



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES.
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL**

***CAMBIOS EN LA LOCALIZACIÓN DE
CAMINOS Y DETERMINACIÓN DE LOS
COSTOS TOTALES DE COSECHA.***

JUAN REINALDO ROJAS GONZÁLEZ
Memoria para optar al Título Profesional
De Ingeniero Forestal

Profesor Guía : Sr. Rodolfo Neuenschwander Alvarado

**TALCA-CHILE
2004**



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES.
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

El Sr. Juan Reinaldo Rojas González, ha realizado la Memoria : "Cambios en la localización de caminos y determinación de los costos totales de cosecha ", como uno de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal. El Profesor Guía es el Sr. Rodolfo Neuenschwander Alvarado.

La comisión de Calificación constituída por los profesores Sr. Rodolfo Neuenschwander Alvarado, Sr. Darío Aedo Ortiz, han evaluado con nota 5,4 (cinco coma cuatro)

CRISTIAN LOPEZ MONTECINOS
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

Talca, Septiembre de 2004

ÍNDICE.

RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivo específico.....	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Planificación forestal.....	5
3.2. Distancia promedio de madereo.....	6
3.2.1. DPM en superficies planas.....	7
3.2.2.Determinación de DPM usando el cálculo integral.....	8
3.3. Espaciamiento entre canchas.....	12
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1. Algoritmo Neuenschwander, Ramírez.....	13
4.2. Modificación al modelo Neuenschwander, Ramírez.....	13
4.3. Función de costos totales.....	15
4.3.1. Modelo de costos constantes.....	15
4.3.2. Costos de extracción.....	16
4.3.2.1. Costos del madereo.....	16
4.3.2.2. Costos de canchas.....	20
4.1.3. Espaciamiento entre canchas.....	22

4.1.3.1. Espaciamiento tentativo.....	22
4.1.3.2. Espaciamiento real entre canchas.....	22
4.4. cambios en la ubicación del camino.....	23
4.4.1. Cálculo de la DPM cuando el modelo base es modificado.....	23
4.4.1.1. Aplicación de AutoCad Map para calculo.....	24
5. RESULTADOS.....	27
5.1. Aplicación del algoritmo a un caso práctico.....	27
5.1.1. Variables de entrada.....	28
5.1.2. Cálculos intermedios.....	29
5.1.3. Evaluación de alternativas.....	30
5.1.4. Variables de salida.....	31
5.2. Cálculos y resultados al modificar el modelo base.....	32
5.2.1. Camino desplazado a 100 m de la mitad del rodal.....	32
5.2.2. Camino ubicado en forma diagonal a los bordes del rodal.....	34
5.3. Comparación de los resultados.....	36
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	37
7. CONCLUSIONES.....	40
8. BIBLIOGRAFÍA.....	41
ANEXO N°1.....	43
ANEXO N°2.....	44
APÉNDICE N°1.....	45
APÉNDICE N°2.....	47
APÉNDICE N°3.....	48
APÉNDICE N°4.....	49
APÉNDICE N°5.....	50

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Variables de entrada para el modelo base.....	28
Tabla 2: Cálculos intermedios para el modelo base.....	29
Tabla 3: Evaluación de costos para N1 y N2 del modelo base.....	30
Tabla 4: Variables de salida para el modelo base.....	31
Tabla 5: Costos totales para el camino desplazado 100 m del centro del rodal....	32
Tabla 6 : Variables de salida, camino desplazado 100 m del centro del rodal.....	33
Tabla 7: Costos totales, camino ubicado en forma diagonal a los bordes del rodal.....	35
Tabla 8: Variables de salida, camino ubicado en forma diagonal.....	35
Tabla 9: Comparación de costos, de las distintas ubicaciones del camino en el rodal.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Madereo directo a camino.....	6
Figura 2: Cálculo de DPM en base al centro geométrico.....	7
Figura 3 Superficie a ser cosechada.....	9
Figura 4: DPM en triángulos escálenos.....	11
Figura 5: Rodal para aplicar algoritmo Neuenschwander, Ramírez.....	13
Figura 6: Rodal con las diferentes inclinaciones del camino.....	14
Figura 7: Rodal rectangular con la ubicación de las canchas.....	18
Figura 8: Sector de un rodal rectángula.....	19
Figura 9: Rodal rectangular con las distintas áreas de abastecimiento divididas en triángulos escálenos.....	24
Figura 10: Rodal a escala con las dimensiones (A, P), camino inclinado, ubicación de canchas y triángulos que se forman en su interior.....	25
Figura 11: Rodal a escala con la inclinación del camino.....	32
Figura 12: Rodal con camino ubicado en forma diagonal.....	34
Figura 13: Salida AutoCad Map para empezar a dibujar.....	45
Figura 14: Triángulo dibujado en AutoCad Map.....	46

RESUMEN.

En el presente estudio se genera una metodología para calcular los costos totales de la cosecha forestal, en rodales rectangulares con poca pendiente y en donde el madereo se realiza a canchas, las que se encuentran ubicadas a lo largo de caminos, los que a su vez tienden a seguir la diagonal del rectángulo que forma el rodal.

Este trabajo se sustenta en el algoritmo creado por Neuenschwander, Ramírez (2002), este algoritmo determina el número óptimo de canchas de madereo, y además el costo total de cosecha en rodales rectangulares en donde el camino se encuentra ubicado en forma paralela a los lados del rodal.

La idea es comparar los costos de cosecha que se producen al aplicar el algoritmo a un caso práctico, en donde el camino está dispuesto en forma paralela a los lados del rodal, con los costos que se generan para este mismo caso práctico pero en donde el camino ya no es paralelo, sino que sufre diferentes inclinaciones con respecto a los lados del rodal.

Básicamente se analiza qué pasa con los costos en dos situaciones específicas; la primera cuando el camino está desplazado a 100 m de la mitad del rodal y la segunda cuando el camino se ubica en forma diagonal a los lados del rodal.

Los resultados obtenidos reflejan claramente que; al aumentar la inclinación del camino el costo de la cosecha aumenta considerablemente, esto se debe principalmente al aumento de la distancia promedio de madereo (DPM).

SUMMARY.

This study generates a method for calculating the total costs of forest harvesting in rectangular stands with little slope and where the skidding goes to landings located along roads, which follow the diagonal of the rectangle that forms the stand.

This paper supports the algorithm created by Neuenschwander, Ramírez (2002). This algorithm determines the best number of landings and also, the total cost of harvesting in rectangular stand where the road is located in parallel form to the sides of the stand.

The idea is to compare the harvesting costs produced when the algorithm applied to road system parallel to the sides of the rectangle and the costs where the road is not parallel but rather under goes different inclinations to the sides of the rectangle creating a diagonal road through the stand.

Basically two situations are analyzed for their development of costs. The first one is where the road is at 100 m from the centre of the stand and the second is where the road is located diagonally to the sides of the stand.

The results obtained show that; when increasing the inclination of the road, the harvest costs rise considerably, this is mainly due to the increase of skidding average distance (DPM).

1. INTRODUCCIÓN.

El sector forestal chileno ha sufrido en los últimos años un significativo incremento, llegando a ser hoy el segundo sector más importante en ingresos monetarios por concepto de exportación. Esto trae consigo una serie de nuevos desafíos tendientes a mejorar los distintos procesos de producción, sea en la parte operativa, administrativa, ambiental.

Es por esto que la planificación forestal cumple un papel importante al momento de determinar los costos totales de la cosecha forestal; hacer una buena planificación es sinónimo de ordenamiento y de buenos resultados. Sin lugar a dudas que planificar un sistema donde existe una gran cantidad de variables trae una serie de problemas, los cuales deben ser evaluados y tomados en cuenta al momento de realizar la planificación.

Actualmente, gran parte de las faenas realizadas en Chile utilizan el madereo a canchas con el objeto de centralizar el trozado y ordenamiento de la madera para su posterior carguío en los camiones. Las canchas de madereo son caras de construir y afectan directamente al área de abastecimiento, por esta razón es importante que su ubicación dentro del rodal sea la más adecuada para así reducir los costos totales de la cosecha.

2. OBJETIVOS.

2.1 Objetivo General.

Establecer las variaciones que se producen en el costo de la cosecha forestal cuando el camino experimenta cambios en su inclinación dentro del rodal rectangular.

2.2 Objetivos Específicos.

Determinar alteraciones en las distancias promedios de madereo, cuando el camino cambia de ubicación en el rodal.

Comparar costos de madereo cuando el camino sufre cambios en su inclinación dentro del rodal.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

3.1. Planificación forestal.

Uno de los principales objetivos que pretende la planificación de la cosecha forestal es optimizar la asignación de los recursos disponibles y minimizar los costos. Dentro del sub-sistema de madereo es relevante la relación de costos, y una de las variables que pasa a ser crítica está definida por la distancia que recorren los medios de transportes desde la zona de corta hasta los lugares de acopio. Dicho trayecto se calcula como una distancia promedio de madereo (DPM) (Troncoso, 1996).

La toma de decisiones en la planificación de la cosecha forestal es una tarea muy compleja considerando la gran cantidad de variables que van a intervenir en las operaciones. Por ello, es imprescindible incorporar herramientas de tipo cuantitativo que entreguen estándares para dichas variables y con las cuales facilitar el trabajo del planificador (Troncoso, 1996).

Para Conway (1982), la planificación es fundamental, puesto que permite conectar a los componentes de un sistema; además identifica y resuelve los problemas, a la vez que se reconocen las restricciones y con ello se permite una adecuada distribución de los recursos que son más escasos.

3.2. Distancia promedio de maderero (DPM).

Según Ramírez (2001), la DPM se puede definir como la distancia media a recorrer por la maquinaria para trasladar la madera dentro de un rodal a un punto determinado. Esta es una de las variables más importantes que influyen dentro de los costos de las faenas de extracción que intervienen para la generación del modelo total de costos.

Según Conway (1982), el tamaño de las canchas debe ser adecuado para permitir la recepción de la madera que proviene del maderero y el posterior carguío sobre los camiones para el transporte. Los autores Aedo, Neuenschwander y Chacón (1998), mencionan que la extracción de madera mediante, equipos mecanizados como son los skidders, operan en condiciones adecuadas cuando las DPM fluctúan entre los 100 y 300 m.

Según Matthews (1942), cuando el maderero se realiza directamente a caminos (ver Figura 1), la DPM es fácilmente determinada multiplicando la profundidad del rodal (P), por el factor 0.5, sin embargo, en los procesos de maderero a canchas o puntos de acopio en el bosque, donde no se considera la construcción de caminos en el interior de los rodales, el cálculo se hace más complejo.

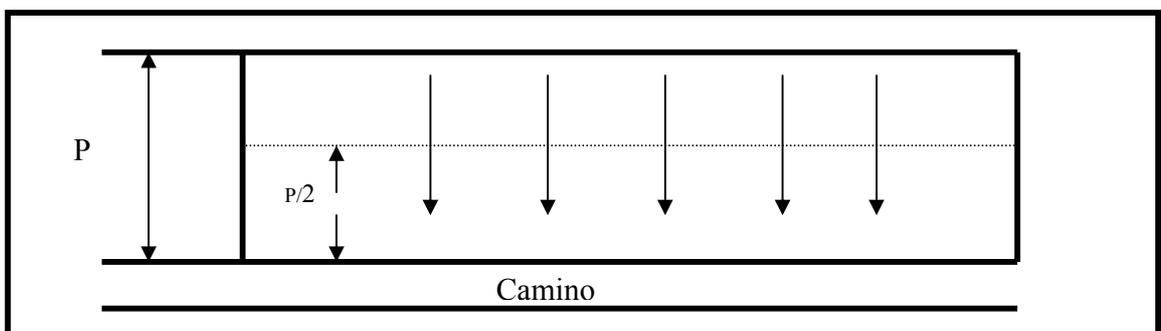


Figura 1 : Maderero directo a camino.

