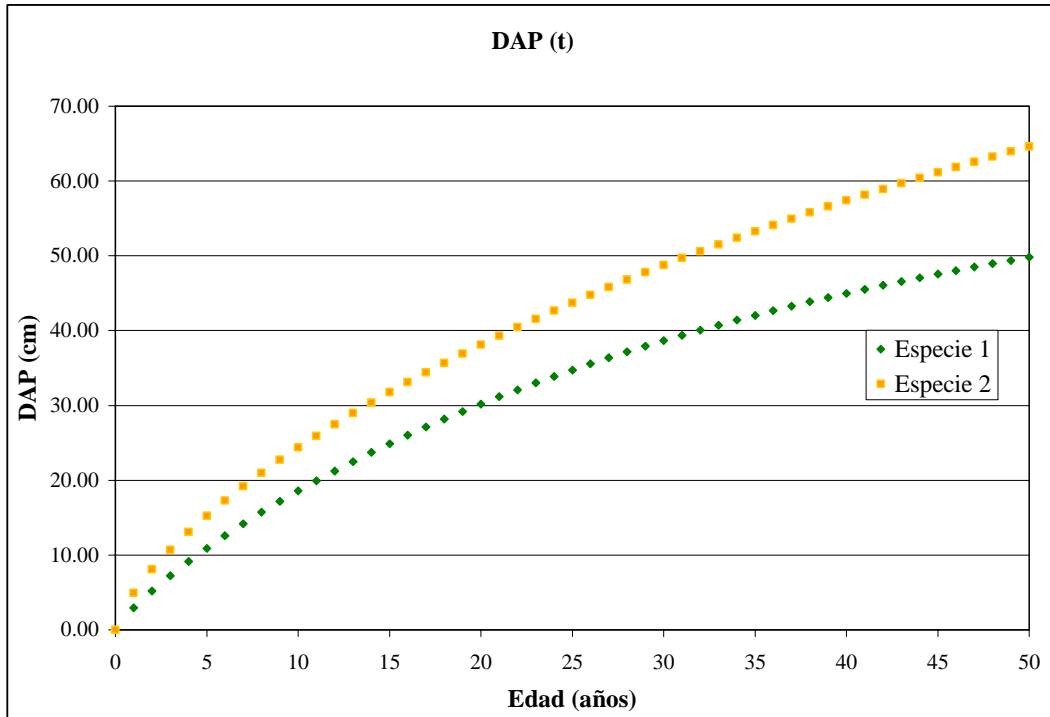


Figura 6.3 Evolución del crecimiento altura Vs. DAP

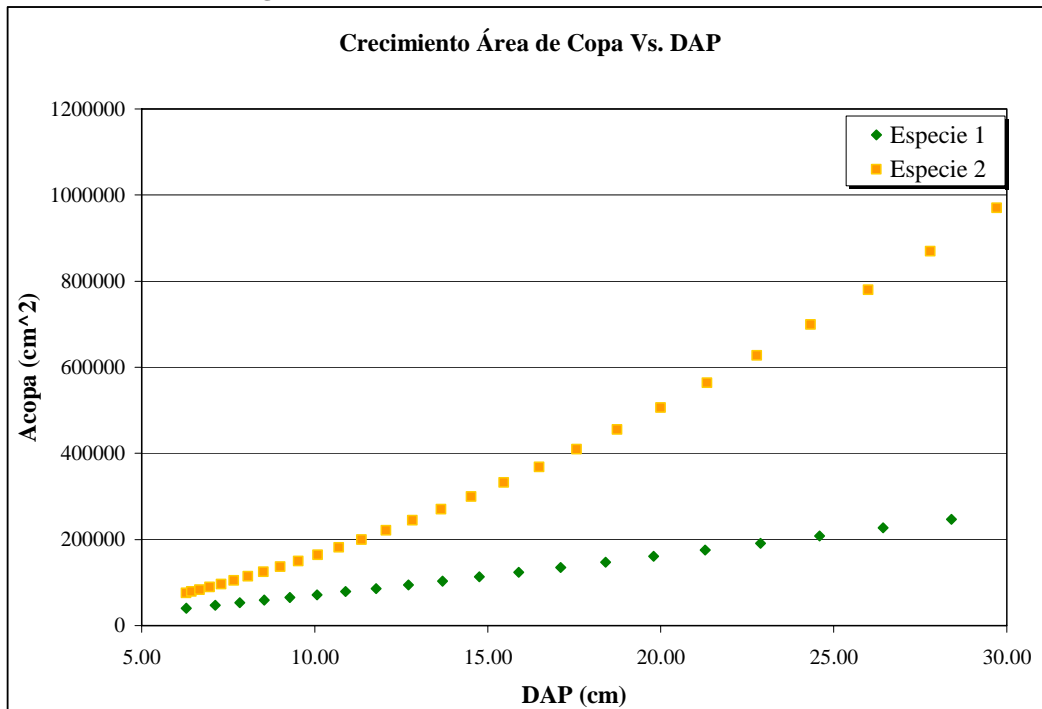


Figura 6.4 Evolución crecimiento área de copa Vs. DAP

Con las respectivas curvas estimadas de crecimiento de las especies se obtiene la información de la vegetación que existe alrededor de un determinado circuito mediante una base de datos sugerida (Tabla 6.2 Base de datos recomendada).

