

U N I V E R S I D A D D E C O N C E P C I O N

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente



**ESTIMACION DE LA DENSIDAD APARENTE EN FUNCION DE LA
RESISTENCIA A LA PENETRACION (INDICE DE CONO), EN SUELOS DE
ORIGEN GRANITICO.**

**MEMORIA DE TITULO PRESENTADA
A LA FACULTAD DE CIENCIAS
FORESTALES DE LA UNIVERSIDAD
DE CONCEPCION PARA OPTAR AL
TITULO DE INGENIERO FORESTAL.**

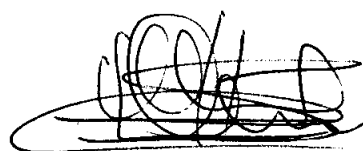
JUAN PABLO VENTURA ALBORNOZ

CONCEPCION - CHILE

1997

**ESTIMACION DE LA DENSIDAD APARENTE EN FUNCION DE LA
RESISTENCIA A LA PENETRACION (INDICE DE CONO), EN SUELOS DE
ORIGEN GRANITICO.**

Profesor Asesor



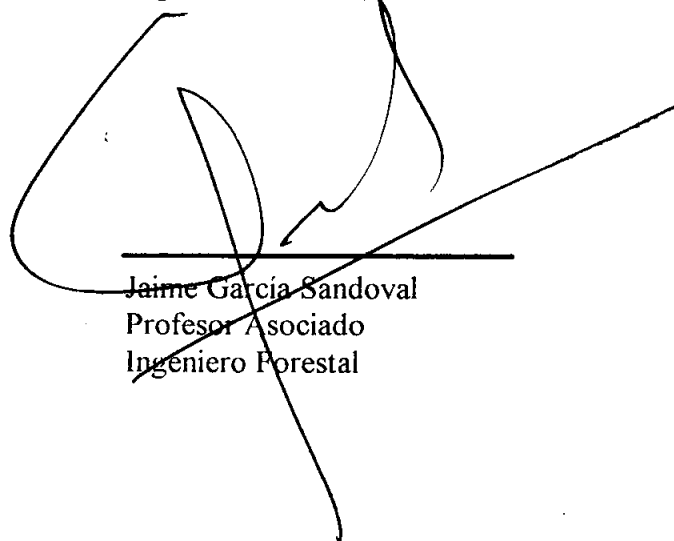
Manuel Lineros Parra
Profesor Asistente
Ingeniero Forestal, Mg. Sc.

Director Departamento
Manejo de Bosques y
Medio Ambiente



Pedro Real Hermosilla
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal, Ph. D.

Decano Facultad de
Ciencias Forestales



Jaime García Sandoval
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal

INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS		PAGINA
I	INTRODUCCION	1
II	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
III	MATERIALES Y METODOS	9
	3.1 Materiales	9
	3.2 Metodología	10
	3.2.1 Ordenación de datos	10
	3.2.2 Proposición de modelos	11
	3.2.2.1 Comportamineto de las variables	12
	3.2.2.2 Caracterización del modelo	12
	3.2.3 Ajuste de modelos	12
	3.2.4 Análisis estadístico	14
	3.2.4.1 Selección del mejor modelo	14
	3.2.4.2 Generalización del ajuste	17
	3.2.5 Identificación de algunos aspectos que producen alteración en el suelo y se relacionan directamente con la densidad aparente	19
	3.2.6 Formulación de algunas medidas prácticas de planificación para la mitigación del impacto al suelo	19

IV	RESULTADOS Y DISCUSION	20
	4.1 Proposición de modelos	20
	4.2 Análisis estadístico	21
	4.2.1 Selección del mejor modelo	21
	4.2.2 Generalización del ajuste	25
	4.2.3 Calidad del ajuste seleccionado	27
	4.3 Aspectos que producen alteración en el suelo y se relacionan directamente con la densidad aparente	32
	4.4 Algunas medidas prácticas de planificación para la mitigación del impacto al suelo	36
V	CONCLUSIONES	40
VI	RESUMEN	41
	SUMMARY	42
VII	BIBLIOGRAFIA	43

INDICE DE TABLAS

TABLA N°		PAGINA
	<u>En el texto</u>	
1	Valores de Error Estándar de Estimación y Error Estándar Global en la estimación de la densidad aparente para la serie San Esteban.....	21
2	Valores de Error Estándar de Estimación y Error Estándar Global en la estimación de la densidad aparente para la serie Cauquenes.....	22
3	Valores F a distintas profundidades en la décima del tercer parámetro para los modelos 6 y 7 a un nivel de significancia del 95% (Prueba Específica).....	23
4	Estadística asociada al ajuste del modelo $Y=a+b*\ln(X)$, para el perfil completo y cada una de las profundidades en la serie San Esteban.....	24
5	Estadística asociada al ajuste del modelo $Y=a+b*\ln(X)$, para el perfil completo y cada una de las profundidades en la serie Cauquenes.....	24
6	Valores del test “F” General para las series de suelo San Esteban y Cauquenes.....	26
7	Estadística asociada en la estimación de la densidad aparente, para el modelo general de la serie San Esteban.....	27
8	Estadística asociada en la estimación de la densidad aparente, para el modelo general de la serie Cauquenes.....	29

INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°		PAGINA
	<u>En el texto</u>	
1	Dispersión de residuos general para la serie de suelos San Esteban y Cauquenes.....	20
2	Valores reales y estimados para Densidad aparente v/s Indice de cono en la serie de suelos San Esteban.....	28
3	Dispersión de residuos para la serie de suelos San Esteban.....	29
4	Valores reales y estimados para Densidad aparente v/s Indice de cono en la serie de suelos Cauquenes.....	30
5	Dispersión de residuos para la serie de suelos Cauquenes.....	31

I. INTRODUCCION

El sector forestal chileno, producto del significativo crecimiento y dinamismo alcanzado en estas dos últimas décadas basado en el cultivo de la especie Pinus radiata D. Don , se ha encontrado en la necesidad de expandirse, lo que lo obliga a ser cada vez más productivo. Este concepto se ve reflejado en forma inversa al resultado obtenido en las cosechas de segundas rotaciones, donde el volumen extraído disminuye considerablemente, debido a un manejo de suelo y silvícola. Si a lo anterior se le suma la incorporación de terrenos con mayor grado de pendiente, disminución de edades de rotación y aumento de faenas en invierno, traen bajo algunas condiciones una reducción progresiva de la productividad del sitio (Gayoso e Iroumé, 1989).

Las razones anteriormente mencionadas, incentivan a conocer la relación suelo - productividad de los bosques en las zonas en que aquel componente es determinante en el rendimiento de las plantaciones, permitiendo identificar los factores que pueden estar limitando el crecimiento del pino insigne y a partir de ésto proponer medidas correctivas factibles, tendientes a incrementar los actuales niveles de rendimiento.

Las propiedades físicas son de gran interés desde el punto de vista ecológico y de manejo del suelo, por esta razón numerosos investigadores han enfatizado la importancia que tiene para el desarrollo de las plantas, lo cual se contrapone a una creciente silvicultura cada vez más intensiva que se realiza en las plantaciones de pino, impulsando a las empresas forestales chilenas a mecanizar cada vez más sus faenas.

A pesar de que la productividad del suelo está en función de las propiedades edafoclimáticas del sitio, especialmente algunos atributos físicos, actualmente en el país

existe muy poca información sobre las características físicas que presentan los suelos en sitios típicos con presencia de Pinus radiata D. Don.

Es por ello que el objetivo de este estudio fue desarrollar una herramienta económica y fácil de utilizar que permita estimar la densidad aparente en función de la resistencia a la penetración (valores de índice de cono), para el perfil de las series del grupo de suelos granítico, a través de un modelo de regresión. Además, el análisis de algunos aspectos que producen alteración sobre las características físicas del suelo y las posibles vías de mitigación, basándose en los antecedentes bibliográficos existentes.



II. REVISION BIBLIOGRAFICA

Los bosques han cubierto por varios años gran parte de la superficie terrestre sin que haya habido la más mínima evidencia de disminución en la producción. Es primordial para esta continuidad de la productividad, el equilibrio relativo, que a la larga se establece en todos los bosques maduros en ausencia de cosecha o alteración importante. Con la cosecha de los árboles y otras alteraciones de este ciclo, cabe esperar algunos cambios en las propiedades del suelo y del agua así como una pérdida de nutrientes en el ecosistema, no sólo eliminando una gran proporción de la biomasa total, sino que también alterando de manera notable los microclimas de la cubierta forestal pudiendo ser perjudicial para las propiedades físicas del suelo (Pritchett, 1991).