3.2.1. DPM en superficies planas.

El cálculo de la DPM a canchas, para superficies planas asimiladas a triángulos rectángulos, donde la cancha de madereo se posiciona en uno de los vértices del triángulo, se determina encontrando la distancia que existe entre la cancha y el centro geométrico del triángulo rectángulo. La distancia desde este punto a cualquier vértice del triángulo es aproximadamente equivalente a la distancia promedio desde todos los puntos al interior del área del triángulo, a uno de los tres vértice (Matthews, 1942)

La regla para encontrar el centro de gravedad de un triángulo rectángulo es trazar la perpendicular a cada uno de los lados que conforman el ángulo recto, a la distancia de un tercio desde el vértice. El centro geométrico del triángulo es determinado por el punto de intersección de estas perpendiculares dentro del área del triángulo.

El cálculo de DPM para triángulos rectángulos usando el método planteado por Matthews, dependerá del lugar en el cual se encuentra la cancha, como se muestra en la Figura 2.

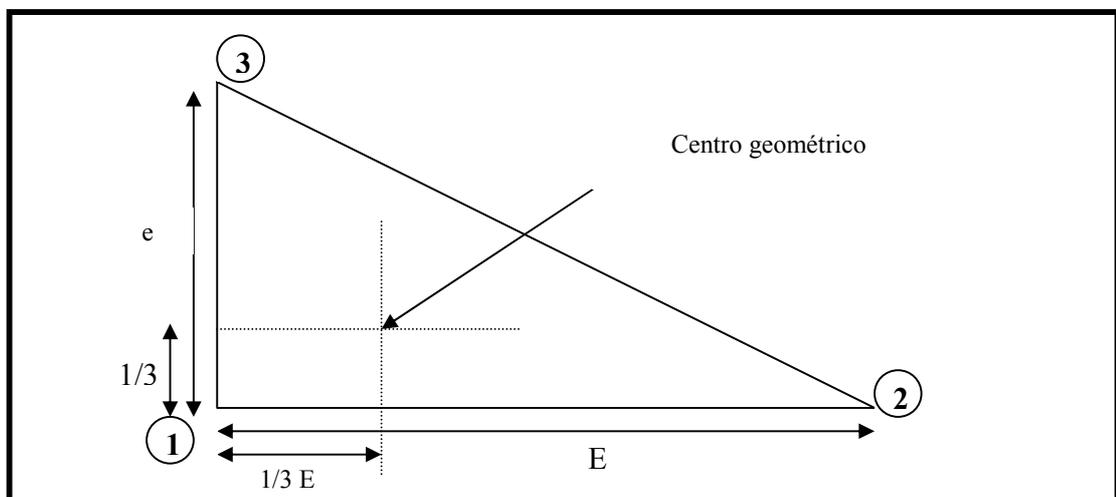


Figura 2: Cálculo de DPM en base al centro geométrico.

Si la cancha de madereo, se encuentra en el vértice número 1, la fórmula para calcular la DPM en dicha área es:

$DPM_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{3}e\right)^2 + \left(\frac{1}{3}E\right)^2}$	[1]
--	-----

Para la posición 2, la DPM queda definida por la siguiente ecuación:

$DPM_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{3}e\right)^2 + \left(\frac{2}{3}E\right)^2}$	[2]
--	-----

Y por último, si la cancha es ubicada en el vértice número 3 la ecuación que entrega la DPM es:

$DPM_3 = \sqrt{\left(\frac{1}{3}E\right)^2 + \left(\frac{2}{3}e\right)^2}$	[3]
--	-----

3.2.2. Determinación de DPM usando el cálculo integral.

Suddarth y Herrick (1964), presentan una nueva metodología para el cálculo de la DPM basándose en figuras geométricas planas y aplicando el cálculo integral.

Para la metodología desarrollada por Suddarth y Herrick se considera la Figura 3, la cual representa una superficie a ser cosechada, donde en el punto 0 se ubica la cancha de acopio, el área total es A y Xi es la longitud de un madereo directo desde un punto a la cancha.

Si se realizan n madereos, la distancia promedio recorrida (DPM) expresada en forma matemática es la siguiente:

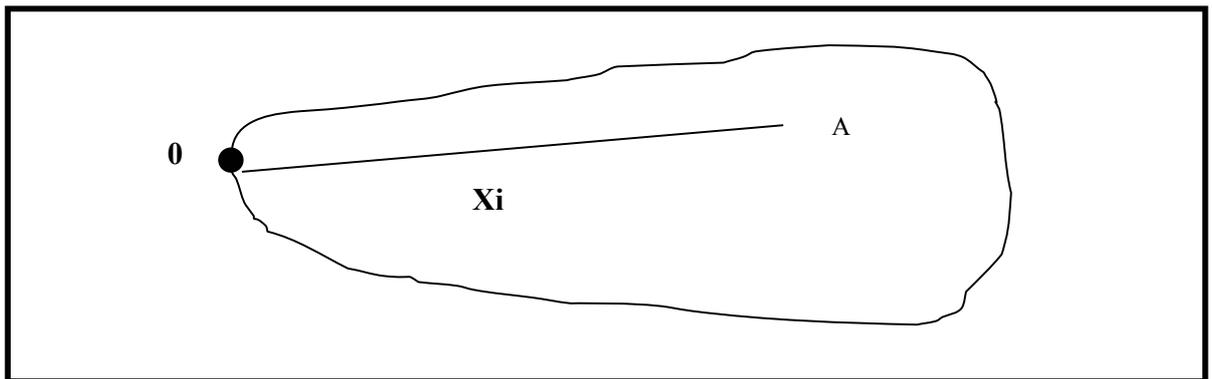


Figura 3: Superficie a ser cosecha.

$DPM = \frac{X1 + X2 + \dots + Xn}{n}$	[4]
--	-----

$DPM = \frac{X1}{n} + \frac{X2}{n} + \dots + \frac{Xn}{n}$	[5]
--	-----

Multiplicando ambos lados de la ecuación [5] por la constante A (área total) se tiene:

$DPM * A = \frac{X1 * A}{n} + \frac{X2 * A}{n} + \dots + \frac{Xn * A}{n}$	[6]
--	-----

$DPM * A = \sum_{i=1}^n (Xi * DeltaAi)$	[7]
---	-----

La expresión A/n representa una subdivisión del área A , la cual puede ser representada por un diferencial de área (ΔA_i), donde:

$$\Delta A_1 = \Delta A_2 = \dots = \Delta A_n = A/N$$

De la ecuación [7], considere que los intervalos de área (ΔA_i) tienden a cero ($\Delta A_i \rightarrow 0$) y n tiende a un valor infinito ($n \rightarrow \infty$). Si X se define como una función continua a lo largo de toda el área A se tiene:

$DPM * A = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (X_i * \Delta A_i)$	[8]
---	-----

$DPM * A = \int AX dA$	[9]
------------------------	-----

$DPM = \frac{1}{A} \int AX dA$	[10]
--------------------------------	------

Donde:

DPM = Distancia promedio de madereo.

A = Área total a cosechar.

X = Función continua sobre A.

dA = Diferencial área.

En función de la expresión [10], Suddarth y Herrick desarrollan fórmulas para calcular la DPM en diferentes figuras geométricas.

En años posteriores, Peters (1978), tomó como base el modelo desarrollado por Suddarth y Herrick, y creó una fórmula para el cálculo de la DPM para cualquier triángulo, como se muestra a continuación en la Figura 4.

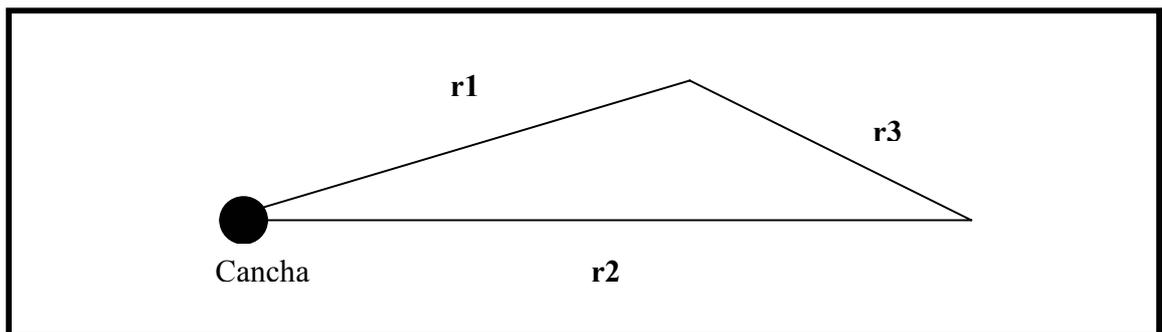


Figura 4: DPM en triángulos escálenos.

De la Figura 4 se desprende la ecuación [11] para el cálculo de la DPM en cualquier triángulo.

$DPM = \left(\frac{r_1 + r_2}{6r_3^2} \right) * [r_3^2 + (r_1 - r_2)^2] + \frac{[r_3^2 - (r_1 - r_2)^2] * [(r_1 + r_2)^2 - r_3^2]}{12r_3^2} * Ln \left[\frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2 - r_3} \right]$	[11]
---	------

Donde;

r1, r2: Lados que forman el ángulo agudo (cancha).

r3 : Lado opuesto al vértice donde se encuentra la cancha.

Cabe señalar, que para poder aplicar esta ecuación, en el cálculo de la DPM se debe cumplir lo siguiente:

1.- La madera se encuentra uniformemente distribuida en toda el área a cosechar.

2.-La cancha de madereo debe estar ubicada en uno de los vértices del triángulo.

3.-El madereo se realiza en línea recta y las superficies triangulares serán planas.

3.3. Espaciamiento entre canchas.

Peters (1978) crea un algoritmo que permite encontrar el espaciamiento entre canchas y el espaciamiento entre caminos bajo el criterio de los mínimos costos. Las desventajas del algoritmo radican en que no considera las dimensiones del área de cosecha, por lo que, el número de canchas y de caminos que se localicen a los espaciamientos respectivos podría no otorgar los mínimos costos totales de cosecha.

Neuenschwander, Ramírez (2002), plantean un algoritmo que resuelve el problema para determinar el número de canchas de madereo cuando la superficie es un área plana y rectangular y el camino es paralelo a los lados del rectángulo que forman el rodal como lo muestra la Figura 5.

Según Ramírez (2001), aunque el algoritmo permite una planificación eficiente de faenas de cosecha a costo mínimo, aspectos de protección ambiental no son considerados y dado que los objetivos económicos se contraponen a los ambientales, por lo tanto es el planificador el que debe balancear estos aspectos y darle la ponderación mas adecuada a estas variables.

4. METODOLOGÍA.

4.1. Algoritmo Neuenschwander, Ramírez.

El algoritmo permite encontrar el espaciamiento entre canchas, el número óptimo de canchas de maderero y el costo total de la cosecha. El algoritmo es aplicable sólo a rodales rectangulares y donde el camino está dispuesto en forma paralela a los lados del rectángulo como se puede ver en la Figura 5.