Tabla 6.2 Base de datos recomendada

Código árbol	Especie	Altura (m)	DAP (cm)	Distancia red (cm)	Circuito	Dirección
P032994	Eucalipto	10	43	15	CU11	Kr. 22 45-51
P033016	Aliso	10.25	22	10	CU11	Kr. 21 42-13
Subzona	IS	Tratamiento previo	Per. Interv. (meses)	Fecha	Tipo de tratamiento	
4	15	Si	9	02-Jun-03	Poda	
4	10	No	4	19-Ene-03	Poda	

Una vez se tengan las características reales del árbol se deben ubicar dichos datos en las respectivas curvas de crecimiento para realizar la proyección. Para ello es necesario conocer la edad de la especie estudiada mediante la relación DAP(t):

$$DAP(t) = A(1 \pm be^{-kt})^{1/(1-m)}$$

La Figura 6.5 y la Figura 6.6 presentan la proyección de crecimiento mediante ajuste de la curva para la especie 1 y la especie 2, respectivamente.

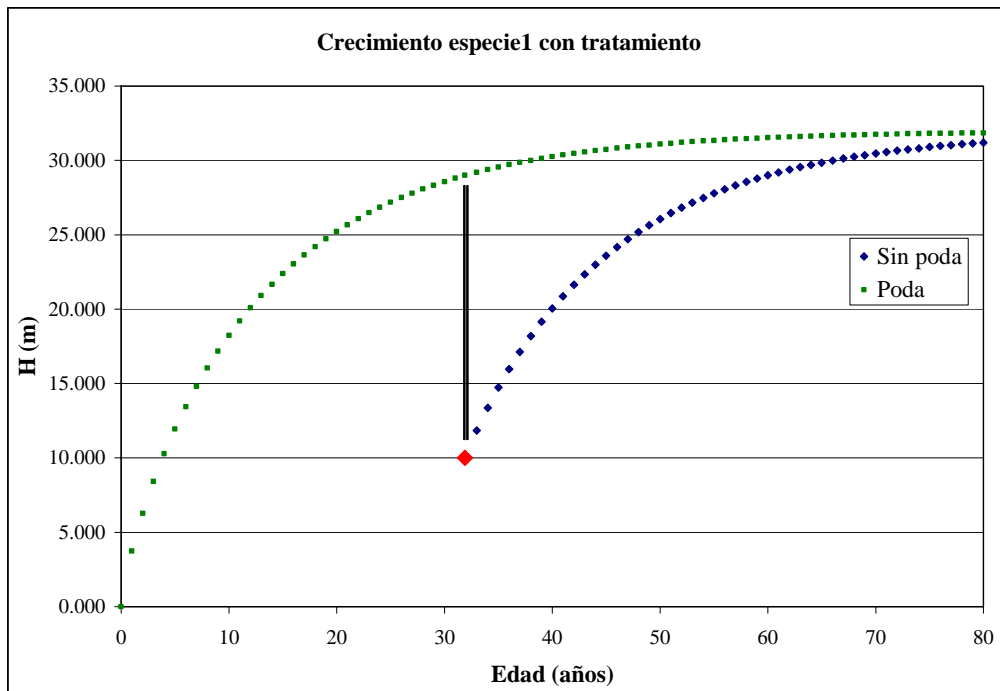


Figura 6.5 Crecimiento especie 1 con tratamiento

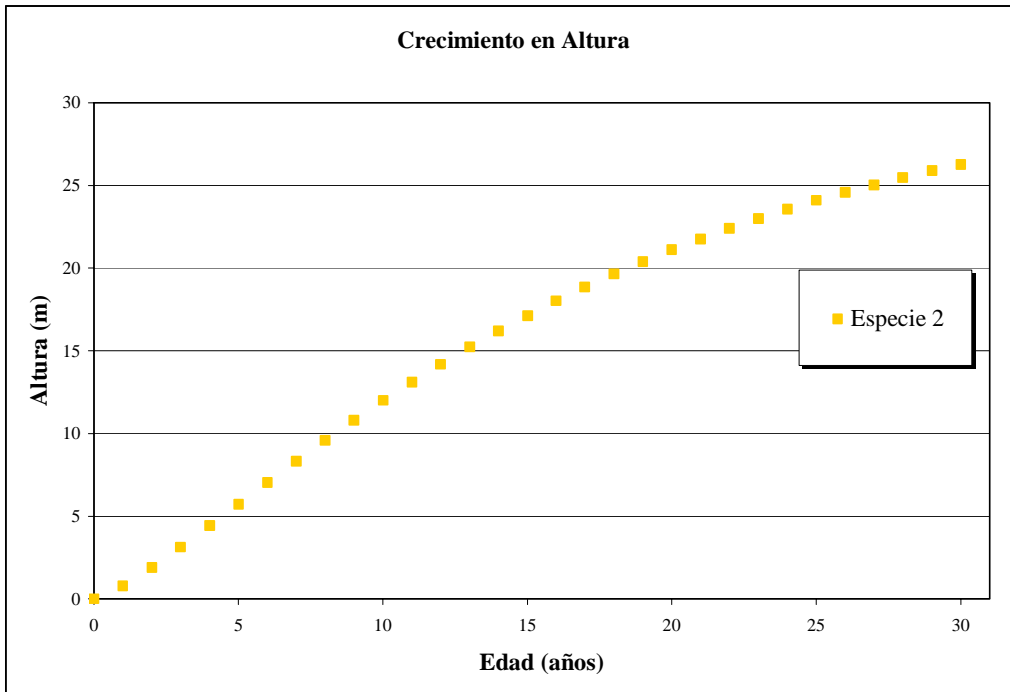


Figura 6.6 Crecimiento estimado especie 2

Al apreciar la evolución de la probabilidad de falla a través del tiempo de vida de las especies se observa de la Figura 6.7 que alrededor de los 9 meses se tiene el máximo incremento en la probabilidad de falla de la línea, mientras que para la especie 2 se tiene alrededor de los 4 meses (Figura 6.8).

