

**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES**



**MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN  
GEOMORFOLÓGICA DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES DEL  
PREDIO RUCAMANQUE IX REGIÓN-CHILE**

Trabajo de título presentado a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera. Como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Forestal.

MARISEL DEL CARMEN ESCOBAR SANDOVAL

TEMUCO – CHILE

2005

**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES**



**MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN  
GEOMORFOLÓGICA DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES DEL  
PREDIO RUCAMANQUE IX REGIÓN-CHILE**

Trabajo de título presentado a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera. Como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Forestal.

MARISEL DEL CARMEN ESCOBAR SANDOVAL

PROFESOR GUIA: MAURICIO ALONSO REYES SCHENCKE

TEMUCO – CHILE

2005

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN  
GEOMORFOLÓGICA DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES DEL  
PREDIO RUCAMANQUE IX REGIÓN-CHILE**

**PROFESOR GUIA :**

7,0

---

**Mauricio Reyes Schencke**  
Ingeniero Forestal  
Depto. de Ciencias Forestales  
Universidad de la Frontera

**PROFESORES CONSEJEROS :**

7,0

---

**Claudia Bassaber Escárate**  
Ingeniero Forestal  
Depto. de Ciencias Forestales  
Universidad de la Frontera

6,8

---

**Alejandro Espinosa Sepúlveda**  
Ingeniero Forestal M.Sc.  
Depto. de Ciencias Forestales  
Universidad de la Frontera

**CALIFICACIÓN PROMEDIO TESIS:**

6,93

---

*Dedicada a mi manada.....*

## AGRADECIMIENTOS

*A todos los que de una forma u otra estuvieron conmigo, estimulándome y apoyándome en la elaboración de este proyecto.*

*A mi profesor guía, Mauricio Reyes, quien generosamente me proporcionó todos los medios para realizar la toma de datos y el procesamiento de la información. Así como por su constante apoyo, enseñanzas y estímulos, pilares fundamentales para el buen término de esta tesis.*

*A mis compañeros: Roxana, Lidia, Roberto, Rodrigo, Francisco y Héctor, que desinteresadamente me ayudaron en la toma de datos sin importar la lluvia o el frío. A Don Luciano, cuyo conocimiento del predio y dedicación en servir de guía fue de vital importancia.*

*A los profesores: Claudia Bassaber, Alejandro Espinosa y Jorge Barahona, que dedicaron parte de su valioso tiempo brindándome su ayuda.*

*A Gerardo por su constante apoyo y dedicación.*

**A TODOS MUCHAS GRACIAS**

## ÍNDICE DE MATERIAS

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Modelo</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Modelos Hidrológicos</b>	<b>4</b>
<b>2.3 Funciones y aplicaciones de los modelos hidrológicos</b>	<b>5</b>
<b>2.4 Caracterización geomorfológica de la Cuenca</b>	<b>6</b>
<b>2.5 Los modelos hidrológicos y los Sistemas de Información Geográfico (SIG)</b>	<b>7</b>
<b>2.6 Los Modelos Digitales de Elevación (MDE)</b>	<b>8</b>
<b>3 MATERIALES Y METODO</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Materiales</b>	<b>13</b>
3.1.1 Área de estudio	13
3.1.2 Materiales cartográficos, equipos y programas computacionales.	15
<b>3.2 Método</b>	<b>16</b>
3.2.1 Recopilación y procesamiento de la información de terreno.	16
3.2.1.1 Análisis preliminar de la cartografía	16
3.2.1.2 Diseño de Muestreo.	16
3.2.1.3 Base Cartográfica.	17
3.2.1.4 Toma de datos en Terreno.	17
3.2.1.5 Compensación de declinación magnética	18
3.2.1.6 Compensación de errores de cierre.	19
3.2.1.7 Determinación de superficie de cursos de agua para la red hídrica	23
3.2.1.8 Análisis Espacial del levantamiento de red hídrica.	25
3.2.1.9 Construcción de perfiles de terreno.	26
3.2.2. Procesamiento del Modelo Digital de Terreno.	28