Las perturbaciones debido a alteraciones mecánicas a menudo afectan la condición física de un suelo superficial, como resultado de la modificación de su estructura por medio de la compactación y el encharcamiento. Los efectos directos alteran los sistemas aire-agua y las propiedades de dureza del suelo, afectando la penetración de las raíces. Estas perturbaciones anteriormente mencionadas están relacionadas con el pisoteo excesivo por los animales de pastoreo, el uso de maquinaria pesada de cosecha y el uso recreativo intenso (Pritchett, 1991).

Existen muchos investigadores que han estudiado sobre este tema, sobretodo respecto a la alteración del suelo producto de la maquinaria de cosecha.

La extracción mecanizada provoca presiones al suelo originando sobrecompactación, desplazamiento, amasado y erosión, modificando sustancialmente las relaciones

gravimétricas, su estructura y la potencialidad de producción (Moehring y Rawls, 1970; Gessel, 1981; Beekman, 1987, citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

Greacen y Sands (1980) citados por Toro (1991), han señalado que uno de los impactos más relevantes que sufre el suelo, es el aumento de la densidad aparente, la cual incrementa la resistencia a la penetración de las raíces, reduce la tasa de infiltración de agua, altera el intercambio gaseoso y afecta la eficiencia del sistema radicular para absorber agua y nutrientes.

Un aumento de la presión ejercida por los equipos de laboreo, provoca una disminución de la porosidad del suelo alterando su estructura, lo que lleva a una rápida saturación, retardando así el intercambio y evacuación del agua (Ellies y Mac Donald, 1989).

Apartir de las variaciones que se presentan en la resistencia a la penetración en un suelo, se puede diagnosticar los cambios estructurales producidos por el manejo. Sin embargo, una alta resistencia a la penetración no se asocia siempre con una alta densidad aparente. Los suelos bien estructurados tienen una alta resistencia al corte debido al aumento del roce de las partículas (Ellies y Mac Donald, 1989).

Gayoso e Iroumé (1993), señalan que la disminución de la permeabilidad de los suelos bajo huella de skidder muestra que la pérdida de porosidad corresponde en gran parte a la reducción de los macroporos o poros de drenaje.

Sin duda, el uso de la maquinaria altera las propiedades físicas del suelo. Gayoso *et al* (1993), indican que la intensidad del daño medida como incremento de la densidad aparente y disminución de la macroporosidad, muestra que para la época húmeda, las mayores compactaciones de la capa superficial son provocadas por el madereo con skidder en relación al uso de neumáticos, alcanzando densidades hasta un 85% mayores

que la densidad control. En el mismo estudio los suelos volcánicos mostraron las menores variaciones y una mayor capacidad de soporte. Todos estos fenómenos alteran el sistema suelo - agua - planta a través de la reducción del volumen útil del suelo, de la capacidad de arraigamiento, del almacenamiento de agua y nutrientes, lo que conduce finalmente a una pérdida de productividad del bosque (Toro,1991).

Esta disminución en la productividad del bosque debido a la compactación ha sido demostrado por diversos autores. Es así como Adams (1980), en un estudio de compactación de suelos forestales, encontró que el crecimiento de árboles y plántulas disminuyó de 5 a 50% en altura, de 5 a 15% en volumen y en árboles individuales el rango fue de 0 a 40%.

Donoso (1981), indica que el grado de compactación del suelo es naturalmente un factor que afecta la densidad aparente y que ésta es un buen indicador del crecimiento y desarrollo de los árboles, donde valores bajos de densidad aparente implican suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de las raíces, a diferencia de valores altos que indicarían que el suelo es compacto, con mala aireación e infiltración lenta pudiendo provocar anegamiento y dificultad en las raíces para elongarse y penetrar hasta donde encuentran agua y nutrientes.

Lewis (1991), explica que la compactación es el proceso que incrementa la densidad del suelo, a través de reacciones de las partículas de éste, en respuesta a la aplicación de fuerzas externas, lo cual trae consigo la reducción del total de poros que son ocupados por aire o agua. Esta alteración sobre el suelo, provoca efectos adversos para el crecimiento de los árboles donde el agua es escasa o excesiva y la aireación es insuficiente para la respiración de las raíces, restringiéndose físicamente el enraizamiento.

Las pérdidas de crecimiento encontradas por Gayoso *et al* (1991) en la comparación de árboles creciendo sobre huellas de skidder y otros ubicados en terrenos adyacentes, alcanzaron en suelos graníticos aproximadamente a un 36% en el primer año, aumentando hasta el tercer y cuarto año donde alcanzan niveles del 50% , para luego comenzar a decrecer hasta niveles del 38% en el año nueve.

Ahora que se ha verificado en la bibliografía que la alteración del suelo provoca pérdidas en la productividad, nace la necesidad de cuantificar tales alteraciones, para así poder subsanar o recuperar la capacidad de un componente del sistema productivo y sin duda el más importante, el suelo (Fuentes, 1992).

Esta necesidad de cuantificar las alteraciones del suelo pasa por desarrollar algunas herramientas para hacer más fácil la labor del planificador en la toma de decisiones. Estas herramientas tienen que cumplir algunas características que hagan su utilización operativamente viable desde el punto de vista económico, es decir, que la información que se requiera medir sea fácil, rápida y con el menor margen de error tanto para los datos como para los resultados.

Ayers y Perumpral (1982), mencionan que los tests de penetración fueron desarrollados como métodos rápidos y simples para obtener información *in situ* sobre las fuerzas del suelo. Un test de penetración significa dirigir un penetrómetro dentro del suelo en una cierta proporción y registrar la fuerza de resistencia ejercida por el suelo sobre el penetrómetro. Esta resistencia a la penetración generalmente se expresa por el índice de cono y está afectada por muchos factores incluyendo densidad, contenido de humedad y tipo de suelo.

La mayoría de las investigaciones que buscan estandarizar los resultados, utilizan el penetrómetro de cono, siendo empleado en diversas aplicaciones: predicción de la

capacidad tractiva de vehículo en camino (Freitag y Richarson, 1968; Wismer y Luth, 1972), caracterización de los suelos en términos de la habilidad de crecimiento de un cultivo (Raghavan y Mckyes, 1977), determinación de la resistencia de penetración de las raíces y emergencia de plántulas (Bowen, 1976; Taylor y Garden, 1963; Morton y Buchele, 1960), predicción de la fuerza de tiro (Johnson *et al.*, 1978; Gill y Vanden Berg, 1968) y estimación de la compactación causada por el tráfico vehicular (Slone, 1973; Raghavan y Mckyes, 1977; Chesness *et al.*, 1972). Todos estos estudios con sus respectivos autores son citados por Lineros (1994).

El penetrómetro de cono fue desarrollado por la United States Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station para determinar la traficabilidad del suelo (WES) y consiste en un cono circular de 30° con 3.2 cm² de área basal, el cual se introduce dentro del suelo a la velocidad de 1.829 mm/min. (Ayers y Perumpral, 1982).

Al respecto, Ohu *et al.* (1988), dice que en la mecánica de suelos agrícolas, las propiedades más relevantes del suelo son las reacciones de éste a las fuerzas aplicadas. Esas propiedades con frecuencia son llamadas *propiedades de fuerza*, ya que para un suelo conocido pueden cambiar con el tiempo bajo la influencia del clima, manejo y crecimiento de las plantas. Las propiedades de fuerza de un suelo dado y sus cambios con el tiempo, pueden ser determinadas a través de las mediciones de la fuerza de corte y la resistencia a la penetración, cuyos valores dependen principalmente de la densidad y del contenido de humedad.

Aunque la dependencia de la fuerza del suelo del contenido de humedad y densidad es compleja, esto puede proporcionar una base para establecer cambios en el estado de compactación del suelo (Freitag, 1971, citado por Ohu *et al.*, 1988).

Hattingh (1993), en su estudio “Compactación del suelo bajo diferentes técnicas de cosecha forestal”, indica que los métodos desarrollados para medir la presión del suelo con frecuencia son demorosos, caros y están expuestos a considerables errores. El mismo autor señala que los efectos de la compactación del suelo pueden ser considerados en términos de porosidad, densidad aparente, infiltración de agua o resistencia a la penetración. En este estudio la compactación del suelo fue considerada en términos de la resistencia a la penetración.

Finalmente, toda medida preventiva que permita minimizar el impacto al suelo es importante, ya que los efectos son acumulativos traduciéndose en una pérdida de productividad cada vez mayor en el tiempo (Linerós, 1994).

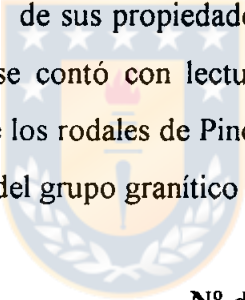
Lo anterior deja claramente establecida la necesidad de realizar estudios orientados a conocer los factores edáficos mediante una metodología de terreno de fácil uso, que agilice la toma de datos y que entregue información como densidad aparente y porcentaje de porosidad que son alterados por fenómenos que producen compactación en el perfil del suelo, todo esto con el fin de aumentar el conocimiento como base en el manejo de plantaciones de pino radiata establecidas sobre suelos de origen granítico, ubicados en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa de la VIII región del país.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Materiales

La información requerida para este estudio, está contenida en el proyecto FIA “Suelos Forestales de la VIII región”, el cual incluye el estudio de las series de suelos del grupo de origen granítico de la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, con plantaciones jóvenes y adultas de Pinus radiata D. Don.