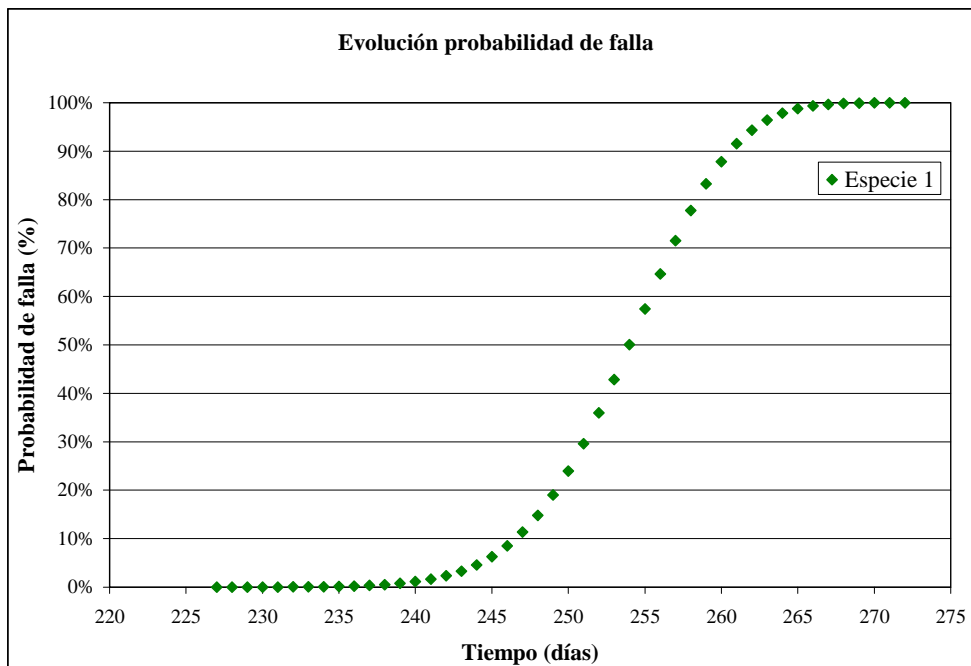


Figura 6.7 Evolución de la probabilidad de falla – especie 1

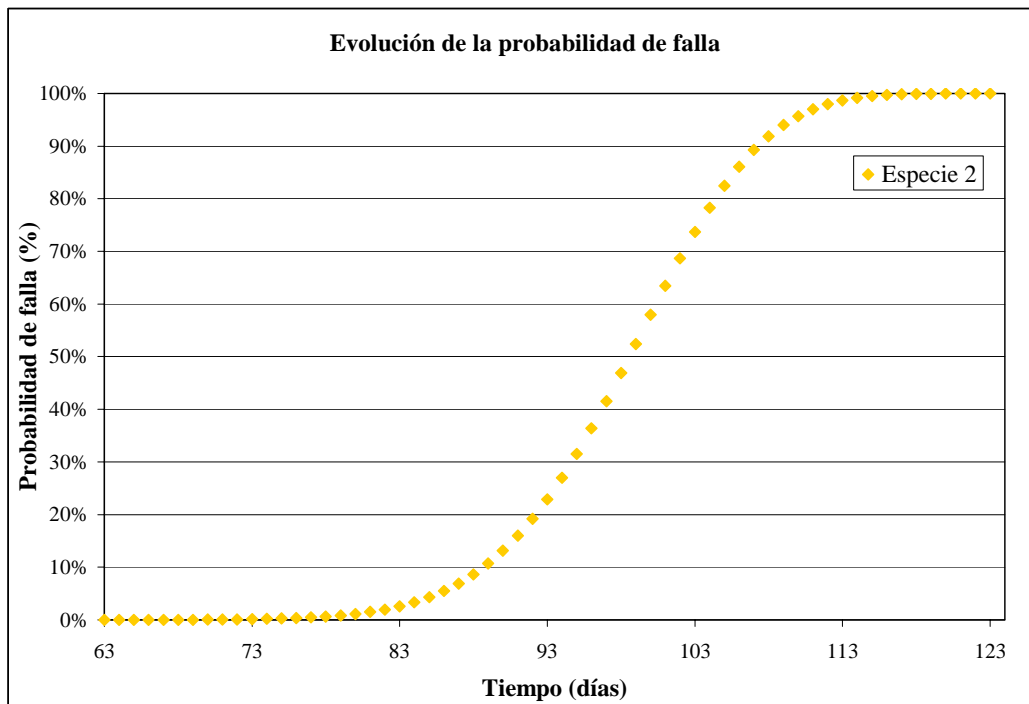


Figura 6.8 Evolución de la probabilidad de falla – especie 2

Con el fin de obtener la función de costos por unidad de tiempo (CUT) se realiza un ajuste a las respectivas curvas de las probabilidades de falla ($F(t)$) cuyo resultado es la siguiente función tipo sigmoide:

$$F(t) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-ct}}$$

Tabla 6.3 Resultado ajuste de curvas $F(t)$

Parámetros	Especie 1	Especie 2
a	1.016	1.016
b	4.65E+03	5.14E+09
c	0.302	0.226

Por lo tanto, la función de confiabilidad queda determinada por:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