3.2.2.1 Comparación de Modelos Digitales de Terreno con curvas de nivel cada 10 y 25 m.	28
3.2.2.2 Comparación de Modelos Digitales de Elevación	28
3.2.2.3 Verificación de Supuestos de Normalidad	29
3.2.2.4 Comparación de datos pareados	30
3.2.3 Aplicación de la herramienta Hydrotools 1.0 para ArcView 3.x	30
3.2.3.1 Funciones para la corrección de MDE	33
3.2.3.2 Funciones para analizar el MDE y grandes captaciones.	36
3.2.4 Comparación y análisis de métodos: Levantamiento Topográfico, Fotointerpretación y MDE.	41
3.2.5 Caracterización geomorfología de la cuenca hidrográfica.	41
3.2.5.1 Área de la cuenca	41
3.2.5.2 Longitud, perímetro de la cuenca.	42
3.2.5.3 Pendiente media del cauce principal	42
3.2.5.4 Pendiente media de la cuenca	43
3.2.5.5 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius.	43
3.2.5.6 Curva hipsométrica.	44
3.2.5.7 Altura media y mediana	44
3.2.5.8 Densidad de drenaje.	45
3.2.6 Cálculo de caudal para canales abiertos	46
3.2.6.1 Cálculo de caudal	46
3.2.6.2 Funciones geométricas para elementos del canal.	46
3.2.6.3 Cálculo de velocidad	47
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Recopilación y procesamiento de la información de terreno.</b>	<b>51</b>
4.1.1 Análisis preliminar de la cartografía.	51
4.1.2 Diseño de Muestreo.	53
4.1.3 Toma de datos en Terreno.	55

4.1.4 Compensación de errores de cierre.	58
4.1.5 Confección de superficies de quebradas.	60
4.1.6 Análisis Espacial del levantamiento de red hídrica.	60
4.1.7 Perfiles longitudinales.	61
4.1.8 Evaluación y comportamiento del MDE.	61
<b>4.2 Procesamiento del Modelo Digital de Terreno.</b>	<b>68</b>
4.2.1 Comparación de Modelos Digitales de Terreno con curvas de nivel equidistantes cada 10 y 25 m.	68
4.2.1.1 Análisis de Resumen de Superficies por rangos.	69
4.2.1.2 Descripción de análisis estadístico de las estructuras vectoriales TIN.	74
4.2.2 Análisis de estructuras matriciales versus estructura vectorial.	75
4.2.2.1 Comparación de superficies de estructura matricial RASTER versus estructura vectorial TIN-10.	75
4.2.2.2 Análisis estadístico para las estructuras raster.	80
<b>4.3 Aplicación de la herramienta Hydrotools.</b>	<b>81</b>
4.3.1 Preparación del MDE.	82
4.3.1.1 Detección de áreas planas.	82
4.3.1.2 Detección de Áreas de Drenaje Interno.	84
4.3.1.3 Llenado de Área de Drenaje Interno.	86
4.3.1.4 Dirección de Flujo.	88
4.3.2 Funciones hidrológicas para analizar el MDE.	90
4.3.2.1 Longitud de flujo.	91
4.3.2.2 Acumulación de flujo.	92
4.3.2.3 Cambio de Flujo.	93
4.3.2.4 Máximo flujo.	94
4.3.2.5 Designación de quebradas.	95
4.3.2.6 Definición del tamaño mínimo de cuenca.	97
4.3.2.7 Áreas de contribución.	98