Para cada serie se tenía información de sus propiedades físicas, químicas y fisiográficas. Dentro de las propiedades físicas se contó con lecturas de penetrómetro, además de índices de sitio e índices de suelo de los rodales de Pino radiata muestreados. El número de observaciones por serie de suelo del grupo granítico fue de :



Serie	Nº de muestras
Cauquenes (CQ)	45
San Esteban (ET)	160
Total	205

La zona que comprendió la toma de datos se ubica entre los 36° 37' 50" de latitud sur, en una franja de unos 45 kilómetros de ancho sobre la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa de la VIII región.

El clima es de transición entre mediterráneo a templado que predomina hacia el sur, con precipitaciones medias anuales que varían entre los 1000 y 1200 mm, con 2 a 4 meses

secos en el año. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 13° y 15°C (FIA-U. Concepción, 1990).

Son suelos de posición intermedia a alta, la geomorfología va desde ondulado hasta montañosa, con superficies rocosas o comienzos de sedimentación; su material de origen es roca intrusiva rica en cuarzo, granito o diorita cuarzosa; tiene un drenaje interno y externo bueno. Son suelos susceptibles a la erosión que en general presentan erosión severa (FIA-U. Concepción, 1990).

Para la obtención de datos se confeccionaron calicatas, en las cuales, se tomaron muestras de suelo a profundidades fijas de 0 ; 30 y 60 cm., para posteriormente realizar análisis químicos y físicos en el laboratorio. Además en cada uno de estos niveles se hicieron cinco mediciones con el penetrómetro expresado por el índice de cono y la obtención de una muestra para la determinación en laboratorio de la densidad aparente.

3.2 Metodología

3.2.1 Ordenación de datos

Para un mejor manejo de la información, esta se almacenó en bases de datos, ordenadas para cada una de las series del grupo de suelos granítico, considerando el perfil completo y dividido por rangos de profundidad.

Luego de almacenados los datos, con el objetivo de explicar el comportamiento de la densidad aparente (D_a) como variable dependiente, se utilizó como variable independiente los datos recopilados con el penetrómetro (índices de cono). Estos datos

fueron obtenidos al tomar 5 lecturas al azar en un área de 1 m^2 y en forma sistemática en cada una de las profundidades establecidas como estándar : 0 ; 30 y 60 cm. , calculándose un promedio para cada una de ellas.

3.2.2 Proposición de modelos

En la proposición de modelos se analizaron 3 situaciones básicas, las cuales se describen a continuación :

- Existe una serie de modelos conocidos, los cuales han probado su eficacia en estudios anteriores o poseen una sólida base teórica.
- No existen modelos conocidos, pero existe una serie de variables explicatorias (independientes) que permiten la aplicación de algún método de selección de variables. El método más común en los estadísticos es el de Stepwise.
- Existe una sola variable explicatoria y no se conocen modelos que expliquen su comportamiento.

En el primer caso se ajustan todos los modelos y de acuerdo al criterio elegido se selecciona una de ellos, en el segundo la función será indicada por el método de selección de variable y en el tercer y último caso, al existir una sola variable explicatoria, se realiza un ajuste lineal simple, para luego apreciar el análisis de residuos y discriminar si la relación entre las variables es lineal o no.

En función del análisis de estas tres situaciones, se eligió la que más representaba o concordaba con la información utilizada en este estudio, y es descrita en los dos puntos siguientes.

3.2.2.1 Comportamiento de las variables. El comportamiento de las variables en cuestión puede ser caracterizado en base a la distribución de los residuos, los cuales son comparados con una serie de gráficos característicos (Weisberg, 1980) que entregan la descripción inicial para la posterior proposición de modelos.

En este caso se realizó un ajuste lineal simple y un gráfico de dispersión de residuos para cada una de las profundidades (en ambas series). Posteriormente se graficó una dispersión “general” que resumiera el comportamiento de todo el perfil analizado.

Al realizar este procedimiento fue posible además eliminar aquellos puntos que escapan notoriamente del comportamiento general.

3.2.2.2 Caracterización del modelo. El ajuste lineal también permitió identificar la tendencia de los datos (creciente o decreciente), característica que junto al análisis gráfico fue la base para la proposición de modelos.

3.2.3 Ajuste de modelos

Luego de haber determinado el comportamiento y tendencia de los puntos, y de proponer modelos tanto lineales, linealizables como no lineales, se realizó el ajuste de los modelos

utilizando el software estadístico Statgraphics. Se ajustaron todos los modelos en ambas series y para cada una de las profundidades.

En consecuencia se desea obtener un modelo que permita explicar el comportamiento de la densidad aparente en función del índice de cono. Dicho modelo debe entregar el mayor porcentaje de explicación dentro de todos los modelos estudiados.

En este caso particular, no existen modelos producto de estudios anteriores, por lo tanto se necesita un modelo que establezca su propia y ojalá correcta vía a través de todos los puntos, es decir, una función que muestre una tendencia dentro de la nube de puntos y separe el comportamiento real del accidental (Zeide, 1993). Por lo tanto el modelo con más parámetros no necesariamente es el mejor, y como se especificó en el análisis residual general, el comportamiento lineal no es muy alejado del real, en consecuencia, esta forma se consideró como base en los modelos propuestos.

Los modelos propuestos son los siguientes :

- 1.- $Y = a + b \cdot X$
- 2.- $Y = a + b \cdot \ln(X)$
- 3.- $Y = a + b \cdot (e^X)$
- 4.- $Y = e^{(a + b \cdot X)}$
- 5.- $Y = \ln(a + b \cdot X)$
- 6.- $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2$
- 7.- $Y = a + b \cdot X^c$
- 8.- $Y = a + b \cdot (c - X)^2$

Donde :

$Y = \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)}$ $X = \text{Indice de Cono (Lb/pg}^2\text{)}$
 $\text{Ln}(\dots) = \text{Logaritmo natural}$ $e = 2.718281828$
 $a, b, c, d = \text{Parámetros de la función}$

3.2.4 Análisis estadístico

3.2.4.1 Selección del mejor modelo. Para seleccionar el mejor modelo dentro de los propuestos, existen muchas formas que permiten llegar a un mismo resultado, ya sea utilizando el coeficiente de determinación (R^2), error estándar, suma de cuadrados del error y R^2 -ajustado (\bar{R}^2), pero es necesario establecer claramente los objetivos y las exigencias que debe cumplir el modelo, de lo contrario, el resultado variará según el método de selección (Zeide, 1993).

La respuesta a la interrogante anterior quedó clarificada con el análisis y decisión de los siguientes puntos :

1. Es necesario considerar si todos los modelos tienen la misma cantidad de parámetros, si es así, se puede proceder sin mayores complicaciones.
2. Se debe clarificar si se le exigirá a cada parámetro un mínimo de aporte al modelo.
3. Si el objetivo es reducir el número de parámetros, es más conveniente utilizar el Error Estándar de la Estimación o el R^2 -ajustado (\bar{R}^2), ya que ambos consideran este factor al ser calculados (Mendenhall, 1990).

4. Una consideración de mucha importancia es la referida a la linealización de modelos, ya que este procedimiento puede generar grandes errores que hacen fracasar el proceso de selección. Si la linealización hace variar solo a la variable independiente no genera ninguna complicación, pero si la variable dependiente es modificada, todos los coeficientes R^2 , EEE , otros, acarrearán un sesgo que no permitirá su comparación. Este producto de la variación de la variable dependiente, puede ser corregido mediante el índice de Furnival o ajustando el modelo y despejando la variable dependiente para luego estimar los valores de Y' , e ingresarlos en la fórmula original del EEE (García, 1974).

En el caso de los modelos 4 y 5 se utilizó la segunda forma de corrección, y luego fueron comparados con los otros modelos seleccionados.

Para decidir entre los diferentes ajustes realizados se utilizó el Error Estándar de la Estimación (EEE), ya que el cálculo de este valor, considera el N° de parámetros (para comparaciones individuales).

$$EEE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y'_i)^2}{n - k}}$$

Donde : n = Tamaño de la muestra.
 k = N° de parámetros del modelo.
 Y_i = Variable respuesta " i ".
 Y'_i = Y estimado.

Siendo el objetivo seleccionar un modelo por serie, se calculó el Error Estándar Global (EEG), utilizado por García (1974) en un estudio de características similares, el cual se calculó por serie y para cada uno de los modelos.

$$EEG = \sqrt{\frac{\sum RSS_i}{\sum GL_i}}$$

Donde : RSS_i = Suma de cuadrados del error (profundidad " i ").