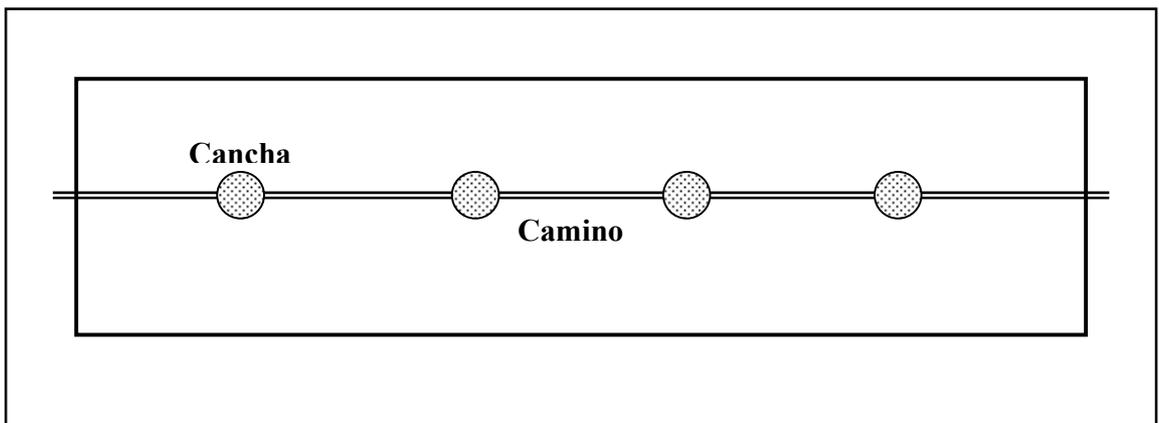


Figura 5: Rodal para aplicar el algoritmo Neuenschwander, Ramírez.

4.2. Modificación del algoritmo Neuenschwander, Ramírez.

En el sector forestal existen numerosos rodales con las características para poder aplicar el algoritmo Neuenschwander, Ramírez, pero no en todos ellos el camino se encuentra en forma paralela a los bordes. Es por esta razón, que se hace necesario poder evaluar los costos totales de la cosecha cuando el camino va cambiando su ángulo de inclinación.

El algoritmo Neuenschwander, Ramírez, será sometido a modificación con el fin de comparar diferencias en los costos totales en la cosecha forestal.

En primer lugar se tomará el algoritmo ya mencionado como un modelo base, el que será aplicado a un caso práctico, en donde se obtienen costos totales de cosecha, espaciamientos óptimos entre canchas de maderero y también una DPM para el rodal en estudio.

El segundo paso, consiste en hacer modificaciones al modelo base; estas modificaciones están relacionadas con la orientación del camino, es decir, se aumentará el ángulo de inclinación del camino hasta llegar a una disposición en que el eje llegue a la diagonal del rectángulo que forma el rodal como se observa en la Figura 6.

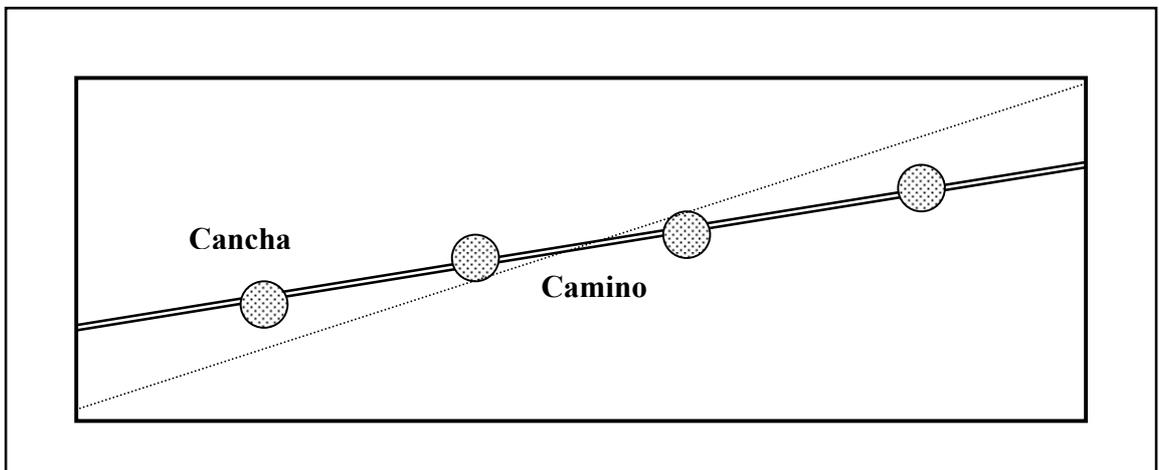


Figura 6: Rodal con las diferentes inclinaciones del camino.

4.3. Función de costos totales.

Para el cálculo de los costos, cuando el modelo base sufre las modificaciones ya mencionadas, se mantendrá el espaciamiento óptimo entre canchas y también las distintas áreas de tributación para cada cancha. Por lo tanto la función general que representa la estimación general de los costos de cosecha queda definida por la expresión.

$C_T = C_c + CE$	[12]
------------------	------

Donde:

C_T = Costo total de cosecha (\$/m³).

C_c = Costos constantes (\$/m³).

CE = Costos de extracción (\$/m³).

Es importante señalar que las ecuaciones utilizadas en esta metodología fueron tomadas del algoritmo desarrollada por Neuenschwander, Ramírez.

4.3.1. Modelo de costos constantes.

La cosecha forestal está constituida por los subsistemas volteo, desrame, trozado y extracción. El volteo, desrame y trozado están en función del área total a cosechar y del número y características de los árboles cosechados; además, son independientes de la distancia, por lo que se asumirán como costos constantes para las faenas determinadas, lo que queda representado por la expresión [13]:

$C_c = C_v + C_D + C_T$	[13]
-------------------------	------

Donde:

C_c = Costos constantes de la faena (\$/m³).

C_v = Costos de volteo (\$/m³).

C_D = Costos de desrame (\$/m³).

C_T = Costos de trozado (\$/m³).

4.3.2. Costos de extracción.

Los costos de extracción son función de los costos de madereo y de canchas, es decir:

$CE = C_m + C_L$	[14]
------------------	------

Donde:

CE = Costos de extracción (\$/m³).

C_m = Costos del madereo (\$/m³).

C_L = Costos de cancha (\$/m³).

4.3.2.1. Costos del madereo.

Los costos de madereo están directamente relacionados con la topografía del terreno, ya que en aquellos sectores donde exista demasiada pendiente será necesario utilizar un sistema de cables, para este estudio el tipo de madereo será

por arrastre utilizando skidder. Otro de los parámetros a tener en cuenta cuando se realiza el cálculo del costo de madereo es la distancia promedio de madereo, ya que al ser mayor, los costos aumentan en forma gradual. El costo de madereo es la multiplicación de los costos operacionales de la maquinaria a utilizar (skidder) por la distancia promedio de madereo y además se le deben sumar los costos fijos de la maquinaria empleada. La expresión queda de la siguiente manera.

$C_m = C_o * DPM + F$	[15]
-----------------------	------

Donde:

C_m = Costo total de madereo (\$/m³).

C_o = Costos operacionales de las máquinas (\$/m³/km).

DPM = Distancia promedio de madereo (km).

F = Costos fijos del madereo (\$/m³).

El costo operacional de las maquinarias asociadas al madereo, se estima mediante la expresión [16]:

$C_o = \frac{(C_F + C_V) * T_v}{C_U * D}$	[16]
---	------

Donde:

C_o = Costo operacional de las máquinas (\$/m³/km).

C_F = Costo horario fijo (\$/hr).

C_V = Costo horario variable (\$/hr).

T_v = Tiempo variable de operación (hrs).

C_u = Carga útil de la máquina (m³).

D = Distancia de madereo (km)

Para calcular la DPM, se consideró los siguientes supuestos:

- Rodal aproximadamente rectangular, de ancho A y profundidad P .
- Camino existente que atraviesa el rodal.
- Las distancias de madereo son euclidianas, pudiéndose ajustar con algún factor de corrección.
- Las canchas se localizan a lo largo del camino
- Cada cancha es abastecida por cuatro subsectores de forma rectangular.
- Las canchas están distanciadas a un espaciamiento L .
- La DPM se calculará mediante el método del centroide.

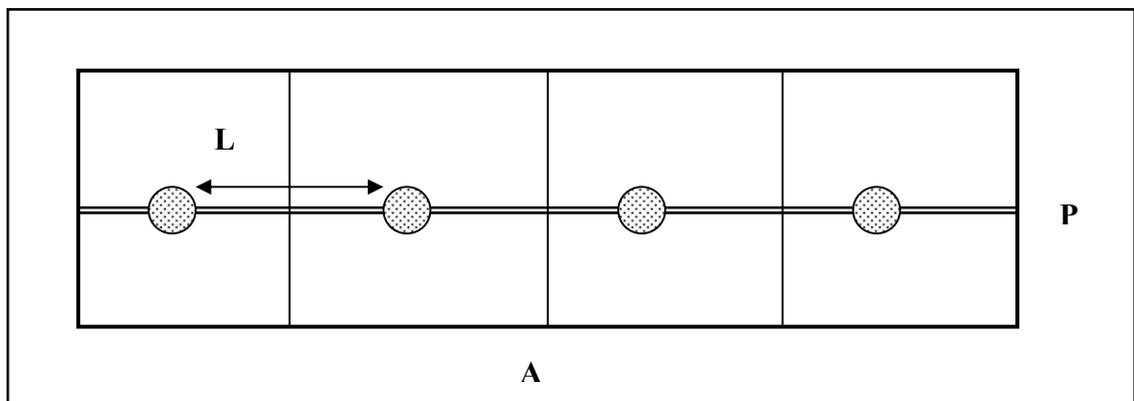


Figura 7: Rodal rectangular con la ubicación de las canchas.

Cuando el camino pasa por la mitad de la profundidad del rodal, la DPM será la misma para el sector superior e inferior al camino.

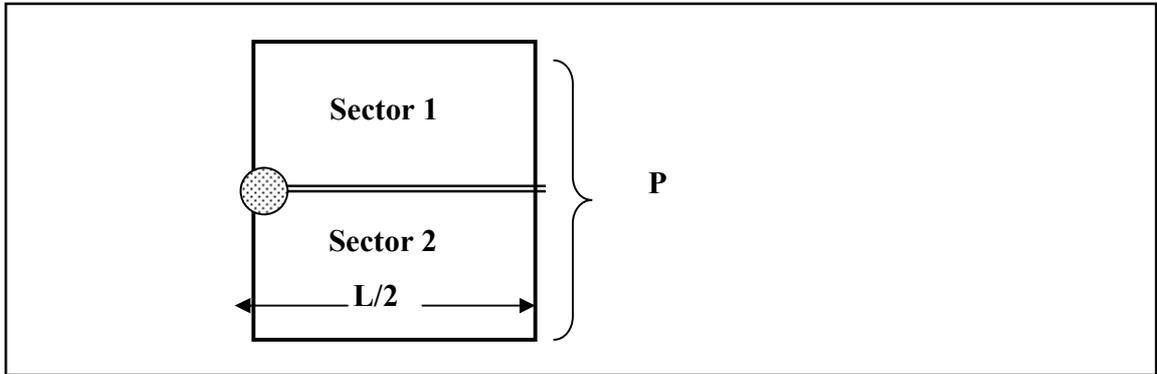


Figura 8: Sector de un rodal rectangular.

Cuando el camino se encuentra desplazado hacia alguno de los lados del rodal la DPM total del cuadrante se obtiene como un promedio ponderado de las DPM de ambos sectores, resultando la expresión [17].

$$DPM_T = \frac{[(DPM_1) \cdot (A_1) + (DPM_2) \cdot (A_2)]}{(A_1 + A_2)}$$

[17]

Donde:

DPM_T = Distancia promedio de maderero total.

DPM_1 = Distancia promedio de maderero total sector 1.

DPM_2 = Distancia promedio de maderero total sector 2

A_1 = Área sector 1.

A_2 = Área sector 2.