<b>4.4 Modelados de red Hídrica del Predio Rucamanque.</b>	<b>99</b>
<b>4.5 Comparación y análisis de los modelo Levantamiento Topográfico, Fotointerpretación y MDT.</b>	<b>102</b>
<b>4.6 Caracterización geomorfología de la cuenca hidrográfica.</b>	<b>103</b>
<b>4.7 Cálculo de caudal.</b>	<b>107</b>
<b>5 CONCLUSIONES.</b>	<b>112</b>
<b>6 RESUMEN</b>	<b>115</b>
<b>7 SUMMARY</b>	<b>117</b>
<b>8 LITERATURA CITADA</b>	<b>119</b>
<b>9 ANEXOS</b>	<b>123</b>
<b>10 GLOSARIO</b>	<b>127</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1	Funciones Hidrológicas de los Programas SIG utilizados en el presente trabajo	11
CUADRO 2	Coefficiente de Gravelius	44
CUADRO 3	Coefficientes de rugosidad de Manning para varias superficies de canales abiertos	48
CUADRO 4	División en cuartiles del caudal	49
CUADRO 5	Población de 21 quebrabas de la red hidrológica del predio Rucamanque	53
CUADRO 6	Quebradas seleccionadas a muestrear.	54
CUADRO 7	Parámetros Poblacionales según cartografía existente	54
CUADRO 8	Calculo de estimación para la muestra de la población del muestreo de PPS	54
CUADRO 9	Resumen de puntos relevante del modelado del levantamiento de la red hídrica.	56
CUADRO 10	Resumen de puntos relevantes del predio Rucamanque (Datum 69/Huso 18).	57
CUADRO 11	Resumen de errores de cierre por quebrada registrada	60
CUADRO 12	Parámetros estadísticos para diferencias de cotas entre MDE y levantamiento en terreno a nivel de quebrada	62
CUADRO 13	Valores promedios ponderados para los factores topográficos	68
CUADRO 14	Valor modal del factor topográfico de exposición	68
CUADRO 15	Resumen de superficie (ha) por rangos de Exposición	69
CUADRO 16	Resumen de superficie (ha) por rangos de Pendiente	71
CUADRO 17	Resumen de superficie (ha) por rangos de Altitud.	73
CUADRO 18	Resumen de análisis estadísticos de la prueba de normalidad, Kolmogorov – Smirnov, para TIN-10 y TIN-25, expresado en superficie	74
CUADRO 19	Resumen de análisis estadísticos de la prueba “t” para pares simples, TIN-10 y TIN-25, expresado en diferencias de superficie (ha).	75

CUADRO 20	Resumen de superficie (ha) por rangos de exposición, comparación TIN-10 versus tamaño de celdas de RASTER	76
CUADRO 21	Resumen de superficie (ha) por rangos de pendiente, comparación TIN-10 versus tamaño de celdas de RASTER	78
CUADRO 22	Resumen de superficie (ha) por rangos de altitud, comparación TIN 10 versus tamaño de celdas de raster	79
CUADRO 23	Resumen de análisis estadísticos de la prueba de normalidad, Kolmogorov – Smirnov, para raster 5x5 m y raster 10x10 m, expresado en superficie (ha).	80
CUADRO 24	Resumen de análisis estadísticos de la prueba “t” para pares simples, TIN-10 – RASTER 5x5 y TIN-10 – RASTER 10x10, expresado diferencias de superficie (ha).	81
CUADRO 25	Dirección de Flujo del MDE en exposición por superficie (ha).	88
CUADRO 26	Resumen de estadígrafos de cuencas del predio Rucamanque	97
CUADRO 27	Longitud de la red hídrica de la cuenca Chivilcán del predio Rucamanque	102
CUADRO 28	Comparación de fotointerpretación y MDT de la red hídrica de Rucamanque, versus levantamiento topográfico	103
CUADRO 29	Valores de los Parámetros Hidrológicos y Morfométricos de la Microcuenca	104
CUADRO 30	Hipsometría en la cuenca principal del predio Rucamanque	106
CUADRO 31	Comportamiento del caudal en función del periodo de retorno	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	Fotografía satelital del la zona en estudio (ESC 1:750000 aprox.).	13
FIGURA 2	Diagrama del cálculo de superficies del curso de agua	25
FIGURA 3	Activación de HydroTools 1.0 en la ventana de “Extensions” de ArcView 3.x	31
FIGURA 4	Botones de HydroTools 1.0 (destacados en color rojo) que habilitan la selección de diferentes ventanas de análisis	32
FIGURA 5	Ventana “Preparation” con funciones para corregir los MDE	32
FIGURA 6	Ventana “Hydrology” con funciones hidrológicas para analizar MDE y Captaciones.	33
FIGURA 7	Depresiones de acumulación en un MDE y sus correcciones.	34
FIGURA 8	Funciones necesarias para la corrección del MDE.	34
FIGURA 9	Codificación de dirección de flujo.	36
FIGURA 10	Funciones básicas para los cálculos de propiedades de flujo.	38
FIGURA 11	Algoritmos básicos para calcular movimiento de flujos Simple	38
FIGURA 12	Forma geométrica adoptada para representación del lecho.	39
FIGURA 13	Forma geométrica adoptada para representación del lecho	47
FIGURA 14	Red hídrica del predio Rucamanque con curvas de nivel cada 25 m.	52
FIGURA 15	Nueva fotointerpretación de la red hídrica del predio Rucamanque con curvas de nivel cada 10 m. Superposición de red hídrica existente.	52
FIGURA 16	Perfil longitudinal comparativo Terreno – MDE Quebrada Principal	63
FIGURA 17	Perfil longitudinal comparativo Terreno – MDE, Quebradas N° 1, 2, 3 y 1-1	64
FIGURA 18	Perfil longitudinal comparativo Terreno - MDE	65
FIGURA 19	Perfil longitudinal comparativo Terreno - MDE	66
FIGURA 20	Detalle de Perfil Longitudinal	67
FIGURA 21	Gráfico de superficie (ha) por rangos de Exposición	70
FIGURA 22	Gráfico de superficie (ha) por rangos de Pendiente	72