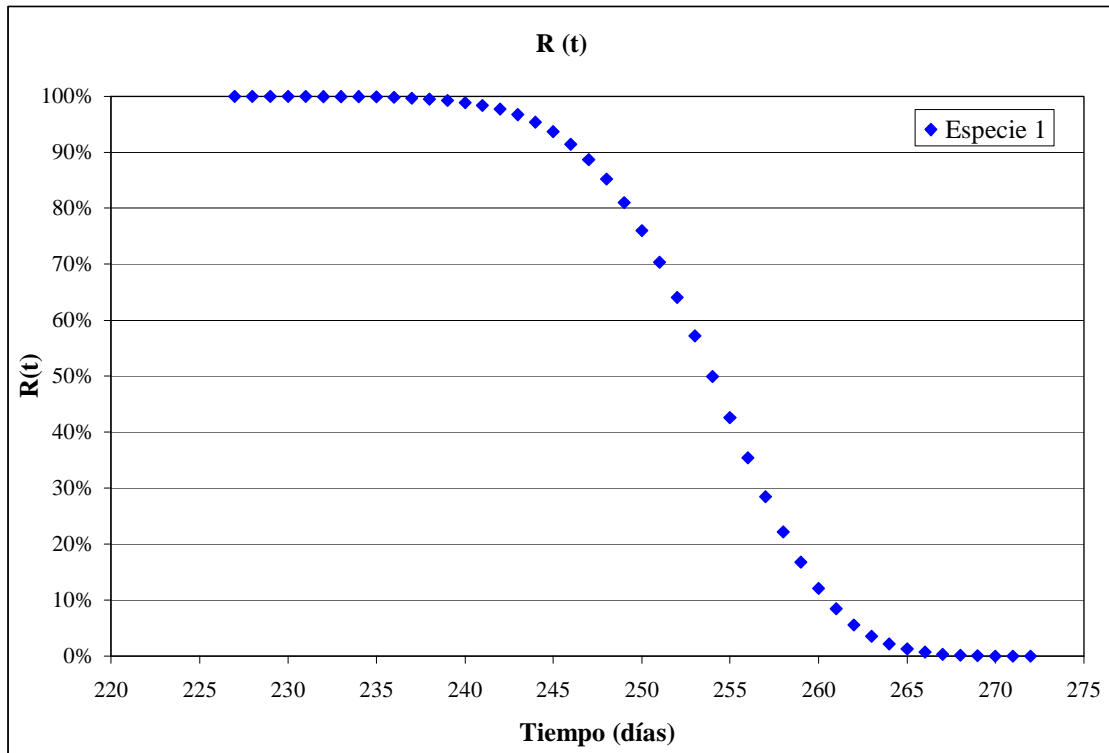


Figura 6.9 Función de confiabilidad $R(t)$ para la especie 1

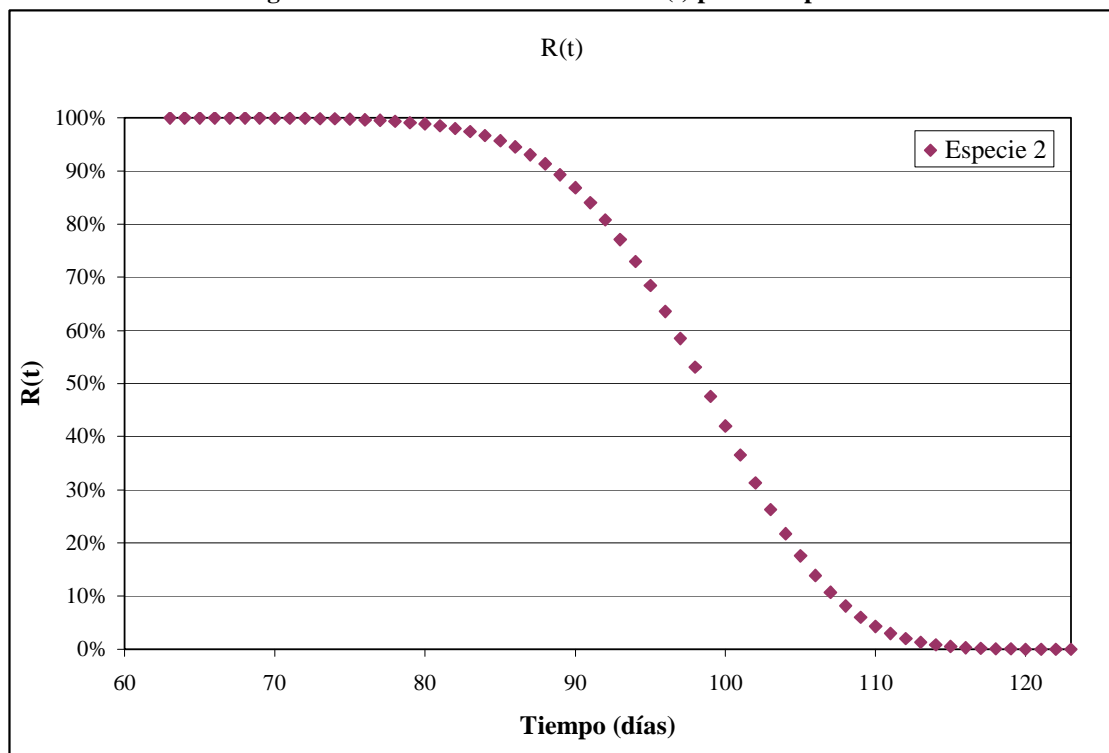


Figura 6.10 Función de confiabilidad $R(t)$ para la especie 2

De ésta manera se puede determinar la función de costo, teniendo en cuenta que el costo de unas fallas sin planeación es más grande que el costo de reemplazos planeados, por lo tanto,

$$Cmc = A \cdot Cmp$$

Al conocer cuántas veces (A) es más costoso el mantenimiento correctivo con respecto al mantenimiento preventivo se establece el periodo óptimo de mantenimiento. La Figura 6.11 presenta una familia de curvas de costos por unidad de tiempo para la especie 1 donde se observa que si $Cmc = Cmp$ el tiempo óptimo de mantenimiento es el más largo (aprox. 8 meses) y se va reduciendo a medida que los costos correctivos se van incrementando con respecto a los costos preventivos (Figura 6.12).