La ecuación general para la DPM, por el método del centroide, cuando el camino existente se encuentra en la mitad de la profundidad del rodal ($X=0.5$) para el sector de interés es:

$DPM = \frac{1}{6} \cdot \left(\left[\sqrt{L^2 + X^2 \cdot P^2} + \frac{1}{2} \sqrt{16 \cdot X^2 \cdot P^2 + L^2} \right] \cdot X + \left[\sqrt{L^2 + (P \cdot (1-X))^2} + \frac{1}{2} \sqrt{16 \cdot (P \cdot (1-X))^2 + L^2} \right] \cdot (1-X) \right)$	[18]
--	------

Además se desarrolló una tabla adimensional (Anexo 1), la cual permite calcular la DPM rápidamente.

4.3.2.2. Costos de canchas.

El costo de construcción de canchas deberá estar expresado en m³ a extraer del rodal, para esto se divide el costo de construcción por cancha (\$/cancha), por el volumen total a extraer en m³ y todo esto multiplicado por el número total de canchas construidas.

El costo de construcción de canchas se obtiene al multiplicar el costo por metro cuadrado y la dimensión de la cancha; para este caso los costos se asumirán constantes para todas las canchas.

$CC_L = \left[\frac{0.01 * C_L}{V * L * P} \right]$	[19]
--	------

Donde:

CC_L = Costo unitario de construcción de canchas (\$/m³).

V = Volumen a extraer (m³/ha).

P = Profundidad del rodal (km).

L = Espaciamiento entre canchas (km).

La constante 0.01 es un factor de conversión para transformar la superficie del rodal, de km² a hectáreas.

Finalmente, el modelo de costos totales de cosecha queda definido por la expresión [20]:

$C_T = C_o \cdot \left\{ \left(\frac{1}{6} \right) \cdot \left(\left[\sqrt{L^2 + X^2 \cdot P} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{16X^2 \cdot P + L^2} \right] \cdot X + \left[\sqrt{L^2 + (P \cdot (1-X))^2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{16(P \cdot (1-X))^2 + L^2} \right] \cdot (1-X) \right) \right\} + \frac{0.01 C_L}{V_T \cdot L \cdot P} + C_c + F$	[20]
---	------

Donde:

- C_T = Costo total de cosecha (\$/m³).
- C_c = Costos constantes (\$/m³).
- C_o = Costos operacionales del maderero (\$/m³/km).
- C_L = Costos de construcción de canchas (\$/cancha)
- F = Costos fijos de maderero (\$/m³).
- P = Profundidad de rodal (km).
- L = Espaciamiento entre canchas (km).
- V_T = Volumen a extraer (m³/ha).

4.1.3. Espaciamiento entre canchas.

4.1.3.1. Espaciamiento tentativo

La variable S_L corresponde a un espaciamiento tentativo (sub-óptimo), definido por Peters (1978), según la expresión [21]:

$S_L = \sqrt[3]{\frac{0.01 \cdot C_L}{C_o \cdot V}}$	[21]
--	------

Donde:

S_L = Espaciamiento tentativo entre canchas (km).

C_L = Costo de construcción de canchas (\$/canchas).

C_o = Costo operacional del maderero (\$/m³/km).

V_T = Volumen total a extraer (m³).

El espaciamiento tentativo entrega un espaciamiento aproximado de las canchas de maderero y no toma en cuenta las dimensiones del rodal, pero éste valor sirve para calcular el espaciamiento real.

4.1.3.1. Espaciamiento real entre canchas.

Para determinar el espaciamiento entre canchas el algoritmo Neuenschwander, Ramírez desarrollan una tabla adimensional (Anexo 2) donde se busca el valor de la división del espaciamiento tentativo por la profundidad del rodal.

4.4. Cambios en la ubicación del camino.

Los cambios en la ubicación del camino en el modelo base son básicamente dos; la primera ubicación estará dispuesta a 100 m de la mitad del rodal. La segunda ubicación del camino es en la diagonal del rectángulo que forma el rodal.

Para realizar los cálculos, cuando el camino sufre modificaciones se mantendrá el espaciamiento óptimo entre canchas calculado por el modelo base, así como también las mismas dimensiones del rodal y las mismas variables de entrada que se muestran en la Tabla 1.

4.4.1. Cálculo de la DPM cuando el modelo base es modificado.

Para calcular la DPM cuando el camino es paralelo a los lados del rectángulo que forman el rodal como se muestra en la Figura 5, y se aplica la fórmula desarrollada por Matthews, pero cuando el camino ya no es paralelo a los bordes del rodal es imposible aplicar Matthews ya que solo sirve para calcular DPM en triángulos rectángulos. Para poder solucionar este problema se recurrió a la ecuación [11] desarrollada por Peters (1978).

Para aplicar la ecuación de Peters, fue necesario dividir cada área de abastecimiento de las canchas en tres triángulos como lo muestra la Figura 9.

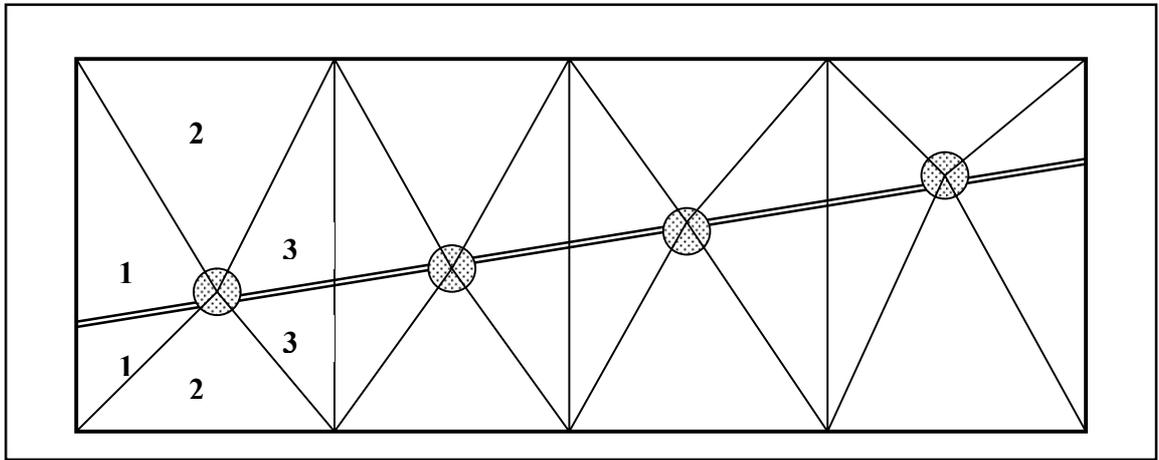


Figura 9: Rodal rectangular, con las distintas áreas de abastecimiento divididas en triángulos.

La ecuación de Peters entrega la DPM para cualquier triángulo. El problema que tiene esta ecuación es determinar las dimensiones de r_1 , r_2 y r_3 , para determinar estas longitudes se utilizó un software computacional AutoCad Map.

4.2.1.1. Aplicación de AutoCad Map para calcular DPM.

Como se señaló anteriormente para poder aplicar la ecuación de Peters es necesario conocer las longitudes r_1 , r_2 y r_3 de los diferentes triángulos que se forman en las áreas de abastecimiento para cada cancha. En AutoCad Map se dibuja el rodal con todas las dimensiones preestablecidas es decir, profundidad, ancho, distanciamiento entre canchas y también la inclinación del camino, todo esto a escala, lo que facilita calcular las dimensiones de los distintos lados de los triángulos como se puede ver en la Figura 10.

El programa AutoCad Map tiene entre sus herramientas un icono que entrega la longitud a escala. Con estas distancias se procede a calcular la DPM utilizando la ecuación [11] de Peters.

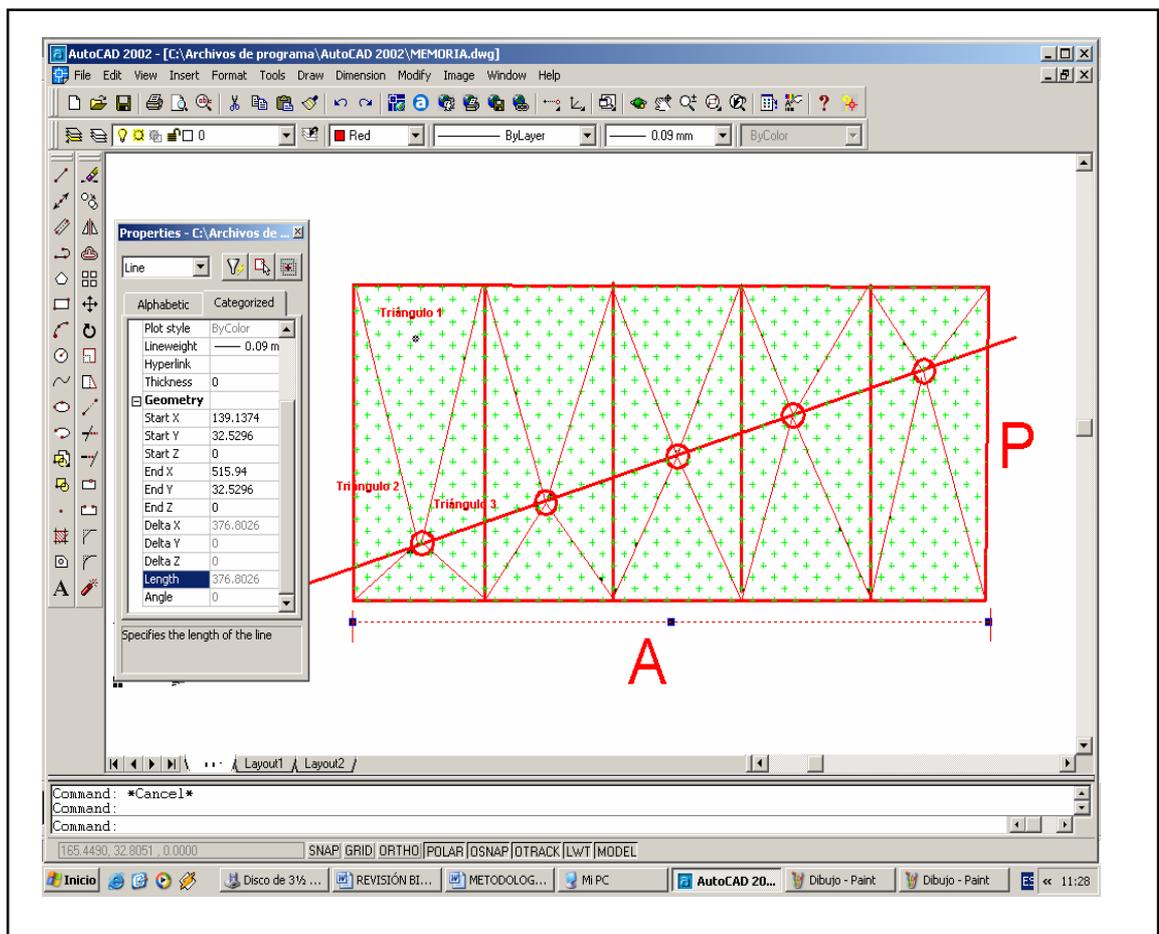


Figura 10: Rodal a escala con las dimensiones (A, P), camino inclinado, ubicación de las canchas y los triángulos que se forman en su interior.

Luego, estas DPM son ponderadas por las distintas superficies de cada triángulo, las superficies también son entregadas por AutoCad Map, para finalmente obtener una DPM total para cada una de las áreas de abastecimiento a cada cancha. Una vez que se han calculado las DPM para cada área de abastecimiento se calcula una DPM total para todo el rodal, la que posteriormente se multiplicará por los costos de madereo y se le sumarán los costos fijos , costos de construcción de canchas y los costos constantes dando como resultado el costo total de la cosecha del rodal.