FIGURA 23	Gráfico de superficie (ha) por rangos de Altitud.	74
FIGURA 24	Gráfico de superficie (ha) por rangos de exposición, para factor físico de exposición comparando el TIN 10 con RASTER de 5x5 y 10x10.	77
FIGURA 25	Grafico de superficie (ha) por rangos de pendiente, para factor físico de pendiente comparando TIN-10 con estructuras RASTER de 5x5 y 10x10.	78
FIGURA 26	Detección de áreas planas en el MDE. En rojo se muestran algunos sectores corregidos.	83
FIGURA 27	Áreas de Drenaje Interno en los MDE	85
FIGURA 28	Llenado de las Áreas de Drenaje Interno del MDE, enmarcado en rojo las zonas corregidas	87
FIGURA 29	Dirección de flujo del MDE. Encerrados en rojo se muestran algunas de las zonas corregidas	89
FIGURA 30	Longitud de flujo del MDE.	91
FIGURA 31	Acumulación de flujo del MDE	92
FIGURA 32	Cambio de flujo de la precipitación sobre el MDE	94
FIGURA 33	Máximo flujo de la precipitación sobre el MDE	95
FIGURA 34	Designación de quebradas del MDE según Strahler	96
FIGURA 35	Ejemplo de estructuras de subcuencas con tres tamaños arbitrarios de subcuencas para la microcuenca Chivilcán	97
FIGURA 36	Designación de quebradas del MDE según Strahler	98
FIGURA 37	Áreas de contribución del MDE	99
FIGURA 38	Diferentes modelados de la Red Hídrica del predio Rucamanque	100
FIGURA 39	Modelo resultante para la Red Hídrica del predio Rucamanque	101
FIGURA 40	Curva hipsométrica de la quebrada principal del predio de Rucamanque.	106
FIGURA 41	Coefficientes de rugosidad en Predio Rucamanque.	107
FIGURA 42	Perfil longitudinal de la quebrada principal con diagramas de caudales parciales y planta de ubicación.	110
FIGURA 43	Perfil longitudinal de la quebrada principal, con diagramas de caudal parcial y acumulado.	111

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	Tabla de Rangos de Exposición	123
ANEXO 2	Tabla de Rangos de Altitud	123
ANEXO 3	Tabla de Rangos de Pendiente	123
ANEXO 4	Levantamiento de quebradas y numeración dada en terreno	124
ANEXO 5	Tabla que presenta el resumen de atributos por cuenca.	125
ANEXO 6	Perfil Longitudinal Quebrada Principal	126

## 1 INTRODUCCIÓN

Una cuenca integra procesos y patrones de los ecosistemas, en donde las plantas y los animales ocupan una diversidad de hábitat generado por variaciones de tipos de suelo, geomorfología y clima en un gradiente altitudinal. Una cuenca constituye una unidad espacial ecogeográfica relevante para analizar los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos agua, suelos y vegetación. Por lo tanto, constituye un marco apropiado para la planificación de medidas destinadas a corregir impactos ambientales producto del uso y manejo de los recursos naturales, de ahí que se considera que los modelos hidrológicos son herramientas de gran utilidad para estos fines, ya que con ellos es posible determinar la cantidad de agua, en un lapso de tiempo, que puede recibir un punto específico, la que asociado a la pendiente del terreno puede entregar una aproximación de las características de uso del suelo, de igual forma es posible predecir el comportamiento y daño provocado por acción del fuego en un incendio forestal.

El análisis hidrológico de una cuenca, proporciona un instrumento básico para actuaciones de desarrollo ó previsión en el territorio de influencia de su red de escorrentía. Una cuenca hidrográfica constituye una expresión muy genuina del medio ambiente que la rodea, en el se puede modelar completamente el ciclo hidrológico a la vez que reúne un conjunto de características físicas, químicas, biológicas, de usos del suelo y eventualmente socioeconómicas (Wengen 1984). Por lo anterior y considerando su grado de permanencia temporal y la interrelación entre tales características, hacen esta unidad territorial muy adecuada para servir de base a estudios de planificación ambiental.