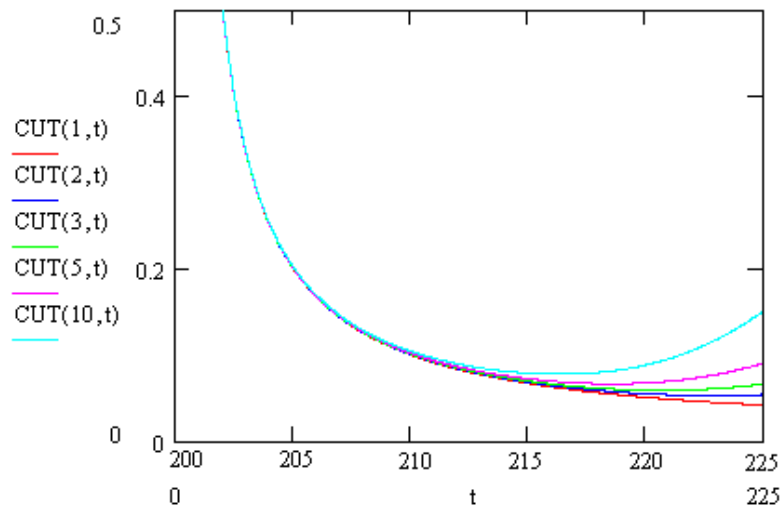


Figura 6.11 Costos por unidad de tiempo $CUT(A,t)$. Especie 1

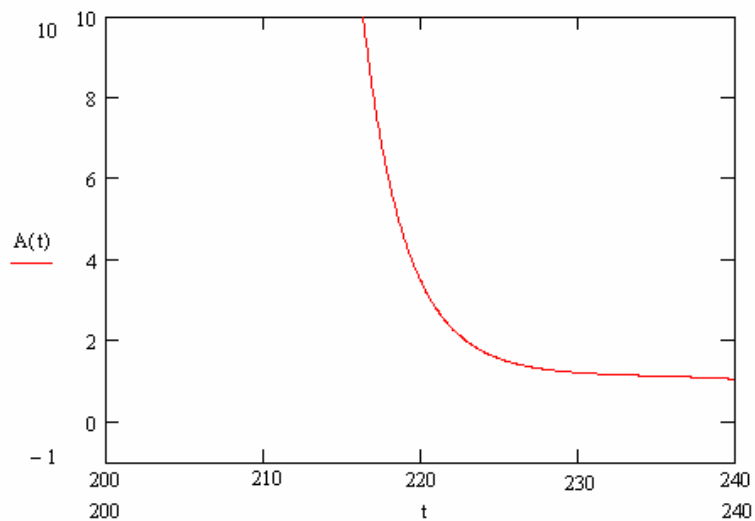


Figura 6.12 Tiempos óptimos de mantenimiento. Especie 1

La Figura 6.13 presenta la familia de curvas de costos por unidad de tiempo para la especie 2, donde se observa que si $C_{mc} = C_{mp}$ el tiempo óptimo de mantenimiento es de aproximadamente 4 meses, tiempo en que se tiene la mayor probabilidad de falla. Si el costo de mantenimiento correctivo es el doble del preventivo el tiempo el tiempo óptimo de poda es de 86 días y se va reduciendo a medida que los costos correctivos se van incrementando con respecto a los costos preventivos (Figura 6.14).