El número de triángulos en que se divide cada área de abastecimiento dependerá del grado de precisión con que se trabaje, tres es el número mínimo de triángulos que se pueden realizar. Una breve explicación del funcionamiento de AutoCad Map se entrega en el Apéndice 1.

5. CÁLCULOS Y RESULTADOS.

5.1. Aplicación del algoritmo a un caso práctico.

Para la comparación de los resultados que entrega la aplicación del algoritmo de Neuenschwander, Ramírez y los resultados que se obtienen al cambiar las condiciones de ubicación del camino (no se tomará en cuenta el costo de construcción de camino ya que este existe) , se empleará un caso supuesto de un rodal con distribución uniforme de los volúmenes y madereo a canchas con extracción mecanizada (skidders), donde se dispone de toda la información requerida (Tabla 1) por las variables de entrada.

Primero se aplicará el algoritmo de Neuenschwander, Ramírez (modelo base) y luego se probarán dos situaciones de ángulo de desplazamiento del camino. Los resultados serán comparados para analizar las diferencias de costos que se puedan producir.

5.1.1. Variables de entrada.

Las variables de entrada se asumen conocidas por el planificador y se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1: Variables de entrada para el modelo base.

Ítem	Unidad	Identificador	Valor
Costos			
Costos operacionales del madereo	\$/m ³ /km	Co	6.300
Costos de construcción de canchas	\$/Cancha	Cl	504.000
Costos fijos de madereo	\$/m ³	F	400
Costos constantes	\$/m ³	Cc	1.500
Variables del rodal			
Ancho del rodal	km	A	0,8
Profundidad del rodal	km	P	0,4
Volumen a extraer	m ³ /ha	V	380

La Tabla 1 presenta valores de costos que se acercan bastante a los utilizados por grandes empresas forestales en rodales ubicados en terrenos planos y con características dasométricas similares a las utilizadas en este caso práctico.

5.1.2. Cálculos intermedios.

Una vez que se tienen las variables de entrada se procede a realizar los cálculos intermedios, los que están resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 2: Cálculos intermedios para el modelo base.

Ítem	Fórmula	Unidad	Resultado
Espaciamiento tentativo	$Sl = \sqrt[3]{\frac{0.01 * Cl}{V * Co}}$	km	0,128
Relación P/SL	P/SL	Adimensional	3,121
Relación L/P	Por Tabla anexo 2	Adimensional	0,4946
Espaciamiento entre canchas sub-óptimos	$L = \left[\frac{L}{P} \right] * P$	km	0,198
Número de canchas sub-óptimo	$N = A/L$	Canchas	4,09
N 1	$N \approx$ entero inferior	Cancha	4
N 2	$N 2 = n1 + 1$	Cancha	5

De la Tabla 2 se observa que el número de canchas sub-óptimo es 4,09. Esto indica que el costo mínimo está entre 4 y 5 canchas. Como no sabemos con exactitud cuál es la que entrega el mínimo costo es necesario evaluar ambas alternativas, es decir N1 y N2.

5.1.3. Evaluación de alternativas.

En la siguiente tabla son evaluadas las dos alternativas y se observa claramente que una de las dos alternativas, con $n_1=4$, tiene un costo menor y en definitiva será esta alternativa la que se usará para calcular los costos de cosecha.

Tabla 3: Evaluación de costos para N1 y N2 del modelo base.

Ítem	Cálculo	Unidad	N1= 4	N2=5
Espaciamiento entre canchas	$L = A / n$	km	0,20	0,16
Relación P/L	P/L	Adimensional	2,00	2,50
Factor DPM	Por Tabla anexo 1	Adimensional	0,29	0,277
DPM	$(DPM/P) * P$	km	0,116	0,1108
Costo de madereo	$Co * DPM$	\$/m ³	730.8	698.04
Costo fijo de madereo	F	\$/m ³	400	400
Costo de construcción de canchas	$CCL = (0.01*Cl) / (V*L*P)$	\$/m ³	165,78	207,2
Costos constantes	Volt-Des-Trozado	\$/m ³	1.500	1.500
Costo total unitario		\$/m ³	2.796,59	2.805,28

Las diferencias en los costo es de \$ 8.69 por metro cúbico, lo que no es demasiada y se podría pensar que es insignificante, pero cuando es multiplicado por los metros cúbicos por hectárea y por la superficie total del rodal (32 ha), ésta diferencia se hace más notoria llegando a ser de \$ 105.670.

5.1.4. Variables de salida.

Al comparar costos totales de N1 y N2, se puede establecer el espaciamiento entre canchas (L), el número de canchas y la DPM que otorgará los mínimos costos de extracción de madera.

Las variables de salida están ligadas con los valores obtenidos en la Tabla 3. En esta tabla se identifican resultados finales al aplicar el modelo base.

Tabla 4: Variables de salida para el modelo base.

Ítem	Unidad	Valor
Número de canchas a construir	Canchas	4
Espaciamiento entre canchas	km	0,2
Distancia promedio de madereo	km	0,116
Costo total unitario	\$/m ³	2.796,59
Costo total de cosecha	\$	34.006.534

El costo total que se muestra en la Tabla 1 será comparado posteriormente con los costos totales cuando el camino va variando su inclinación dentro del rodal.

5.2. Cálculos y resultados al modificar el modelo base.

5.2.1. Camino desplazado a 100 m de la mitad del rodal.

El número de canchas que se utilizará es cuatro por el mínimo costo visto en la Tabla 3, lo que varía y hace cambiar los costos cuando el camino se inclina es la DPM. En la Figura 11 se muestra como se inclina el camino y además como fueron distribuidos los triángulos dentro de las áreas de abastecimiento.

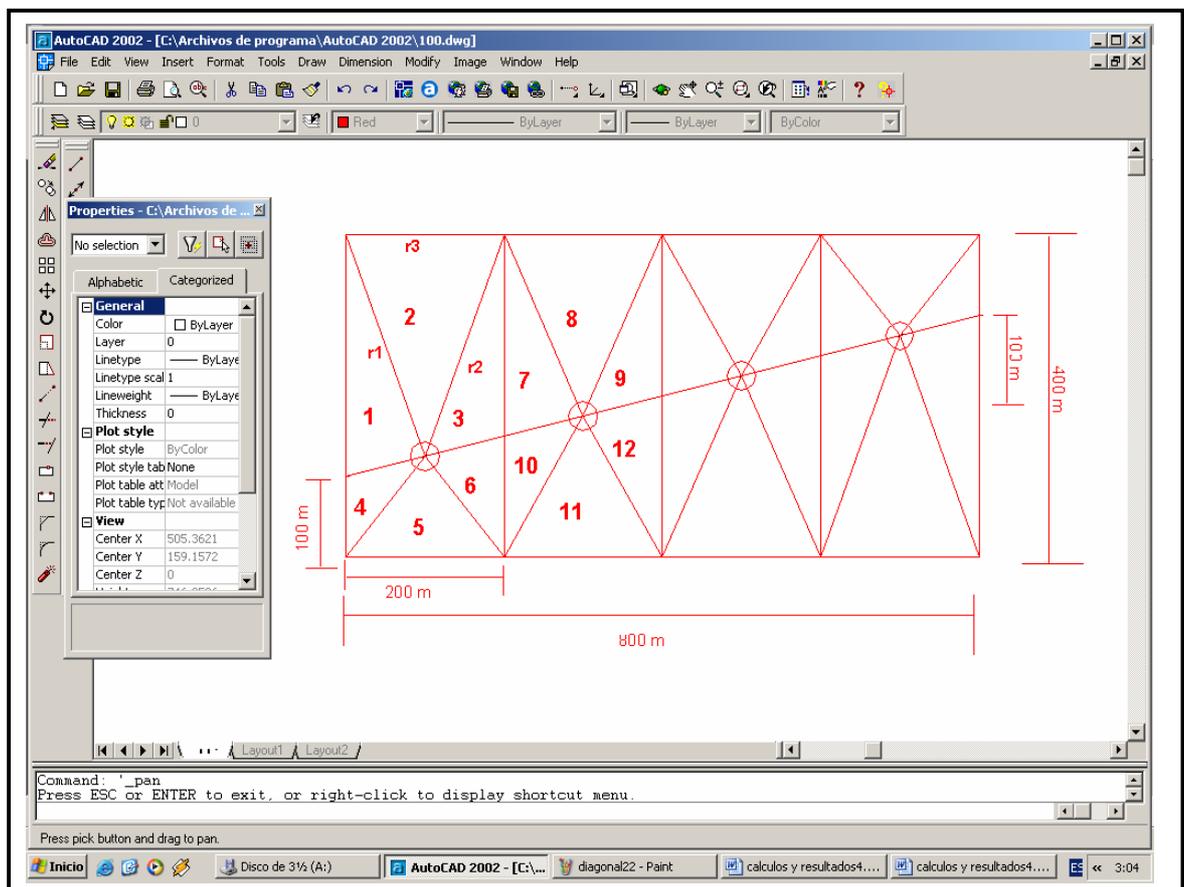


Figura 11: Rodal a escala con la inclinación del camino.

Los resultados del cálculo de las DPM para cada triángulo se pueden ver en Apéndice 2 y los costos totales por metro cúbico de la cosecha cuando el camino se encuentra desplazado a 100 m de la mitad del rodal se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5: Costos totales para e camino desplazado a 100 m de la mitad del rodal.

Ítem	Cálculo	Unidad	N1= 4
Espaciamiento entre canchas	$L = A / n$	km	0,2
Relación P/L	P/L	Adimensional	2
DPM	DPM	km	0,126
Costo de madereo	$Co * DPM$	\$/m ³	793,8
Costo fijo de madereo	F	\$/m ³	400
Costo de construcción de canchas	$CCL = (0.01*CI) / (V*L*P)$	\$/m ³	165,79
Costos constantes	Volt-Des-Trozado	\$/m ³	1.500
Costo total unitario		\$/m ³	2.859,59

En la Tabla 6 se muestra el costo total (\$) de la cosecha para el rodal con las características anteriormente definidas.

Tabla 6 : tabla resumen de los costos para cuando el camino se encuentra desplazado a 100 m de la mitad del rodal.

Ítem	Unidad	Valor
Número de canchas a construir	Canchas	4
Espaciamiento entre canchas	km	0,2
Distancia promedio de madereo	km	0,126
Costo total unitario	\$/m ³	2.859,59
Costo total de cosecha	\$	34.772.614

5.2.2. Camino ubicado en forma diagonal a los bordes del rodal.

Al igual que para el caso anterior aquí también se mantiene el número de canchas (4), en éste caso el camino se dispone en forma diagonal a los bordes del rodal, como lo muestra la Figura 12.