GL_i = Grados de libertad (profundidad " i ").

Los modelos con menor Error Estándar Global fueron seleccionados y analizados, con el objeto de asegurar que el aporte de los parámetros fuera significativo (para cada uno de ellos y para el conjunto).

Para saber si el modelo es aceptable, se ocupó el valor " F " muestral, el cual fue comparado con el valor " F " crítico, de la tabla del mismo nombre.

Las hipótesis se expresan como :

A.- Hipótesis general :

$$H_0 : B = 0 \quad (b_1 = b_2 = b_3 = \dots = 0)$$

$$H_a : B \neq 0 \quad (b_1 \neq b_2 \neq b_3 \neq \dots \neq 0)$$

Se docimó la posibilidad que todos los coeficientes (acompañantes de las variables independientes) sean iguales a cero (no significativos), para un nivel de confianza preestablecido. El valor crítico, que determina si se acepta o rechaza la hipótesis, es

obtenido de la Tabla “F”, donde de acuerdo a un nivel (%) de confianza se acepta o rechaza la hipótesis.

Si el valor “F” obtenido de la muestra (F_m) es mayor al valor “F” de la tabla (F_c), se rechaza la hipótesis nula (H_0), por lo tanto acepto la hipótesis alterna (H_a) es decir los coeficientes (b_i) en conjunto son aceptados. Bajo este análisis el modelo es aceptado.

B.- Hipótesis específica :

$$H_0 : b_i = 0$$

$$H_a : b_i > 0$$

Para el caso donde existen varios parámetros en el modelo, se docimó la posibilidad (bajo el mismo concepto general), que cada uno de ellos fuera igual a cero (significativo). Así se determinó si el parámetro continuaba en el modelo o se eliminaba.

Concluido este análisis se seleccionó el modelo con menor EEG y cuya aplicabilidad no presentaba ningún inconveniente (parámetros significativos en cada una de las situaciones), para un nivel de significancia del 95%.

3.2.4.2 Generalización del ajuste. Existe la posibilidad de utilizar cada uno de los ajustes en forma individual, es decir estimar la densidad aparente para cada una de las profundidades midiendo el índice de cono a igual profundidad, o utilizar el modelo general para la serie, independiente de la profundidad a la cual se mida el índice.

Para definir la conveniencia de utilizar el modelo general o modelos individuales, se ocupó la prueba “F” (test “F” general), para un nivel de confianza preestablecido.

Test “F” general :

Ho : B1 = B2 = B3 (Se acepta utilizar una función general)

Ha : B1 \neq B2 \neq B3 (Es conveniente utilizar funciones individuales)

Fm = valor “F” obtenido de la muestra.

Calculado con la siguiente fórmula :

$$F_m = \frac{(RSST - RSS1) / (dfT - df1)}{RSS1 / df1}$$

Donde : RSST = Suma de cuadrados del residuo, función total

RSS1 = Sumatoria de las RSS individuales

dfT = Grados de libertad total.

df1 = Sumatoria de los grados de libertad individuales

Fc = valor “F” crítico, obtenido desde la Tabla “F”, para el nivel de significancia deseado.

Se expresa de la siguiente forma :

$$F_c = F (a ; dfT - df1 , df1)$$

Donde : a = Nivel de significancia (1% , 5% , 10%)

dfT - df1 , df1 = Grados de libertad, columna y fila respectivamente, en la Tabla

Si el valor F_m es mayor que F_c se rechaza la hipótesis nula, es decir es bueno utilizar ajustes individuales para cada una de las profundidades.

Al contrario si se acepta la hipótesis nula ($F_m < F_c$) no se justifica, para el nivel de confianza establecido, utilizar ajustes individuales.

3.2.5 Identificación de algunos aspectos que producen alteración en el suelo y se relacionan directamente con la densidad aparente

Para la identificación de estos aspectos se trabajó con los antecedentes bibliográficos existentes, describiendo aquéllos de mayor relevancia en la causa de la compactación.

3.2.6 Formulación de algunas medidas prácticas de planificación para la mitigación del impacto al suelo

Se formularon algunas recomendaciones halladas en la literatura, necesarias para la toma de decisiones en la planificación y actividades de manejo. Estas recomendaciones están orientadas a aquellos aspectos que disminuyen la calidad del sitio, lo que se reflejará en futuras rotaciones.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Proposición de modelos

Al analizar las tres situaciones básicas expuestas en la metodología, y al contar con una sola variable explicatoria, se realizó un ajuste lineal simple, para luego apreciar el análisis de residuos.

El comportamiento general para ambas series y en todas las profundidades es creciente y no lineal, pero esta no linealidad no es muy exagerada. En cuanto a la dispersión de los residuos, estos mostraron una heterogeneidad similar a uno de los gráficos característicos entregados por Weisberg (1980).

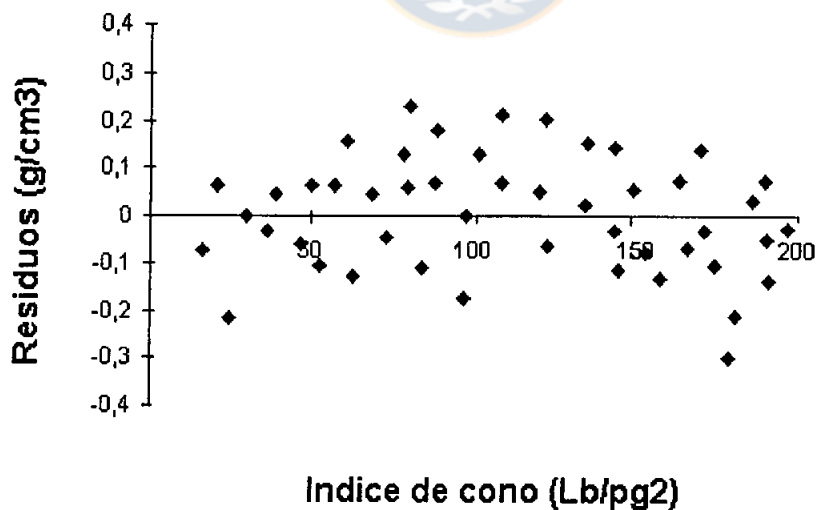


FIGURA 1. Dispersión de residuos general para las series de suelo San Esteban y Cauquenes.

4.2 Análisis estadístico

4.2.1 Selección del mejor modelo

Ajustados cada uno de los modelos, se obtuvieron los resultados que muestra la Tabla 1 en el caso de la serie San Esteban y la Tabla 2 para la serie Cauquenes. Cada valor corresponde al Error Estandar de Estimación y el Error Estándar Global.

TABLA 1. VALORES DE ERROR ESTANDAR DE ESTIMACION Y ERROR ESTANDAR GLOBAL EN LA ESTIMACION DE LA DENSIDAD APARENTE PARA LA SERIE SAN ESTEBAN.

Profundidad (cm)	observaciones (n)	modelos							
		1	2	3	4	5	6	7	8
00	54	0.141	0.138	0.181	0.143	0.141	0.141	0.139	0.141
30	54	0.116	0.106	0.180	0.122	0.113	0.103	0.993	0.111
60	52	0.094	0.092	0.161	0.092	0.090	0.091	0.091	0.096
EEG		0.118	0.114	0.174	0.121	0.117	0.114	0.112	0.117

TABLA 2. VALORES DE ERROR ESTANDAR DE ESTIMACION Y ERROR ESTANDAR GLOBAL EN LA ESTIMACION DE LA DENSIDAD APARENTE PARA LA SERIE CAUQUENES.

Profundidad (cm)	observaciones (n)	modelos							
		1	2	3	4	5	6	7	8
00	15	0.048	0.046	0.097	0.064	0.066	0.045	0.047	0.045
30	15	0.072	0.072	0.101	0.073	0.072	0.075	0.075	0.087
60	15	0.081	0.081	0.109	0.081	0.082	0.084	0.084	0.087
EEG		0.069	0.068	0.103	0.070	0.071	0.071	0.072	0.071

Para la serie San Esteban los mejores modelos, es decir, los que tienen menor EEG, son los 2, 6 y 7. El N° 2 no presenta inconvenientes en su aplicación. Los otros dos modelos (6 y 7), presentan problemas dado el aporte poco significativo del tercer parámetro, a un nivel de confianza del 95% (Tabla 3).

La serie Cauquenes muestra claramente que el modelo N° 2, al igual que la serie ET es el mejor y por ende el seleccionado.