Rucamanque es un relicto que se encuentra ubicado en el cordón montañoso Huimpil-Ñielol. Está rodeado de plantaciones y praderas naturales las cuales están propensas a incendios forestales, los que se han manifestado en estos últimos años con mayor frecuencia. En tal escenario es de vital importancia conocer cuales pueden ser las barreras naturales, para la posible contención de dichos eventos.

Cabe destacar, que en este predio se construyó en 1931 una captación de cursos de agua para abastecer de agua potable a la ciudad de Temuco, denominada la Bocatoma de Chivilcán, la cual hoy en día ya no es utilizada para tales fines, por cuanto no es capaz de abastecer la demanda de la creciente población de esta ciudad. Sin embargo, en la eventualidad de producirse escasez del recurso hídrico es muy importante conocer, los reales aportes que esta cuenca puede ofrecer.

Actualmente en el predio Rucamanque, perteneciente a la Universidad de la Frontera, la información cartográfica existente sólo corresponde a la fotointerpretación estereoscópica y representación de un plano de uso actual, por lo tanto, se desconoce con exactitud el emplazamiento y conformación de la red hídrica del predio Rucamanque que permita formular un modelo hidrológico físico confiable, el cual pueda ser empleado como línea base para futuros estudios de hidrología.

Como es bien sabido, las mediciones de terreno son la manera más exacta de determinar la red de canales y densidad de drenaje, pero a menudo son impracticables, especialmente para grandes cuencas, debido a esto, las redes de drenaje derivados de los MDE son un sustituto útil para lograr este objetivo.

Por lo anteriormente señalado, en esta tesis se planteó comenzar una línea de trabajo tendiente a desarrollar un modelo hidrológico, empleando Sistemas de Información Geográficos (SIG), para la cuenca del Predio Rucamanque (IX Región, Chile), para lo cual se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Mejorar cartografía de red de drenaje del predio Rucamanque.
- Comparar las metodologías de fotointerpretación, levantamiento topográfico y MDE en la construcción de la red hidrográfica.
- Realizar un análisis geomorfológico de la cuenca principal, contenida en el predio Rucamanque.



## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Modelo

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real complejo, llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica, y de forma física, es la representación a escala (Chow *et al*, 1994; Scheel, 1998).

Una acepción de la palabra modelo, originada en ámbitos geográficos, lo define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988). De igual forma, Riddell e Hidalgo (2001), plantean que cuando se habla de un “modelo” no se pretende implicar que se trata de una reproducción a escala de una realidad física, sino que se trata de un concepción abstracta simplificada del objeto físico; la simplificación radica en que se han eliminado todos aquellos aspectos de la realidad que son intrascendentes para el problema en estudio.

Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real; para ello, estos se confeccionan estableciendo una relación con la realidad que debe ser simétrica, es decir, debe haber una relación de correspondencia entre el objeto real y dicho modelo. El modelo debe ser lo menos parcialmente reversible y debe permitir la traducción de algunas propiedades de éste a la realidad. Las respuestas derivadas del modelo deben ser aplicables a la realidad sin perder sentido (Felicísimo, 1994).

## 2.2 Modelos Hidrológicos

Según Clarke (1984), los Modelos Hidrológicos son una simple representación matemática de un sistema complejo, en los cuales el comportamiento del sistema es representado en ecuaciones de expresiones lógicas de relación entre variables y parámetros hídricos.

Fleming (1979), menciona que los Modelos Hidrológicos son un sistema numérico interrelacionado, en un tiempo y lugar establecido, en referencia a muestras de entradas y salidas de información de un ciclo hidrológico.

Los modelos hidrológicos son la representación matemática de los procesos del ciclo hidrológico, llevados a un tiempo y espacio, conforme a un escenario proveniente de la naturaleza, los cuales comprenden un conjunto de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular numéricamente los procesos identificados en un estudio (Muñoz, 1998).

Chavarri (2004) y Chow *et al* (1994), consideran que el sistema físico real, que se representa en un modelo hidrológico, es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. Son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir del cual es posible estudiar la relación causa–efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca. Además, permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos de dicha cuenca.