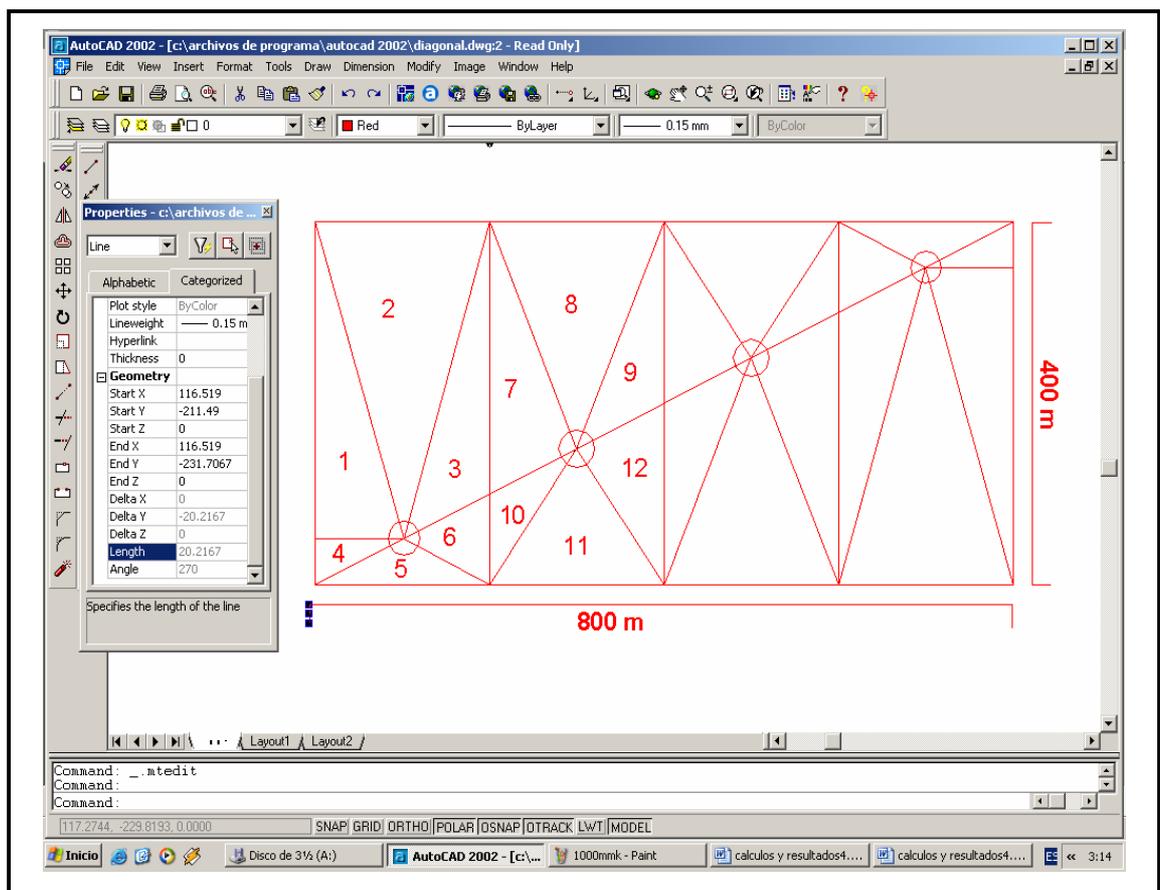


Figura 12: Rodal con camino ubicado en forma diagonal.

En este caso una de las canchas se aleja bastante del centro del área de abastecimiento, esto provoca un fuerte aumento de la DPM total del rodal como se puede apreciar en los cálculos del Apéndice 3.

La Tabla 7 muestra los costos totales por metro cúbico al desplazar el camino hasta la diagonal de los bordes del rectángulo que forma el rodal.

Tabla 7: Costos totales camino ubicado en forma diagonal a los bordes del rodal.

Ítem	Cálculo	Unidad	N1= 4
Espaciamiento entre canchas	$L = A / n$	km	0,2
Relación P/L	P/L	Adimensional	2
DPM	DPM	km	0,148
Costo de madereo	$Co * DPM$	\$/m ³	932,4
Costo fijo de madereo	F	\$/m ³	400
Costo de construcción de canchas	$CCL = (0.01*CI) / (V*L*P)$	\$/m ³	165,79
Costos constantes	Volt-Des-Trozado	\$/m ³	1.500
Costo total unitario		\$/m ³	2.998,19

La Tabla 8 es un resumen de las variables de salida y entrega el costo total de la cosecha (\$) para todo el rodal.

Tabla 8: Variables de salida, camino ubicado en forma diagonal.

Ítem	Unidad	Valor
Número de canchas a construir	Canchas	4
Espaciamiento entre canchas	km	0,2
Distancia promedio de madereo	km	0,148
Costo total unitario	\$/m ³	2.998,19
Costo total de cosecha	\$	36.457.990

5.3. Comparación de los resultados

Para tener una mejor apreciación de las diferencias en ; costos totales de cosecha, distancia promedio de madereo y los costos de madereo de los cálculos realizados anteriormente, se creó la siguiente tabla.

Tabla 9: Comparación de costos del modelo Neuenschwander, Ramírez.

Ítem	Unidad	Modelo base	Camino 100m de la mitad	Camino diagonal
Número de canchas a construir	canchas	4	4	4
Espaciamiento entre canchas	km	0,20	0,2	0,2
DPM	km	0,116	0,126	0,148
Costo de madereo	\$/m ³	730,8	793,8	932,4
Costo fijo de madereo	\$/m ³	400	400	400
Costo de construcción de canchas	\$/m ³	165,79	165,79	165,79
Costos constantes	\$/m ³	1.500	1.500	1.500
Costo total unitario	\$/m ³	2.796,59	2.859,59	2.998,19
Costo total de cosecha	\$	34.006.534	34.772.614	36.457.990

En Tabla 9 se pueden apreciar las diferencias de costos, siendo el costo más elevado cuando el camino se ubica en la diagonal del rodal; luego viene el costo cuando el camino está desplazado a 100 m de la mitad del rodal y el costo menor lo entrega el rodal cuando el camino está en la mitad del rodal y paralelo a los lados de éste.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Los resultados que se pueden ver en la Tabla 9 muestran claramente que a medida que el camino aumenta su inclinación los costos totales de cosecha se incrementan considerablemente.

En primer lugar se analizará la aplicación del modelo base al caso teórico; los cálculos aquí realizados arrojan que el número óptimo de canchas de madereo es cuatro, con una DPM de 116 m y un costo total de la cosecha de \$ 34.006.534.

Ahora bien, al desplazar el camino 100 m del centro del rodal y manteniendo el número óptimo de canchas de madereo (4) y las mismas áreas de tributación los costos aumentan en 6.6% con respecto al modelo base lo que llevado a costo total es \$766.080. Este aumento se debe al incremento de la DPM de 116 m cuando el camino atraviesa el rodal por el centro (modelo base), a 126 m cuando el camino se encuentra desplazado a 100 m del centro del rodal.

Al hacer la comparación de los costos, en los dos casos de inclinación del camino, se observa un aumento de 17.5% en los costos cuando el camino se ubica en la diagonal del rodal, este porcentaje se traduce en \$ 1.685.376, esta cifra no es menor si consideramos que la DPM sólo varió en 22 m.

Al comparar los costos del modelo base con los costos cuando el camino se dispone en forma diagonal dentro del rodal, las diferencias son más notables. Esto

también se debe a un excesivo aumento de la DPM. La diferencia en la DPM alcanza un valor de 32 m lo que influye directamente en los costos del madereo, aumentando el costo con respecto al modelo base en un 27,6%, una suma significativa, que alcanza a \$ 2.451.456.

Hay que tener en cuenta que; el costo de construcción del camino no es tomado en cuenta, se asume que el camino ya fué construido. Al no ser así, los costos de la cosecha cuando el camino esta inclinado serán más elevados ya que la longitud del camino será mayor.

Sin lugar a dudas que el factor determinante que hace que el costo de cosecha aumente es la distancia promedio de madereo, esta variable disminuye si se aumentan las canchas de madereo.

De lo dicho en el párrafo anterior, se hará un análisis para ver si es recomendable hacer otra cancha, teniendo en cuenta que el construir un cancha tiene un valor de \$504.000. Si los costos bajan más que este valor, entonces es económicamente viable; en caso contrario se mantiene el mismo número de canchas. Para realizar los cálculos se siguió la misma metodología descrita anteriormente.

En los Apéndices 4 y 5 se pueden ver los cálculos para obtener la DPM en un rodal con cinco canchas para las dos inclinaciones del camino y en la siguiente tabla se muestran los respectivos valores.

Tabla 10: Costo de la cosecha cuando se construyen 5 canchas

Ítem	Unidad	Camino a 100 de la mitad del rodal	Camino diagonal en el rodal
Número de canchas	canchas	5	5
DPM	km	0,08115	0,146
Costo maderero	\$/m ³	511,245	919,8
Costo fijo	\$/m ³	400	400
Costo de canchas	\$/m ³	165,79	165,79
Costos constantes	\$/m ³	1.500	1.500
Costo unitario	\$/m ³	2.577,035	2.985,59
Costo total	\$	31.336.745	36.304.774

C

on los valores de la Tabla 10 podemos decir; es económicamente posible construir otra cancha cuando el camino se encuentra desplazado a 100 m de la mitad del rodal ya que el costo bajó considerablemente; este menor costo se produjo por la gran disminución que tuvo la DPM de 128 m a 81 m. El costo de la cosecha bajó en \$ 3.435.868,8. No ocurrió lo mismo para el otro caso en donde el camino está en la diagonal del rodal, aquí el costo no disminuyó lo suficiente como para construir otra cancha, el valor fue sólo de \$153.216 y construir otra cancha, como ya se dijo, es de \$ 504.000.

Si se quiere disminuir los costos de cosecha es recomendable homogeneizar las DPM, esto se logra para áreas rectangulares estableciendo igual espaciamiento entre canchas y que éstas a la vez se encuentren en un camino que pase lo más al centro y paralelo posible a los lados del rodal.

7. CONCLUSIONES.

Al modificar el modelo base (algoritmo Neuenschwander, Ramírez), desplazando el camino, los cambios en los costos son notorios; los costos aumentan si la inclinación del camino es mayor.

El costo de madereo es el que aumenta en mayor cantidad al inclinarse el camino dentro del rodal rectangular, esto está relacionado directamente por el aumento de la DPM. Si ésta aumenta, aunque sea en pocos metros, como se muestra en los cálculos anteriores, el costo total de la cosecha se eleva considerablemente.

Al construir una quinta cancha el costo de la cosecha disminuye, sólo en el caso donde el camino se encuentra desplazado a 100 m de la mitad del rodal. Esta disminución de los costos de cosecha es específica para el caso práctico que se plantea en este estudio. La construcción de más canchas es la solución para disminuir la DPM y con esto el costo total, pero la disminución del costo total de cosecha debe ser mayor que el costo de construcción de canchas, para que sea económicamente factible construir otra cancha.

Este trabajo no considera el costo de construcción de caminos, ya que se asume que está construido, se deja planteada la inquietud para un posterior estudio en donde si se tome como un factor determinante, en el costo de la cosecha la construcción del camino. Cuando el camino es inclinado aumenta su longitud dentro del rodal, aumentando el costo total de la cosecha.

8. BIBLIOGRAFÍA.

Aedo, D.; Neuenschwander, R.; Chacón, I. 1998. Sistema de cosecha forestal en Chile: Situación actual y perspectivas. En: X Seminario on harvesting and wood transportation. p 151-161.

Conway, S. 1982. Logging practices: Principles of timber harvesting systems. ed. rev. Miller Freeman. San Francisco. USA. 432p.

Matthews, D.M. 1942. Cost control in the logging industry. Illus. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc, 374p.

Neuenschwander, R.; Ramírez, J. 2002. Espaciamiento óptimo de canchas de maderero sobre camino en rodales rectangulares. Actas I Congreso Forestal Chileno, Santiago.

Peters, P.A. 1978. Spacing of roads and landings to minimize timber harvest cost. Forest science 24(2). 209-217.

Ramírez, J. 2001. Optimización del número de canchas de maderero en plantaciones homogéneas. Tesis Ing. Forestal Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 57p.

Suddarth, S.K.; Herrick, A.M. 1964. Average skidding distance for theoretical analysis of logging cost. USDA. Forest Service. Research Bulletin N°789. 6p.

Troncoso, J. 1996. PLADEC: Un modelo para la planificación de sistemas de cosecha en *Pinus radiata D. Don*. Tesis Ing. Forestal Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Recursos Naturales. 90 p.