TABLA 3. VALORES F A DISTINTAS PROFUNDIDADES EN LA DOCIMA DEL TERCER PARAMETRO PARA LOS MODELOS 6 Y 7 A UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA DEL 95 %, (Prueba F específica).

modelo	profundidad (cm)	F muestral Fm	F crítico Fc
6	00	0.82	4.04
	30	15.02	4.04
	60	0.68	4.05
7	00	1.84	4.75
	30	21.66	4.75
	60	0.51	4.75

De acuerdo a estos valores, en los cuales el Fm es menor al Fc, el tercer parámetro (c) es rechazado a las profundidades de 00 y 60 cm, para ambos casos. Por lo tanto este resultado excluye a los modelos 6 y 7 y selecciona el N° 2 ($Y = a + b \cdot \ln(x)$) para la serie San Esteban.

Según lo anteriormente expuesto, en ambos casos nos dio el mismo resultado, lo que indica que el comportamiento de las variables para las dos series es típico y concuerda con lo expuesto por Ayers y Perumpral (1982).

Las tablas 4 y 5, muestran las características del modelo seleccionado, para cada serie y en sus distintas profundidades. Este resultado entrega más de un parámetro de evaluación.

TABLA 4. ESTADISTICA ASOCIADA AL AJUSTE DEL MODELO $Y=a+b*\ln(X)$ PARA EL PERFIL COMPLETO Y CADA UNA DE SUS PROFUNDIDADES EN LA SERIE SAN ESTEBAN.

n	profundidad	\bar{R}^2	EEE	Fm	RSS	Función
54	00	0.45	0.14	43.7	0.99	$Y=-0.35668+0.34714*\ln(X)$
54	30	0.67	0.11	108.4	0.59	$Y=-1.13737+0.50688*\ln(X)$
52	60	0.68	0.09	108.1	0.43	$Y=-0.48211+0.37338*\ln(X)$
160	Total	0.60	0.12	235.4	2.15	$Y=-0.52507+0.38146*\ln(X)$

TABLA 5. ESTADISTICA ASOCIADA AL AJUSTE DEL MODELO $Y=a+b*\ln(X)$ PARA EL PERFIL COMPLETO Y CADA UNA DE LAS PROFUNDIDADES EN LA SERIE CAUQUENES.

n	profundidad	\bar{R}^2	EEE	Fm	RSS	Función
15	00	0.82	0.05	59.6	0.03	$Y= -1.87275 + 0.63929*\ln(X)$
15	30	0.51	0.07	15.6	0.07	$Y= -1.76739 + 0.61726*\ln(X)$
15	60	0.48	0.08	14.1	0.09	$Y= -2.06841 + 0.67394*\ln(X)$
45	Total	0.61	0.07	69.4	0.18	$Y= -1.84709 + 0.632551*\ln(X)$

4.2.2 Generalización del ajuste

El análisis estadístico (Test "F" general) para determinar la posibilidad de ocupar todos los ajuste en forma individual o utilizar el modelo general para la serie, independiente de la profundidad a la cual se mida el índice de cono, indicó para la serie Cauquenes la aceptación de la hipótesis nula, es decir, no se requiere un ajuste para cada una de las profundidades, siendo suficiente un ajuste general para la serie. En el caso de serie San Esteban se produjo el rechazo de la hipótesis nula a un nivel de confianza del 95 %, quedando prácticamente en el límite de aceptación, pero la evaluación a un nivel de confianza del 99 % produjo la aceptación de esta hipótesis, y por consiguiente, la conveniencia de utilizar la función general.

También existe la posibilidad, debido a que el perfil del suelo no necesariamente presenta las mismas características en sus distintos estratos y que los datos fueron tomados a profundidades fijas, que el perfil tuviera un estrato anormal, lo cual podría haber provocado cambios en la tendencia de los puntos. Esto es corroborado por Colins (1993), el cual explica que la migración de arcilla hacia estratos inferiores, puede dar como resultado un aumento en la densidad aparente del subsuelo y de la fuerza del suelo, por consiguiente éste aparece compacto sin haber sido sometido a una carga externa.

Lo expuesto anteriormente, concuerda con el alto grado de dependencia que tiene la densidad aparente del suelo, respecto a algunos factores como : estructura, presencia de materia orgánica la cual facilita la granulación de los suelos y varía en cantidad a lo largo del perfil, la textura y el grado de compactación. Además en los suelos se producen contracciones y expansiones causadas por las variaciones térmicas e higroscópicas, las que se presentan con un mayor grado de intensidad en los primeros centímetros del suelo (Villa, 1994).

Los resultados del Test “F” general se muestran en la tabla 6

TABLA 6. VALORES TEST “F” GENERAL PARA LAS SERIES DE SUELO SAN ESTEBAN Y CAUQUENES.

Serie	nivel de confianza	F muestral	F crítico
	%	Fm	Fc
San Esteban	95	2.48	2.37
	99	2.48	3.32
Cauquenes	95	0.16	2.618

Las funciones seleccionadas son las siguientes :

Serie San Esteban : $Dap = -0.525066 + 0.3814588 * \ln(IC)$

Serie Cauquenes : $Dap = -1.847088 + 0.6325506 * \ln(IC)$

Donde : $Dap =$ Densidad aparente (g/cm^3)

$IC =$ Indice de cono (Lb/pg^2)

4.2.3 Calidad del ajuste seleccionado

La estadística asociada obtenida para la serie ET y serie CQ, se encuentra en las Tablas 7 y 8 para ambas series respectivamente.

TABLA 7. ESTADISTICA ASOCIADA EN LA ESTIMACION DE LA DENSIDAD APARENTE PARA EL MODELO GENERAL DE LA SERIE SAN ESTEBAN.

Modelo	n	\bar{R}^2	EEE	Fm
Dap = F (Ln IC)	160	0.596	0.117	235.43

La figura 2 muestra la relación gráfica tanto para los puntos reales como estimados de Y (densidad aparente) para la serie San Esteban.

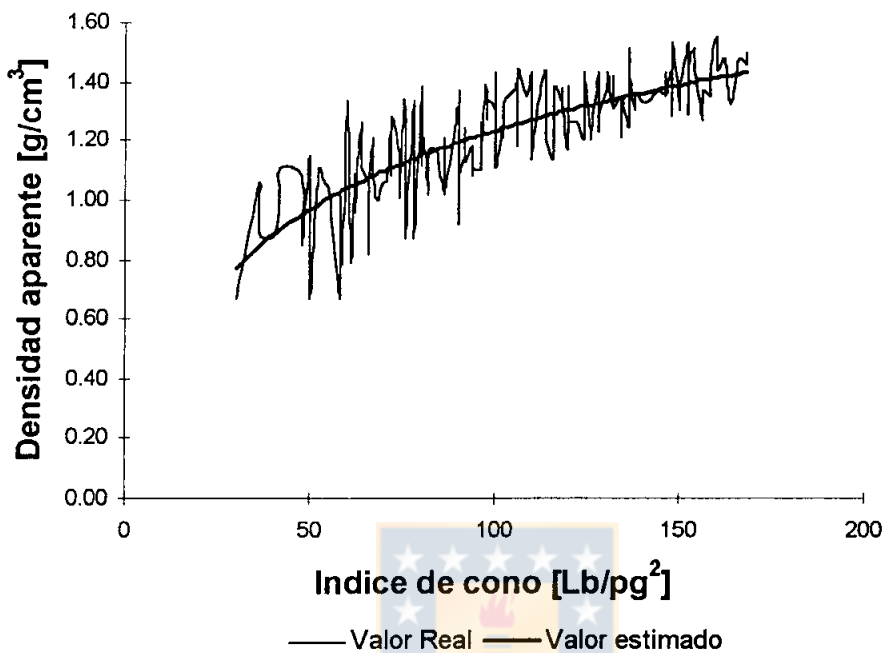


FIGURA 2. Valores reales y estimados para Densidad aparente v/s Índices de cono en la serie de suelos San Esteban.

La figura 3 presenta el análisis de residuos, el cual muestra una distribución homogénea, en donde la apreciación de ambas gráficas (Figura 2 y 3) corrobora la utilización de un solo modelo para la serie.

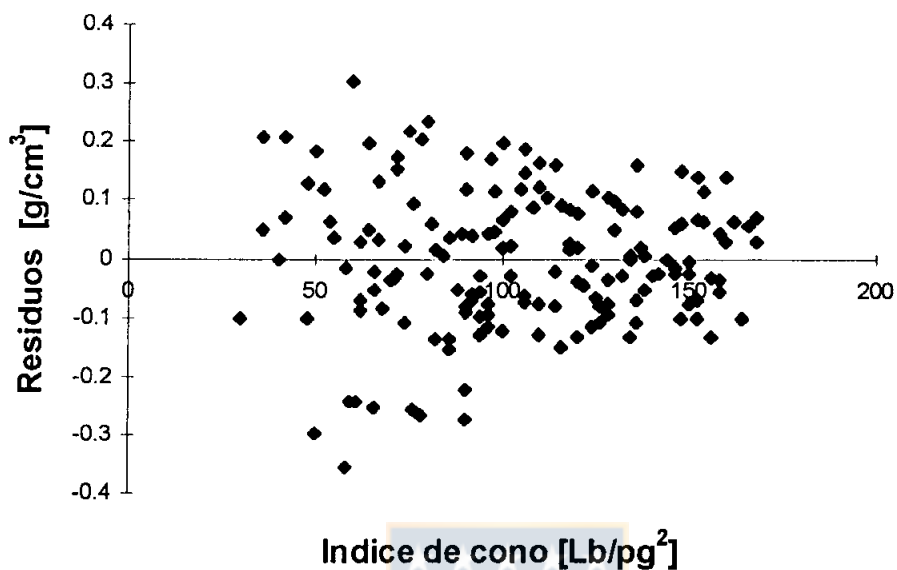


FIGURA 3. Dispersión de residuos para la serie de suelos San Esteban.