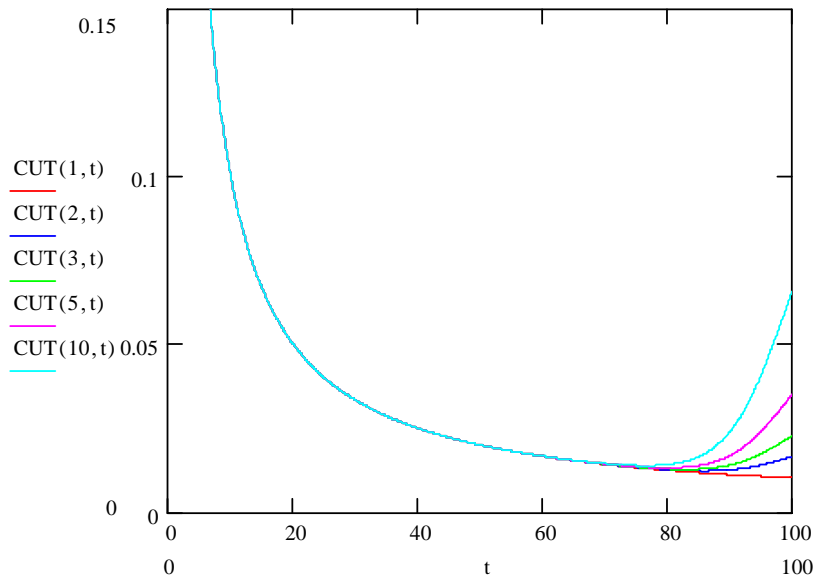


Figura 6.13 Costos por unidad de tiempo $CUT(A,t)$. Especie 2

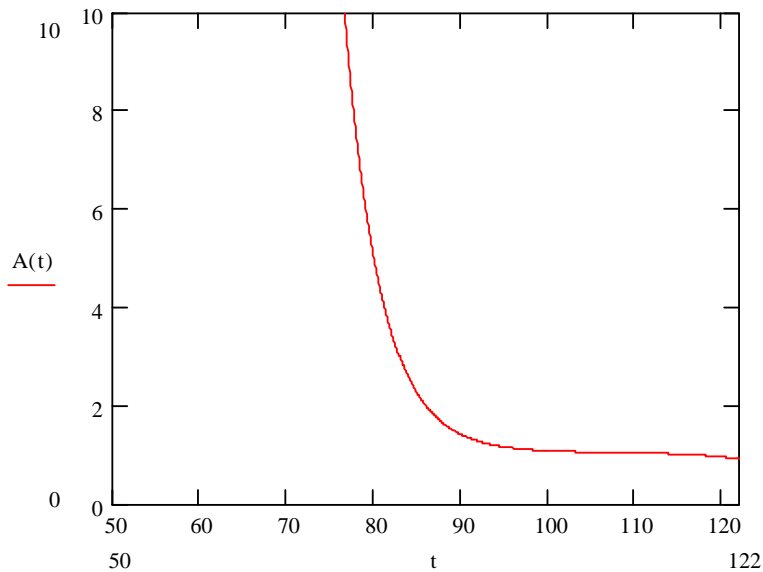


Figura 6.14 Tiempos óptimos de mantenimiento. Especie 2

En general, se tiene para las dos especies estudiadas que los tiempos óptimos de mantenimiento no tienen diferencias significativas a medida que se va incrementando los costos del mantenimiento preventivo, excepto cuando los costos son iguales como se observa en las respectivas curvas $A(t)$.

La Figura 6.15 y Figura 6.16 presentan las funciones de tasa de fallas de las especies 1 y 2, respectivamente.