Valdebenito, G. 1994. Modelo matemático para el cálculo de la distancia promedio de madereo. Tesis Ing. Forestal Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 64p.

ANEXO N° 1

Tabla adimensional, factores de conversión para distancias de madereo.

P/L	X=0	X=0,1	X=0,2	X=0,3	X=0,4	X=0,5	X=0,6	X=0,7	X=0,8	X=0,9	X=1
	<i>Factor DPM</i>										
0.1	2.573	2.553	2.538	2.527	2.521	2.519	2.521	2.527	2.538	2.553	2.573
0.2	1.383	1.349	1.322	1.302	1.290	1.286	1.290	1.302	1.322	1.349	1.383
0.3	1.014	0.969	0.934	0.907	0.891	0.886	0.891	0.907	0.934	0.969	1.014
0.4	0.842	0.790	0.748	0.717	0.698	0.692	0.698	0.717	0.748	0.790	0.842
0.5	0.745	0.688	0.642	0.607	0.586	0.579	0.586	0.607	0.642	0.688	0.745
0.6	0.685	0.624	0.574	0.537	0.515	0.507	0.515	0.537	0.574	0.624	0.685
0.7	0.645	0.580	0.527	0.489	0.465	0.457	0.465	0.489	0.527	0.580	0.645
0.8	0.616	0.549	0.494	0.454	0.429	0.421	0.429	0.454	0.494	0.549	0.616
0.9	0.595	0.525	0.469	0.427	0.402	0.394	0.402	0.427	0.469	0.525	0.595
1	0.579	0.508	0.450	0.407	0.381	0.373	0.381	0.407	0.450	0.508	0.579
1.1	0.567	0.494	0.434	0.391	0.365	0.356	0.365	0.391	0.434	0.494	0.567
1.2	0.557	0.483	0.422	0.378	0.351	0.343	0.351	0.378	0.422	0.483	0.557
1.3	0.550	0.474	0.412	0.368	0.341	0.331	0.341	0.368	0.412	0.474	0.550
1.4	0.543	0.466	0.404	0.359	0.331	0.322	0.331	0.359	0.404	0.466	0.543
1.5	0.538	0.460	0.397	0.352	0.324	0.315	0.324	0.352	0.397	0.460	0.538
1.6	0.534	0.455	0.392	0.345	0.317	0.308	0.317	0.345	0.392	0.455	0.534
1.7	0.530	0.451	0.387	0.340	0.312	0.302	0.312	0.340	0.387	0.451	0.530
1.8	0.527	0.447	0.382	0.335	0.307	0.298	0.307	0.335	0.382	0.447	0.527
1.9	0.525	0.444	0.379	0.331	0.303	0.293	0.303	0.331	0.379	0.444	0.525
2	0.522	0.441	0.375	0.328	0.299	0.290	0.299	0.328	0.375	0.441	0.522
2.1	0.520	0.438	0.373	0.325	0.296	0.286	0.296	0.325	0.373	0.438	0.520
2.2	0.519	0.436	0.370	0.322	0.293	0.284	0.293	0.322	0.370	0.436	0.519
2.3	0.517	0.434	0.368	0.320	0.291	0.281	0.291	0.320	0.368	0.434	0.517
2.4	0.516	0.433	0.366	0.318	0.288	0.279	0.288	0.318	0.366	0.433	0.516
2.5	0.515	0.431	0.364	0.316	0.286	0.277	0.286	0.316	0.364	0.431	0.515
2.6	0.513	0.430	0.362	0.314	0.285	0.275	0.285	0.314	0.362	0.430	0.513
2.7	0.512	0.428	0.631	0.312	0.283	0.273	0.283	0.312	0.361	0.428	0.512
2.8	0.512	0.427	0.360	0.311	0.282	0.272	0.282	0.311	0.360	0.427	0.512
2.9	0.511	0.426	0.359	0.310	0.280	0.270	0.280	0.310	0.359	0.426	0.511
3	0.510	0.425	0.357	0.308	0.279	0.269	0.279	0.308	0.357	0.425	0.510
3.1	0.510	0.424	0.356	0.307	0.278	0.268	0.278	0.307	0.356	0.424	0.510
3.2	0.509	0.424	0.356	0.306	0.277	0.267	0.277	0.306	0.356	0.424	0.509
3.3	0.508	0.423	0.355	0.306	0.276	0.266	0.28	0.306	0.355	0.423	0.508
3.4	0.508	0.422	0.354	0.305	0.275	0.265	0.275	0.305	0.354	0.422	0.508
3.5	0.508	0.422	0.353	0.304	0.274	0.264	0.274	0.304	0.353	0.422	0.508
3.6	0.507	0.421	0.353	0.303	0.274	0.264	0.274	0.303	0.353	0.421	0.507
3.7	0.507	0.421	0.352	0.303	0.273	0.263	0.273	0.303	0.352	0.421	0.507
3.8	0.506	0.420	0.351	0.302	0.272	0.262	0.272	0.302	0.351	0.420	0.506
3.9	0.506	0.420	0.351	0.301	0.272	0.262	0.272	0.301	0.351	0.420	0.506
4	0.506	0.419	0.350	0.301	0.271	0.261	0.271	0.301	0.350	0.419	0.506
6	0.503	0.414	0.345	0.295	0.265	0.255	0.265	0.295	0.345	0.414	0.503
8	0.501	0.413	0.343	0.293	0.263	0.253	0.263	0.293	0.343	0.413	0.501
10	0.501	0.412	0.342	0.292	0.262	0.252	0.262	0.292	0.342	0.412	0.501
100	0.500	0.410	0.340	0.290	0.260	0.250	0.260	0.290	0.340	0.410	0.500
1000	0.500	0.410	0.340	0.290	0.260	0.250	0.260	0.290	0.340	0.410	0.500

Fuente: Neuenschwander, Ramírez (2002).

ANEXO Nº 2

Tabla adimensional de soluciones para el espaciamiento óptimo entre canchas

<i>P/SL</i>	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	<i>Relación L/P</i>									
1	2.1186	1.8579	1.6501	1.4811	1.3413	1.224	1.1244	1.0389	0.9649	0.9002
2	0.8434	0.793	0.7482	0.708	0.6719	0.6392	0.6095	0.5825	0.5577	0.5349
3	0.514	0.4946	0.4767	0.46	0.4445	0.4299	0.4164	0.4036	0.3917	0.3804
4	0.3698	0.3598	0.3503	0.3413	0.3328	0.3247	0.317	0.3096	0.3026	0.2959
5	0.2895	0.2834	0.2775	0.2719	0.2665	0.2613	0.2564	0.2516	0.247	0.2425
6	0.2383	0.2341	0.2302	0.2263	0.2226	0.219	0.2155	0.2121	0.2089	0.2057
7	0.2026	0.1997	0.1968	0.194	0.1912	0.1886	0.186	0.1835	0.1811	0.1787
8	0.1764	0.1741	0.172	0.1698	0.1677	0.1657	0.1637	0.1618	0.1599	0.158
9	0.1562	0.1545	0.1528	0.1511	0.1494	0.1478	0.1462	0.1447	0.1432	0.1417
10	0.1402	0.1388	0.1374	0.1361	0.1347	0.1334	0.1321	0.1309	0.1297	0.1284
11	0.1273	0.1261	0.1249	0.1238	0.1227	0.1216	0.1206	0.1195	0.1185	0.1175
12	0.1165	0.1155	0.1145	0.1136	0.1127	0.1117	0.1108	0.11	0.1091	0.1087
13	0.1074	0.1066	0.1057	0.1049	0.1041	0.1034	0.1026	0.1018	0.1011	0.1004
14	0.0996	0.0989	0.0982	0.0975	0.0968	0.0962	0.0955	0.0948	0.0942	0.0935
15	0.0929	0.0923	0.0917	0.0911	0.0905	0.0899	0.0893	0.0887	0.0882	0.0876
16	0.0871	0.0865	0.086	0.0854	0.0849	0.0844	0.0839	0.0834	0.0829	0.0824
17	0.0819	0.0814	0.0809	0.0805	0.08	0.0795	0.0791	0.0786	0.0782	0.0777
18	0.0773	0.0769	0.0765	0.076	0.0756	0.0752	0.0748	0.0744	0.074	0.0736
19	0.0732	0.0728	0.0724	0.0721	0.0717	0.0713	0.071	0.0706	0.0702	0.0699
20	0.0695	0.0692	0.0688	0.0685	0.0682	0.0678	0.0675	0.0672	0.0668	0.0665
21	0.0662	0.0659	0.0656	0.0653	0.065	0.0647	0.0644	0.0641	0.0638	0.0635
22	0.0632	0.0629	0.0626	0.0623	0.062	0.0618	0.0615	0.0612	0.061	0.0607
23	0.0604	0.0602	0.0599	0.0596	0.0594	0.0591	0.0589	0.0586	0.0584	0.0581
24	0.0579	0.0577	0.0574	0.0572	0.0569	0.0567	0.0565	0.0562	0.056	0.0558
25	0.0556	0.0553	0.0551	0.0549	0.0547	0.0545	0.0543	0.0541	0.0538	0.0536
26	0.0534	0.0532	0.053	0.0528	0.0526	0.0524	0.0522	0.052	0.0518	0.0516
27	0.0514	0.0513	0.0511	0.0509	0.0507	0.0505	0.0503	0.0501	0.05	0.0498
28	0.0496	0.0494	0.0492	0.0491	0.0489	0.0487	0.0486	0.0484	0.0482	0.048
29	0.0479	0.0477	0.0476	0.0474	0.0472	0.0471	0.0469	0.0468	0.0466	0.0464
30	0.0463	0.046	0.046	0.0458	0.0457	0.0455	0.0454	0.0452	0.0451	0.0449

Fuente: Neuenschwander, Ramírez (2002).

APÉNDICE N° 1.

Con el fin de dar a conocer como opera AutoCad Map, será aplicado a un ejemplo sencillo y fácil de realizar por cualquier usuario. La figura a realizar será un triángulo.

1.- para empezar a dibujar en AutoCad Map se debe hacer un clic en Draw – Polyline, luego hacer un clic en la pantalla.