TABLA 8. ESTADISTICA ASOCIADA EN LA ESTIMACION DE LA DENSIDAD APARENTE PARA EL MODELO GENERAL DE LA SERIE CAUQUENES.

Modelo	n	\bar{R}^2	EEE	Fm
Dap = F (Ln IC)	45	0.614	0.066	69.45

La figura 4 al igual que la 2, muestra la relación gráfica tanto para los puntos reales como estimados de Y (densidad aparente).

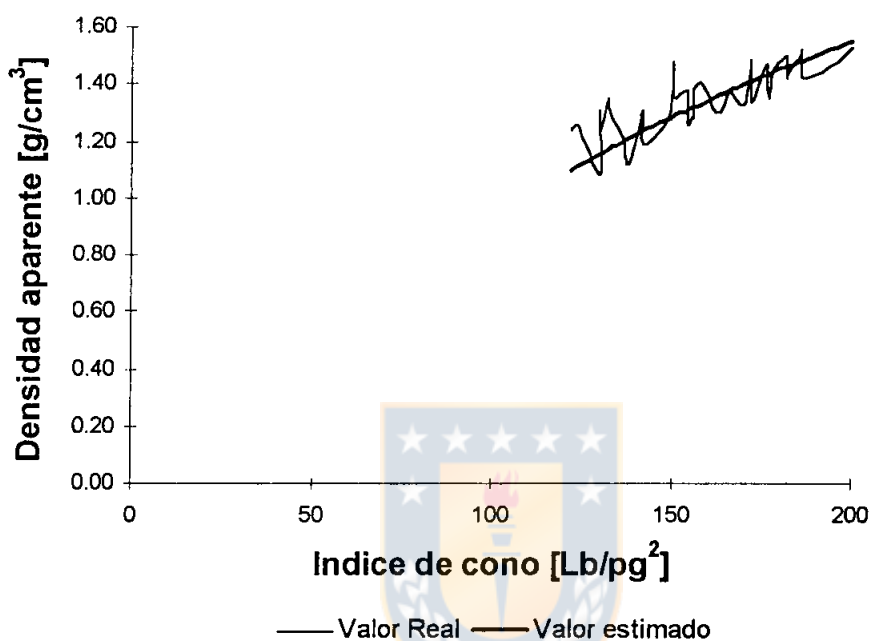


FIGURA 4. Valores reales y estimados para Densidad aparente v/s Índice de cono en la serie de suelos Cauquenes.

El gráfico de análisis de residuos, muestra que la tendencia general es muy clara y, corrobora el resultado del test "F" general.

La principal ventaja del modelo general para esta serie, es que las muestras ocupan rangos diferentes dentro de la agrupación, por lo tanto el modelo general no disminuye significativamente la explicación dada por los modelos individuales (Figura 5).

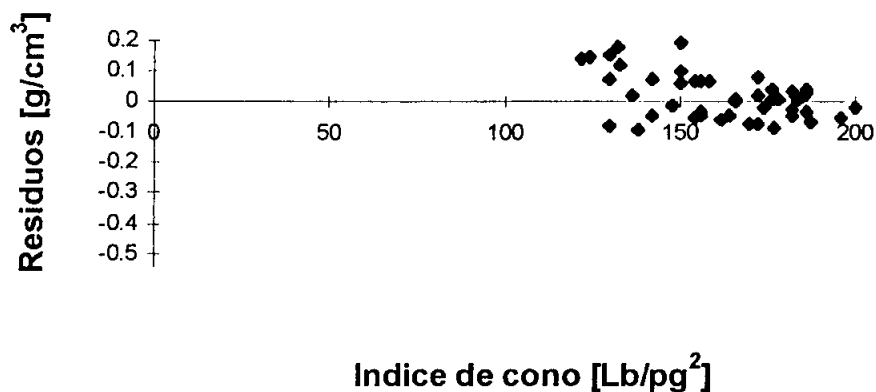


FIGURA 5. Dispersión de residuos para la serie de suelos Cauquenes.

La correcta interpretación de los resultados del ajuste del modelo seleccionado, entregados en la Tabla 7 para la serie ET y en la Tabla 8 para la serie CQ, son de mucha importancia para la determinación de la bondad en la estimación de la densidad aparente.

En este estudio, a pesar de rechazar la hipótesis nula en que el coeficiente estimado para la pendiente es igual a “0”, la variación en la densidad aparente explicada en un 60 % para la serie ET y un 61 % para la serie CQ, no sería muy alentadora. Sin embargo, Gujarati (1995), responde a la pregunta ¿Qué tan buenos son los resultados?, apelando a algunos criterios tales como: primero, los signos de los coeficientes estimados deben estar de acuerdo con las expectativas teóricas o previas. En el modelo ajustado, ambas series responden a la expectativa, ya que a mayor índice de cono mayor es la densidad aparente, en consecuencia se podría decir que el resultado es satisfactorio. Segundo, si la teoría previa indica que un coeficiente determinado es, en términos estadísticos, significativamente distinto de “0”, nuevamente se podría decir que los resultados son

consistentes, ya que las pruebas “t” y “F” para ambas series resultaron significativamente distintas de “0”. Tercero, puesto que el R^2 mide la bondad global del ajuste del modelo de regresión estimado, se puede decir que el modelo es satisfactorio si el valor de R^2 es razonablemente alto, alrededor de 0.8. El R^2 obtenido en este modelo para ambas series de suelo es menor a este valor, pero, si se satisfacen los dos primeros criterios, no debe exagerarse la importancia del criterio de un elevado valor de este coeficiente.

Si a lo anterior se le suma el objetivo con el cual se realizó este estudio, el cual pretende encontrar una herramienta de bajo costo, fácil de utilizar y que sirva como apoyo en la toma de decisiones en la planificación y actividades de manejo, la exigencia a la respuesta del modelo estará orientada a obtener valores referenciales, en los cuales un error de estimación de un 6 a un 11 % no cambiará el curso de alguna decisión.



4.3 Aspectos que producen alteración en el suelo y se relacionan directamente con la densidad aparente

El reemplazo de ciertos cultivos y praderas por plantaciones, generan un aumento del nivel de cobertura y consecuentemente pueden llevar hacia una mayor estabilización del suelo. Este impacto positivo será mayor cuanto mayor sea el grado de degradación del suelo. Sin embargo, las actuales técnicas de preparación de sitios, la situación del bosque y matorral nativo remanente, y la corta de vegetación en las áreas adyacentes a los cursos de agua y quebradas principales, traen como consecuencia un agravamiento de los procesos erosivos y deslizamientos de tierra. También a consecuencia de las faenas de maderío terrestre, desplazamiento de máquinas y arrastre de trozas, se espera mayor compactación, amasado, ahuellamiento y remoción en el suelo (Gayoso, 1995).

Algunos aspectos que se relacionan con lo anterior se describen a continuación.

Compactación de suelos. Por definición la compactación de suelos involucra un aumento en la densidad aparente, debido al reordenamiento y movimiento de partículas estrechamente unidas. Así, la proporción del material de suelo sólido aumenta a expensas de los espacios de aire. Este proceso se lleva a cabo posterior a la aplicación de una carga externa, por ejemplo debido a vehículos de rueda que se mueven sobre la superficie del suelo (Colin, 1993a).

Gayoso (1995), expone que la situación se agrava con el hecho de tener rotaciones cortas que al no permitir la recuperación natural del suelo y a pesar del empleo de técnicas culturales, desarrollarán un efecto acumulativo. Gayoso *et al* (1991), determinaron que entre caminos, canchas y vías de saca no planificadas para madereo con skidders se llega a cubrir hasta un 53.5 % de la superficie total cosechada y que el aumento de la densidad aparente bajo huella alcanza hasta 1.85 veces la densidad de control. Para la especie Pinus radiata D. Don, en suelos alterados por el madereo, se ha medido pérdidas de crecimiento en la altura de los árboles entre 20 y 50 por ciento.