El objetivo de un modelo hidrológico es determinar, con eficiencia y precisión, los componentes del ciclo hídrico de una cuenca y estimar eficientemente el comportamiento y la magnitud del agua ante diferentes acontecimientos. La consideración y el uso de los modelos hidrológicos es primordial para apreciar, simular y predecir los daños causados por las inundaciones, así como

también para resolver problemas prácticos de inventarios, para planear, diseñar, manejar y tomar decisiones sobre los recursos hídricos en una cuenca (Chávarri, 2004).

### **2.3 Funciones y aplicaciones de los modelos hidrológicos**

Las principales funciones de un modelo hidrológico son la representación de sistemas de drenaje, procesos de modelado del terreno, modelo de elevación digital, determinación del escurrimiento en una cuenca hidrológica, simulación de diques, cálculos de volúmenes del acuífero, simulación de tormenta y su análisis de las consecuencias resultantes, entre otros. (Triviño y Morad, 2001).

Un modelo hidrológico puede determinar la evaluación de las variaciones espaciales y temporales en eventos de lluvia que en potencia puedan inducir deslizamientos, así como también la determinación de variaciones locales en la susceptibilidad del terreno a la inestabilidad de laderas, y la evaluación del papel de la hidrología sobre la actividad de deslizamientos. Los modelos son dinámicos, lo que significa que simula las condiciones hidrográficas con respecto al tiempo y evalúa los componentes de éstos modelos (Felicísimo, 1994).

Los modelos hidrográficos como herramientas de análisis, pueden ser utilizadas entre otras muchas aplicaciones en (Morad y Triviño, 2001):

- Evaluación de los patrones de cambio de una variable en el transcurso del tiempo tal como uso del suelo.
- Re-clasificación de datos.
- Determinación de atributos topográficos, como pendientes y orientación del terreno, logrando trazar un perfil de escorrentía.
- Predicción de la respuesta de una cuenca ante un evento hidrológico.
- Evaluación e inventarios hidrológicos.
- Determinación de parámetros hidrológicos.

Entre las aplicaciones reales que se han dado a los modelos hidrológicos, en América latina, se pueden mencionar: En el río Motagua, Guatemala, se aplicó un modelo hidrológico, el cual simuló las variaciones de caudal a partir de los cambios en la cobertura forestal. Se simularon tres escenarios: tala rasa, tala rasa en bloques y reforestación. Con base en la variación de caudales, se procedió a determinar los costos de oportunidad, protección y establecimiento del bosque (Hernández *et al.*, 2003). En la cuenca Khenko Mayu, emplazada al norte del sector de Sacaba, departamento de Cochabamba, República de Bolivia, se usó el modelo hidrológico SWAT para predecir el aporte de caudal, sedimentos y rendimientos de químicos agrícola para el futuro funcionamiento de un embalse y a su vez llegar a concluir cual sería el caudal futuro de aporte al sistema de riego de la localidad de Sacaba (Ayala, 2001). En la cuenca Itzapa, Guatemala, se empleó el modelo hidrológico SWRRB para generar alternativas de manejo de sus bosques. La aplicación principal de este modelo es predecir el efecto del manejo del suelo y la vegetación, sobre la producción de agua y sedimentos con precisión razonable, en cuencas rurales no instrumentadas (Maldonado *et al.*, 2001).

## 2.4 Caracterización geomorfológica de la Cuenca

Cabe destacar, que las características físicas de una cuenca forman un conjunto que influye profundamente en el comportamiento hidrológico de dicha zona a nivel de sistema. Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad práctica, pues con base en ellos se puede lograr una transferencia de información de un sitio a otro, si existe cierta semejanza geomorfológica y climática de las zonas en cuestión<sup>1</sup>.

En hidrología, la geomorfología de una cuenca, o estudio cuantitativo de la forma del terreno superficial, se utiliza para hacer medidas de similaridad geométrica entre cuencas, especialmente entre sus redes de drenaje (Chow *et al.*, 1994).

---

<sup>1</sup> **Ruiz C.; Yanes A.; Marzol,V.** 2005. Caracterización y Clasificación de las Cuencas y Redes Hidrográficas en Islas Volcánicas Atlánticas (Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde).1 septiembre 2005. [http://www.us.es/ciberico/archivos\\_word/195b.doc](http://www.us.es/ciberico/archivos_word/195b.doc)

La relación de la geomorfología con la hidrología resulta evidente. De hecho el modelo terrestre es, en gran parte, consecuencia de fenómenos hidrológicos. En cuanto a la vegetación, la altitud y exposición para una altitud dada, son factores limitantes. La pendiente, de forma indirecta, afectará a la velocidad de drenaje y, por lo tanto, a la disponibilidad del agua (MOPT, 1992). Para el examen de los sistemas de drenaje se recurre al análisis morfométrico, que posibilita comparar cuantitativa y cualitativamente los principales rasgos que definen a los cauces y cuencas.