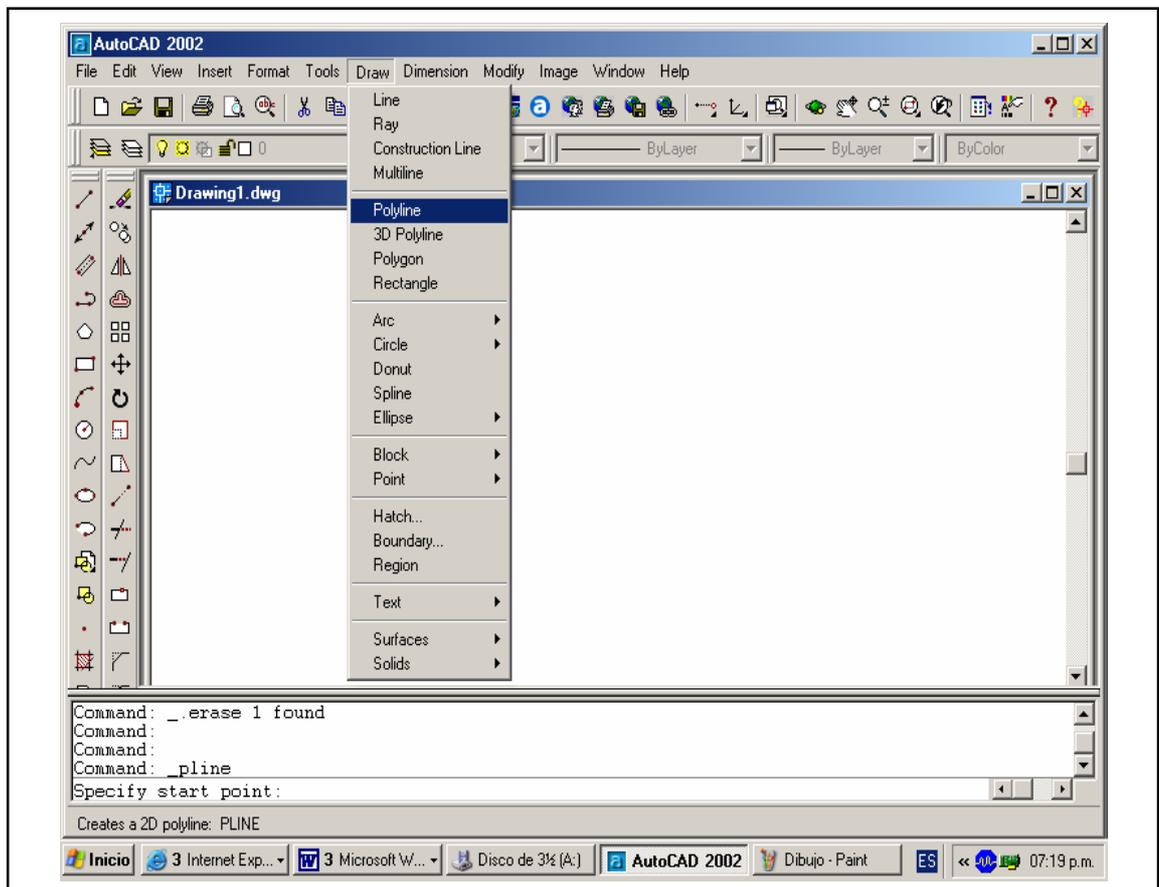


Figura 13: Salida AutoCad Map para empezar a dibujar.

2.- una vez hecho el clic en la pantalla le damos las dimensiones al triángulo a través de comandos, de la siguiente manera; @distancia<grados ENTER, la @ es para la longitud y el signo < es para darle la inclinación a la recta, la escala en este caso es 1:1.

3.- para realizar un triángulo se deben seguir los siguientes pasos; @100<10 ENTER, @200<90 ENTER, C ENTER, la letra C cierra la figura.

4.- una vez hecha la figura se debe seleccionar una de las rectas que forman el triángulo, apretar el botón derecho del mouse seleccionar Properties – Length o en el caso de saber cual es la superficie se selecciona Área.

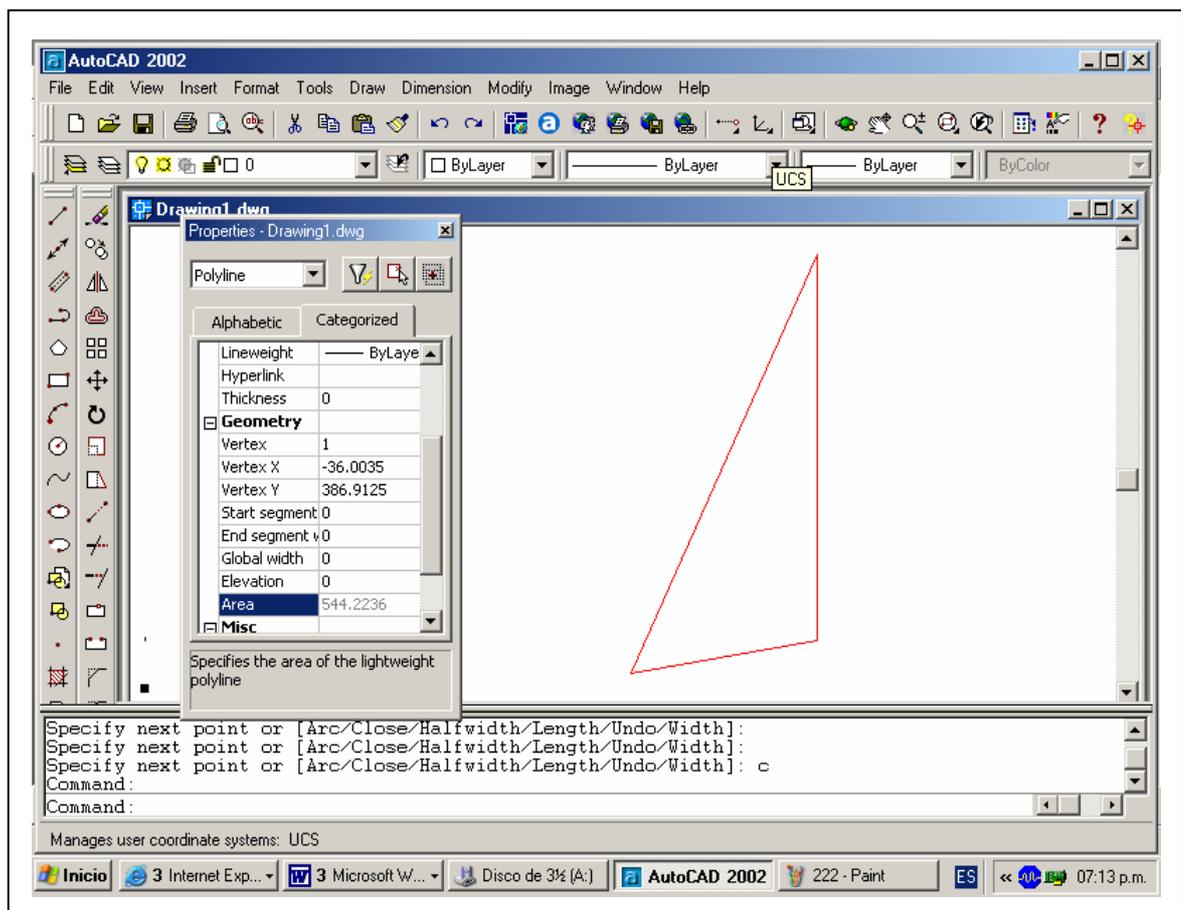


Figura 14: Triángulo dibujado en AutoCad Map.

APENDICE Nº 2

Cálculo de la DPM cuando el camino se encuentra a 100 m de la mitad del rodal.

TABLA RESUMEN						
Sector	Triángulo	r1 (m)	r2 (m)	r3 (m)	DPM (m)	Área (m²)
1	1	103,1	292,62	300	114,32	15.000
	2	292,62	292,62	200	187,29	27.500
	3	103,1	292,62	250	123,72	12.500
2	4	103,1	160,1	100	84,8	5.000
	5	160,1	160,1	200	91,54	12.500
	6	103,1	160,1	150	79	7.500
3	7	103,1	246,2	250	101,27	12.500
	8	246,2	246,2	200	154,79	22.500
	9	103,1	246,2	200	109,75	10.000
4	10	103,1	201,6	150	96,64	7.500
	11	201,6	201,6	200	122,7	17.500
	12	103,1	201,6	200	89,33	10.000

Una vez calculada la DPM de cada triángulo por la ecuación de Peters, se pondera por su respectiva área y se divide por el área total del rodal.

$$\text{DPM Total} = \frac{\text{DPM } \Delta 1 * \text{Área } \Delta 1 + \dots \text{DPM } \Delta n * \text{Área } \Delta n}{\text{Área Total Rodal}}$$

$$\text{DPM Total} = 126.15 \text{ m} \approx 0.12615 \text{ km}$$

ÁPENDICE Nº 3.

Cálculo de la DPM cuando el camino se encuentra ubicado en la diagonal a los lados del rectángulo que forman el rodal.

TABLA RESUMEN						
Sector	Triángulo	r1 (m)	r2 (m)	r3 (m)	DPM (m)	Área (m²)
1	1	102,1	363,3	349	140,54	17.807,16
	2	363,6	363,6	200	236,19	34.897
	3	109,5	363,6	300	151,14	14.691
2	4	102,1	114,1	51	70,79	2.603,80
	5	114,1	114,1	200	51,72	5.102,74
	6	109,5	114,1	100	69,36	4.897,26
3	7	111,8	269,3	250	104,68	15.000
	8	269,3	269,3	200	171,04	25.000
	9	269,3	118,8	200	124,1	10.000
4	10	111,8	180,3	100	95,3	5.000
	11	180,3	180,3	200	107	15.000
	12	111,8	180,3	200	82,33	10.000

Una vez calculada la DPM de cada triángulo por la ecuación de Peters, se pondera por su respectiva área y se divide por el área total del rodal.

$$\text{DPM Total} = \frac{\text{DPM } \Delta 1 * \text{Área } \Delta 1 + \dots + \text{DPM } \Delta n * \text{Área } \Delta n}{\text{Área Total Rodal}}$$

DPM Total = 148.41 m ≈ 0.14841 km.

APÉNDICE Nº 4

Cálculo de la DPM cuando el camino se encuentra desplazado a 100 de la mitad del rodal y con cinco canchas.

TABLA RESUMEN						
Sector	Triángulo	r1 (m)	r2 (m)	r3 (m)	DPM (m)	Área (m²)
1	1	82,5	291,1	300	108,12	14.400
	2	291,1	291,1	160	189,1	28.800
	3	291,1	82,4	260	116,48	12.800
2	4	82,5	144,2	100	72,4	1.600
	5	144,2	144,2	160	85,57	3.200
	6	144,2	82,5	140	67,11	3.200
3	7	253	82,5	260	96,93	12.800
	8	253	253	160	162,93	22.400
	9	82,5	253	220	104,75	9.600
4	10	178,9	82,5	140	82,46	3.200
	11	178,9	178,9	160	110,97	9.600
	12	178,9	82,5	180	76,11	6.400
5	13	215,4	215,4	220	130,38	9.600
	14	215,4	200	80	136,8	8.000
	15	82,5	215,4	180	93,32	6.400
	16	200	215,4	80	136,8	8.000
						160.000

Una vez calculada la DPM de cada triángulo por la ecuación de Peters, se pondera por su respectiva área y se divide por el área total del rodal.

$$\text{DPM Total} = \frac{\text{DPM } \Delta 1 * \text{Área } \Delta 1 + \dots + \text{DPM } \Delta n * \text{Área } \Delta n}{\text{Área Total Rodal}}$$

DPM Total = 81.145 m ≈ 0.815 km.

APÉNDICE Nº 5

Cálculo de la DPM cuando el camino se encuentra en forma diagonal y con cinco canchas

TABLA RESUMEN						
Sector	Triángulo	r1 (m)	r2 (m)	r3 (m)	DPM (m)	Área (m ²)
1	1	80	368,8	360	136,03	14400
	2	368,8	368,8	160	241,97	28800
	3	368,8	89,4	320	146,09	12800
2	4	89,4	80	40	55,46	1600
	5	89,4	89,4	160	39,39	3200
	6	89,4	89,4	80	55,45	3200
3	7	89,4	291,2	320	104,96	12800
	8	291,2	291,2	160	189,17	22400
	9	291,2	89,4	240	121,46	9600
4	10	89,4	144,2	80	76,21	3200
	11	144,2	144,2	160	85,57	9600
	12	144,2	89,4	160	65,83	6400
5	13	89,4	215,4	240	83,7	9600
	14	215	200	80	136,8	8000
	15	215,4	215,4	160	136,8	6400
	16	215,4	200	80	136,8	8000

Una vez calculada la DPM de cada triángulo por la ecuación de Peters, se pondera por su respectiva área y se divide por el área total del rodal.

$$\text{DPM Total} = \frac{\text{DPM } \Delta 1 * \text{Área } \Delta 1 + \dots + \text{DPM } \Delta n * \text{Área } \Delta n}{\text{Área Total Rodal}}$$

DPM Total = 145.99 m ≈ 0.146 km.