Villa (1994), concluyó que el sistema mecanizado de cosecha compuesto por los equipos harvester y forwarder, causa alteraciones significativas en la densidad aparente, porosidad, resistencia a la penetración y velocidad de infiltración. Las modificaciones provocadas alcanzan hasta los 60 cm de profundidad del suelo. La densidad aparente aumentó en un 17.14 %, 22.45 % y 21.43 % y la porosidad total se redujo un 11.41 %, 13.22 % y 16.01 %; el volumen de macroporos se redujo un 32.85 %, 52.29 % y 32.25 %; y el de microporos aumentó un 35.67 %, 40.51 % y 38.99 %, en huellas de harvester, forwarder y combinada respectivamente.

La compactación trae consigo un aumento en la cohesión y consecuente aumento de la resistencia al corte, lo cual dificulta el desarrollo radicular. Otra consecuencia es la disminución de la permeabilidad por disminución de los macroporos lo cual significa menor disponibilidad de agua en suelo y aumento de la escorrentía superficial (Gayoso e Iroumé, 1993).

Remoción de suelos. El desplazamiento y remoción de suelo se define como el movimiento físico del suelo por los equipos de madereo, el movimiento de las trozas y la construcción de caminos. Tal desplazamiento incluye la excavación y surcos generados por neumáticos, orugas, pisoteo de animales, arrastre de trozas y la exposición del suelo mineral. Los factores más determinantes del desplazamiento del suelo son la pendiente del terreno y la complejidad de las laderas, el tipo de madereo y patrón de desplazamiento de los equipos, el ancho y densidad de caminos (Gayoso, 1995).

De acuerdo con la maquinaria comúnmente empleada en las faenas de cosecha, principalmente tractores arrastradores sobre neumático de ancho estándar, el suelo recibirá presiones estáticas superiores a 130 Kpa. Consecuentemente por las condiciones del suelo, se puede esperar la formación de ahuellamientos profundos y remoción de suelo. La profundidad de las huellas y dragado del suelo depende además de las propiedades intrínsecas de éste, de la condición de humedad y de la carga y número de pasadas del equipo (Gayoso, 1995).

Como los equipos se han incrementado en tamaño y masa, los diseñadores han aumentado el tamaño y diámetro de la llanta para mantener la presión por unidad de superficie del suelo completamente constante. Cabe destacar, que a pesar que esos desarrollos incrementan la carga total del eje, es causa de compactación a lo largo de todo el perfil e incluso en profundidad. Si a lo anterior agregamos el número de pasadas, el cual a mayor número, mayor es la compactación causada. El tipo de respuesta a

múltiples pasadas, dependerá marcadamente de las condiciones iniciales del suelo, los cuales si inicialmente están disgregados o sueltos, mostrarán un incremento mucho mayor en la compactabilidad durante la primera pasada en la superficie que en las pasadas siguientes, las cuales afectan en mayor grado a los estratos inferiores del suelo (Colin, 1993a).

Villa *et al* (1995), muestra que las curvas de densidad aparente tienen diferencias de magnitudes muy acentuadas en los 10 primeros centímetros en el madereo con harvester, forwarder y skidder, obteniendo los máximos valores bajo la superficie. Lineros (1994), explica que lo anterior se debe a la destrucción de la estructura a nivel superficial a causa de la tracción del sistema de rodado que aminora el efecto a los 0.0 cm y por otra parte al choque de la fuerza normal ejercida por la máquina hacia el suelo y la fuerza de reacción de éste, siendo esto último lo más importante.

Endurecimiento. En muchas áreas altamente desgastadas y con estructuras débiles, los suelos presentan subsuelos muy firmes o aparentemente compactados. Esta falla frecuentemente se relaciona con los bajos niveles de materia orgánica de la cubierta del suelo y a la naturaleza ácida de éste, lo que lleva a un comportamiento ligeramente dispersivo. La migración de arcilla hacia estratos inferiores, puede dar como resultado un aumento en la densidad aparente del subsuelo y de la fuerza del suelo, por consiguiente éste aparece compacto sin haber sido sometido a una carga externa (Colin, 1993b).

4.4 Algunas medidas prácticas de planificación para la mitigación del impacto al suelo

Para lograr una eficiente conservación del recurso suelo y lograr no disminuir su productividad al largo plazo, debido fundamentalmente a las faenas de cosecha, se requiere una adecuada planificación de operaciones (Lewis, 1991).

Las posibilidades que ofrece la planificación de operaciones con respecto a ciertas restricciones que ofrecen los suelos, consideran la intensidad, estándar y localización de los caminos forestales, el tamaño y forma de la unidad de cosecha, la oportunidad en el año y período de corta y el madereo, la selección del sistema, equipo y procedimiento de madereo y transporte (Gayoso, 1995). Algunas otras medidas se detallan a continuación :

Vías de saca. La planificación de las vías de saca en forma previa a la corta, da como resultado una disminución del impacto al suelo. En ejemplos nacionales se han medido hasta 900 m de vías de madereo de tractor forestal por hectárea, siendo suficiente desde un punto de vista teórico sólo 200 m/ha. Una situación cercana a la teoría permitiría reducir el área impactada por este concepto en 20 por ciento. Además, la planificación del madereo cuesta abajo consume menos energía y produce una menor alteración al suelo, especialmente en suelos húmedos (Gayoso e Iroumé, 1989).

Si a la planificación de las vías de saca, se le asocia equipos de baja presión básica al suelo, se disminuirá también la intensidad de la compactación. Además diseñar los caminos de madereo evitando la máxima pendiente, sin movimiento de tierras y una vez terminada la intervención, cortarlos transversalmente de tal forma de impedir la socavación por agua, favoreciendo la reimplantación de la vegetación en las áreas compactadas (Gayoso, 1995).

Construcción de caminos. La adecuada planificación, localización, construcción y mantenimiento de los caminos tanto para el madereo como para el transporte mayor, también ayudaría a disminuir los impactos sobre el área de cosecha.

El diseño y construcción de los caminos debe considerar medidas mitigadoras, las que comprenden evitar los trazados en áreas de fragilidad muy alta o con pendientes fuertes, disminuir tanto como sea posible el movimiento de tierra, disminuir el ancho de la plataforma, evitar la construcción de caminos en las franjas de filtraje, disminuir el volumen y la velocidad del agua en las cunetas, disminuir los ángulos de los taludes de corte, colocar camellones de filtraje sobre los taludes de terraplén, estabilizar mecánica y biológicamente los taludes, reducir cunetas cuando se superen las pendientes críticas de socavación, compactar y mantener las carpetas de rodado. Considerar en todos los caminos la adecuada canalización de las aguas y localizar las descargas de cunetas y alcantarillas que sea necesario construir, con el fin de dar una salida rápida al agua y evitar la acumulación de grandes volúmenes que una mayor fuerza erosiva (Gayoso, 1995).

La cosecha forestal en terrenos de baja capacidad de soporte se ha realizado tradicionalmente con tractores sobre orugas y sistemas de cable aéreo. En los últimos años la literatura especializada hace referencia al uso de neumáticos de alta flotación en tractores arrastradores. La presión en el área de contacto disminuye de 80 KPa en tractores con neumáticos convencionales a 20 KPa con neumáticos especiales, disminuyendo también fuertemente la profundidad del ahuellamiento (Gayoso e Iroumé, 1989).

Lewis (1991), agrega que una reducción en el tamaño del equipo, se traduce en reducciones directamente proporcionales en la altura de corte. Así por ejemplo, un 33 % de la reducción en el ancho del camino de madereo usando tractor oruga, implica

reducciones del 33 % en la altura de corte, con su correspondiente disminución en el área y volumen de excavación, variando desde un 50 a un 60 %.

Cosecha y nutrientes del suelo. La utilización de técnicas de cosecha que permitan dejar en el piso la copa, las hojas y la corteza evitándose la quema de los desechos, contribuirá a recuperar gran parte de los nutrientes del árbol. Además, la utilización de maquinaria en reemplazo del roce manual y la quema, y la sustitución del control químico por el mecánico y biológico (a través de animales domésticos), contribuye en gran medida a la conservación del sitio (Gayoso, 1995).

Clinch y Logan (1991), en el manual de las mejores prácticas forestales BMPs del estado de Montana, especifica algunas normas de protección respecto a la cosecha forestal, de los cuales se enumeran algunas a continuación : protección de los cursos de agua evitando la destrucción de los filtros de vegetación y el cruce del cauce (anchos del filtro a ambos lados del curso, varían entre 20 a 100 m según fragilidad del terreno), realizar el volteo y la acumulación de desechos sobre la curva de nivel evitando cruzar la franja de filtro con los árboles, para disminuir el ahuellamiento suspender las operaciones en períodos muy lluviosos, cerrar aquellos caminos en desuso reforestándolos y proporcionar una adecuada mantención a los vigentes.