## **2.5 Los modelos hidrológicos y los Sistemas de Información Geográfico (SIG)**

Un modelo para simulación hidrológica se convierte en una base de datos que le permite al investigador simular condiciones futuras, que afectarían a uno o varios de los procesos físicos que intervienen en el ciclo hídrico, como corrección de cauces, simulaciones de incendios, uso del suelo y pérdida de la cobertura vegetal, destacando que estos factores son de gran importancia para el manejo de los recursos naturales (Wengen, 1984).

Morad y Triviño (2001), mencionan que un modelo hidrológico requiere de una vasta información para representar las características físicas e hidrológicas de una cuenca. Ante la necesidad de almacenar y manipular grandes cantidades de datos, un SIG acoplado a un modelo hidrológico ofrece una verdadera alternativa para que hoy se puedan realizar cálculos cada vez más cualitativos y cuantitativos.

Los SIG constituyen una valiosa herramienta de análisis por su capacidad para revelar, de manera inmediata, la distribución espacial de los resultados. La estructura de su base de datos se conecta a todos los niveles cartográficos disponibles. La utilización del Análisis Geográfico potencia la calidad y percepción de los resultados de cualquier informe estadístico. Posibilitan un estudio

exhaustivo por zonas geográficas, con un manejo sencillo y rápido, con opción a poder representar la misma información con distintos formatos<sup>2</sup>.

Los mismos autores, indican que el campo de aplicación de un SIG es sumamente variado, de hecho toda información que contenga una referencia geográfica esta sujeta a ser analizada a través de un SIG para el manejo de los recursos naturales, esto incluye todos los componentes relevantes de la biofísica terrestre, como vegetación, suelo, topografía, hidrografía, zonas climáticas, entre otras. En un SIG, cada componente del paisaje terrestre está caracterizado por una capa a la que se le asocia una tabla de datos, conteniendo la información más relevante de dicho componente. La suma de todas las capas y de sus tablas asociadas constituye una base de datos de un SIG, la que puede ser manipulada, representada y analizada de diferentes maneras para cumplir con un objetivo preciso (Felicísimo, 1994).

## **2.6 Los Modelos Digitales de Elevación (MDE)**

Morad y Triviño (2001) señalan que las redes hidrográficas pueden ser delineadas a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE), por lo tanto, se genera un modelo físico hidrológico, que utiliza información sobre los flujos acumulados, representando los intervalos de altitud. Con esta herramienta, es posible asignar un orden jerárquico a los distintos cursos que conforman la red de una cuenca determinada. De forma adicional, sirve de soporte en el estudio de las relaciones existentes entre las cuencas hídricas y la morfología de los cauces, para analizar, entre otras cosas, la contribución de cada cuenca hidrológica a la esorrentía.

Los modelos digitales del terreno se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real representado; es una modelización. Su empleo permite representar y estudiar, de manera sencilla y comprensible, una porción de la realidad empírica. Representan numéricamente la

---

<sup>2</sup> Novía, O.; Martínez, M.; Mosquera, C.; Marchin, J.; Rizzo, J. 2004. Sistema de información geográfico para el análisis ambiental documentación metodología y funcional. Consultado el 02 de agosto del 2004. Disponible en <http://www.mappinginteractivo.com>.

distribución espacial de una variable cuantitativa y continua medible sobre el terreno; si esta representación la constituye una red hídrica, está generando un modelo físico hidrológico (Miller *et al.*, 1996).

Los valores recogidos en el MDE se generan por interpolación de las curvas de nivel, de manera que el programa conoce, de forma automática, dónde se encuentran las divisorias de la cuenca. No obstante, para afinar la exactitud de la delineación se utilizan métodos como referencias a mapas topográficos, información acerca de los usos del suelo y la cobertura, unidades hidrológicas, delineación de líneas de flujo y digitalización (Morad y Triviño, 2001).