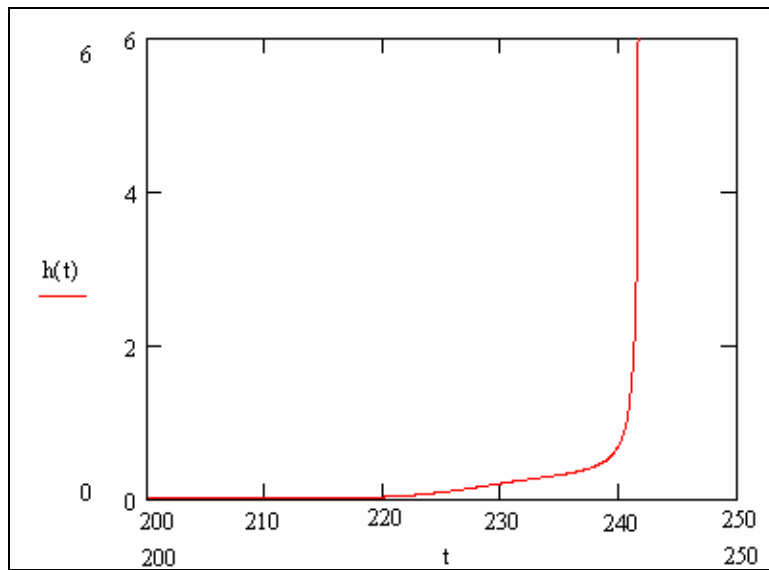


Figura 6.15 Función tasa de fallas. Especie 1

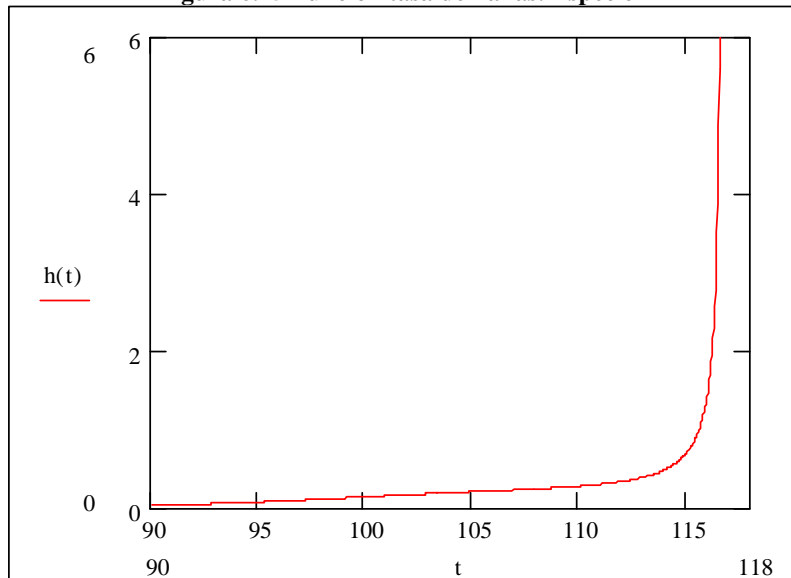


Figura 6.16 Función tasa de fallas. Especie 2

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Una gestión de la vegetación permite a las empresas distribuidoras realizar programas de mantenimiento más eficientes y por lo tanto una mejor operación de sus activos que sirve de apoyo en su planeación estratégica para sus actividades de mejoramiento de su sistema eléctrico y de su productividad.
- ✓ Con el desarrollo del modelo probabilístico se puede establecer los periodos de mantenimiento por tipo de vegetación, basado en las probabilidades de falla y la minimización de costos alrededor de un determinado circuito, lo cual permite una reducción drástica de la incertidumbre y de la subjetividad en lo que se refiere al control, poda o levantamiento periódico que se realiza sobre la servidumbre de las redes o líneas, de tal forma que se reduzca tanto la tasa de fallas como el costo de esta actividad.
- ✓ El modelo es sencillo y fácil de aplicar, pero se debe tener en cuenta que depende en gran medida de los parámetros estimados para los modelos de crecimiento, por lo que se debe contar con una información confiable, para lo cual es necesario contar con una base de datos sobre el crecimiento de las especies alrededor de las redes con el fin de obtener indicadores de gestión útiles para la compañía.
- ✓ Los programas que se realicen alrededor de la gestión de la vegetación deben ser ejecutados por los operadores de red de una forma segura y ambientalmente viable. Estos programas permiten suministrar seguridad a los servicios de transporte de energía eléctrica manteniendo una relación armoniosa con el ambiente. La servidumbre mantenida correctamente es esencial para proveer seguridad a los trabajadores y a los usuarios.
- ✓ En el crecimiento de un árbol no sólo influye la edad y la calidad de sitio, sino también otras variables como las características genéticas del individuo o los tratamientos selvícolas a que ha sido sometido a lo largo de su vida, por lo que se recomienda realizar un estudio sobre los impactos de éstas y otras variables para los modelos de crecimiento.

IEM-I-17-05