Maquinaria. Colin (1993a), especifica una serie de medidas bastante claras para limitar el grado y la extensión de la compactación. Estas se detallan a continuación :

- Reducir el promedio de presión de contacto de la llanta, bajo 200 KPa
- Usar vehículos con el mayor aro de rueda posible
- Evitar el exceso de carga

- Mantener el número de pasadas sobre una misma huella en el mínimo, a menos que sea una ruta principal
- Evitar tomar atajos sobre todo en tiempo lluvioso por líneas de drenaje descendente, lecho correntoso o terreno con pendiente
- Limitar las cosechas en época de invierno
- Mantener las vibraciones del equipo en el mínimo
- Evitar el patinaje y el innecesario roce o deslizamiento de la rueda.



V. CONCLUSIONES

1. El modelo seleccionado para la serie Cauquenes y San Esteban, del tipo $Y=a+b*\ln(X)$, presentó los menores valores de EEE en todo el perfil y menor EEG para el modelo general. Además la generalización del ajuste para ambas series de suelo, presentó la aceptación de la hipótesis nula , siendo suficiente un ajuste general para el perfil en ambas serie.
2. La bondad en la estimación de la densidad aparente en las dos series de suelo, resultado satisfactoria, tomando en cuenta, que la exigencia a la respuesta del modelo está orientada a obtener valores referenciales.
3. La planificación orientada hacia la mitigación del impacto al suelo, la utilización de técnicas de protección en la cosecha, antes y después de realizadas las faenas, la capacitación adecuada del personal encargado de dirigir y ejecutar la operación, la selección de equipos de bajo impacto y el aumento de trabajos dirigidos a profundizar sobre este tema, nos permitirá contar con un patrimonio “suelo” acorde con la exigencia en futuras rotaciones.

VI. RESUMEN

En base a la información contenida en el proyecto FIA “Suelos Forestales de la VIII región”, se seleccionaron y probaron algunos modelos de regresión con el objeto de estudiar la densidad aparente en función de la resistencia a la penetración (valores de índice de cono), en las series de suelo Cauquenes y San Esteban, ubicados en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa. Además, se anexó la revisión de algunos aspectos que producen alteración sobre las características físicas del suelo y las posibles vías de mitigación encontradas en la bibliografía existente.

El modelo seleccionado tanto para la serie Cauquenes como para la serie San Esteban, resultó ser $Y = a + b * \ln(X)$. El EEE para la serie Cauquenes alcanzó un 6,6% y un 11,7% para la serie San Esteban, siendo los más bajos entre los modelos estudiados.

Para ambas series de suelo resultó suficiente la utilización de un modelo general, en el cual, el porcentaje de explicación de la densidad aparente por el índice de cono fue de 61% para la serie Cauquenes y 60% para la serie San Esteban, siendo esto un resultado satisfactorio para el nivel de exigencia pedido al modelo, el cual se orienta a obtener valores referenciales.

SUMMARY

Based on the information included in the FIA project “Forestry soils in the eighth region”, some regression models were selected and approved in order to study the dry bulk density in function to the penetration resistance (cone index values), on the Cauquenes and San Esteban soil series, that are located in the eastern watershed on the Coast Cordillera. Likewise, it was annexed the revision of some aspects which cause alteration on soil physical characteristic and feasible ways of mitigation found in the existent bibliography.

The selected model for Cauquenes serie and San Esteban serie, was $Y=a+b*\ln(X)$. The EEE for Cauquenes serie reached 6.6 % and 11.7 % for San Esteban serie, being lower among the studied models.

For both series soil, it was enough the use of a general model in which the percentage of explanation of dry bulk density by cone index was 61 % for Cauquenes serie and 60 % for San Esteban serie, being this a satisfactory result for the level demanded by the model, which is oriented to obtain referential values.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Adams, P. W. And H. A. Froehlich. 1980. Compaction of forest soils. PNW 217. A Pacific Northwest Extension Publication, Oregon, U.S.A.
2. Ayers, P. D. and J. V. Perumpral. 1982. Moisture and density effect on cono index. Trans. ASAE. 25(5):1169-1172.
3. Clinch, B. y Logan, B. 1991. Forestry Best Management Practices BMP's. Extension Publication Montana State University. Montana, USA.
4. Colin, S. 1993. Tentative Guidelines for Soil Physical Management of South African Forestry Soil. Part I: Soil Compaction. pp 470-475. En tutorial de planificación de cosecha y distribución de canchas de madereo. Fundación Chile Concepción. Chile.
5. Colin, S. 1993. Tentative Guidelines for Soil Physical Management of South African Forestry Soil. Part II: Soil Sensitivity and Soil physical properties. pp 476-479. En tutorial de planificación de cosecha y distribución de canchas de madereo. Fundación Chile. Concepción, Chile.
6. Donoso, Z. C. 1981. Ecología Forestal : el bosque y su medio ambiente. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

7. Ellies, A. y R. Mac Donald. 1989. Las propiedades físico-mecánicas en los suelos que afectan su drenaje. pp 46-63. Bol N° 9. Sociedad Chilena de la Ciencia del suelo. Valdivia, Chile.
8. Ellies, A., R. Mac Donald y C. Ramírez. 1993. Variación de la estructura de un suelo forestal sujeto a distintos manejos. pp 110-134. Bol. N° 10. Sociedad Chilena de la Ciencia del suelo. Valdivia, Chile.
9. FIA-Universidad de Concepción. 1990. Suelos Forestales de la VIII región. Informe final. Chillán, Chile.
10. Fuentes, A. 1993. Compactación de suelo por equipos mecanizados terrestres en la cosecha forestal. Memoria de Título. Univ. de Concepción. Fac. de Cs. Forestales. Dpto. Manejo de Bosques y Medio Ambiente. Chillán, Chile.
11. García, O. 1974. Ecuaciones Altura-Diámetro para pino insigne. Nota técnica N° 19. Instituto Forestal. Santiago, Chile.
12. Gayoso, J. y A. Iroumé. 1989. Daño en suelos forestales asociado a faenas de maderero. Medio Ambiente 10(1):70-79.
13. Gayoso, J., A. Iroumé y A. Ellies. 1991. Degradación de suelos forestales asociada a operaciones de cosecha. En: Actas III Taller de Producción Forestal. Noviembre 1991. Cap XI. Fundación Chile. Concepción, Chile.

14. Gayoso, J. y A. Iroumé. 1993. Impacto al suelo por efecto de la cosecha forestal. pp 98-106. Bol. N° 10 .Soc. Chilena de la Ciencia del Suelo. Valdivia, Chile.
15. Gayoso, J. 1995. Impacto de plantaciones sobre el ambiente físico. En: J.E. Schlatter y V. Gerding (Ed). Manejo nutritivo en plantaciones forestales. Actas Simposio IUFRO para Cono Sur Sudamericano. Abril 1995. Univ. Austral de Chile. Valdivia, Chile.
16. Gujarati, D. 1995. Econometría. Segunda edición. McGraw - Hill Interamericana de México, S.A., de C. V. México. pp 102-171.
17. Hattingh, J. M. 1993. Soil compaction under different forest harvesting techniques. Informe N°13. Fundación Chile. Concepción, Chile.
18. Lewis, T. 1991 . Developing timber harvesting prescriptions to minimize site degradation. Rep. N° 62. Land Manage. B.C. Min. For., Victoria, B.C.
19. Lineros, M. 1994. Efectos de la cosecha mecanizada en la compactación de suelos forestales. Tesis de Posgrado. Univ. de Concepción. Fac. de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
20. Mendenhall, W. 1990. Estadística para administradores. Segunda edición. Grupo Ed. Liberoamérica S.A., de C. V. México. pp 439-557.
21. Ohu, J. O., G. S. Raghavan and E. McKyes. 1988. Cone index of compacted soils. Trans. ASAE. 31(2):306-310.

22. Ostle, B. 1965. Estadística aplicada : Técnicas de la estadística moderna, cuando y donde aplicarlas. Limusa. México. pp 251-269.
23. Pritchett, W. 1991. Suelos Forestales : Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México.
24. Toro, J. 1991. La mecanización de faenas forestales y su relación con la degradación de suelos. En : Actas III Taller Producción Forestales. Noviembre 1991. Cap. XX. Fundación Chile. Concepción, Chile.
25. Villa, P. 1995. Evaluación de la compactación de suelo causada con sistema de cosecha harvester - forwarder. Memoria de Título. Univ. de Concepción. Fac. de Cs. Forestales. Dpto. Silvicultura. Concepción, Chile.
26. Villa, P. y Landeros, R. 1995. Comparación de la compactación de suelo causada con sistema de cosecha harvester - forwarder y equipo de cosecha skidder. En: Actas V Taller de Producción Forestal. Noviembre 1995. Cap. XI. Fundación Chile. Concepción Chile.
27. Weisberg, S. 1980. Applied linear regresion. Editorial John Wiley & Sons. Toronto, Canadá. pp 88-167.
28. Zeide, B. 1993. Analysis of Growth Equations. For. Sci. 39(3) : 594-616.