- ✓ A través de indicadores financieros y de confiabilidad permite a las compañías valorar lo programas o planes de acción mediante labores de control, corrección y ajuste a lo largo de la vida útil de la red.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Billinton, Roy. 1996. Reliability evaluation of power systems. New York: Plenum.
- [2] Billinton, Roy. 1992. Reliability evaluation of engineering systems. New York: Plenum.
- [3] Cardoso, Hernán. 2004. Relaciones alométricas de los árboles y arbustos de la sabana de Bogotá. Bogotá: Jardín Botánico José Celestino Mutis.
- [4] De las Salas Florez, Gonzalo. Crecimiento de las plantaciones de Eucalyptus Globulus y clasificación de índices de sitio en la sabana de Bogotá. 1979. Bogotá: Seminario de reforestadores.
- [5] Del Valle, Jorge. 1983. El crecimiento de los árboles y de los bosques. Bogotá: Conif.
- [6] García, Oscar. 1994. El enfoque del espacio de estados en modelos de crecimiento. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- [7] García, Oscar. 1979. Modelling stand development with stochastic differential equations. New Zealand Forest Service, FRI Symposium No. 20.
- [8] Gujarati, D.N. 2003. Basic econometrics. Mc Graw Hill Fourth Edition
- [9] Lovelace, Richard W. 1996. Vegetation management on distribution line right of way: are you getting top value for your money? IEEE Conference Paper.
- [10] Murcia, Diego. 2003. Metodología de diagnóstico y mantenimiento basado en la seguridad para sistemas de distribución. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [11] Torres, Alvaro. 2002. Probabilidad, procesos estocásticos y confiabilidad. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [12] Torres, Alvaro. 1985. Líneas de transmisión: Notas sobre aislamiento, efecto corona y radio-interferencia. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [13] Richards, F.J. 1959. A flexible growth functions for empirical use. Journal of experimental botany: 290-300.
- [14] Sánchez, Andrea. 2001. Metodología de gestión de activos en los sistemas de distribución de energía eléctrica. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [15] Zambrano, Tania & Jerez, Mauricio. Evaluación de la efectividad del ajuste de algunos modelos de regresión utilizados para estimar la relación altura-diámetro en

IEM-I-17-05

parcelas permanentes de rendimiento y aclareo. Mérida, Venezuela: Centro de Estudios Forestales de Postgrado.