Tarboton y Ames (2001) revisaron los métodos para delimitar la redes de flujo utilizando grillas de MDE, examinando la interrogante del objetivo de estimación de la densidad de drenaje y describieron un método basado en la curvatura del terreno que permitió ajustar espacialmente la densidad de drenaje variable.

La red hídrica se encuentra delimitada por el área mínima de la subcuenca que compone dicha red, conocida como umbral de área mínima, la cual puede imponer una densidad de drenaje espacialmente constante y arbitrario. Lacroix *et al.* (2001), indican que el programa computacional TOPAZ, un modelo de análisis digital de terreno, tiene la capacidad de delinear la red de canales y segmentar el paisaje en subcuencas variando el nivel de detalles, mediante los parámetros de área crítica mínima (CSA=Critical Source Area) y longitud mínima de canales (MSCL=Minimun Source Channel Length) que son definidos por el usuario. La superficie mínima de subcuenca puede ser seleccionada utilizando una dócima t-student, para escoger la red de drenaje de mas alta resolución (la celda de la grilla de menor superficie), con una variable promedio de las quebradas de primer orden sin diferencia significativa respecto a las quebradas de orden superior. De esta manera es posible delimitar una red de drenaje consistente con la geomorfología y sin la necesidad de seleccionar el parámetro de área de subcuenca mínima de manera subjetiva.

Para evaluar el comportamiento de los modelos, deben emplearse medidas de exactitud y de sesgo de las estimaciones (Prodan *et al.*, 1997). Estos autores señalan los siguientes tres estadísticos para medir exactitud: el Error Medio Cuadrático (ECM), el Error Medio Absoluto (EMA) y la Desviación Estándar de los Residuos (DSR). A medida que éstos sean menores, se infiere que es mejor el modelo, mientras que para medir el sesgo recomiendan el uso de la Diferencia Agregada (DA). Todos estos estadígrafos de prueba son posibles de obtener tanto en las mismas unidades de la variable dependiente como en términos porcentuales.

La mayoría de las investigaciones (Cox (1985); Higuera (1994); Navarro (1995) e INFORA (1996)), han ocupado un estadígrafo para medir exactitud (ECM) y otro para el sesgo (DA). Husch *et al.* (1972) plantean que un modelo es aceptable cuando presenta un ECM inferior al 10% y una DA que no supere el  $\pm 5\%$ . Prodan *et al.* (1997) señala que los signos negativos en el comportamiento de la DA, están asociados con sobreestimaciones, en tanto que los valores positivos indican subestimación. Felicísimo (1994) manifiesta que el límite aceptable para ECM debe fijarse en función de la aplicación a la que va destinado el MDE, así como de la escala de partida del mapa.

Los MDE son una fuente de datos muy útil para la delimitación automática de quebradas, subcuencas y redes de drenaje para el modelado hidrológico. La representación digital de las redes de flujo es fundamental para los modelos hidrológicos debido a que codifican los elementos enlazados del modelo a través de los cuales el flujo es conducido a la salida. La densidad de drenaje controla la escala de las pendientes de las laderas y los elementos del modelado de los canales. Cabe destacar que se cuenta con una variedad de algoritmos para delimitar las redes de escorrentía tales como el método de flujo SIMPLE (D8) y MÚLTIPLE (MD), con los cuales se puede determinar la dirección de flujo, el cálculo de acumulación de flujo, de áreas de contribución (Tarboton y Ames, 2001). Tal como se ha dicho anteriormente, con estos algoritmos se puede extraer en forma automática la red de canales y los límites de las cuenca; para ello el método más ampliamente utilizado es el conocido como D8, propuesto originalmente por O'Callahan y Mark (1984). Sin embargo, este método ha sido ampliamente criticado por dos



motivos: (i) su incapacidad de definir los procesos de dispersión que se producen en la naturaleza como consecuencia de los cambios de pendiente en las áreas de cabeceras y (ii) por establecer en una única celda toda la acumulación de las aguas (Sánchez *et al* ,2003).

En la actualidad, existen muchos sistemas informáticos implementados para resolver el análisis de cuenca e hidrología tales como PCIs, ESRI, IDRISI, GRASS, MAPINFO, PC ARC/INFO, (FAO,1996). A continuación se presenta un cuadro comparativo de las funciones para análisis hidrológicos básicos presentes en los programas ArcView (en las extensiones Hydrologic Modeling e Hydrotools), y Arcmap, utilizados en el presente trabajo:

**Cuadro 1** Funciones Hidrológicas de los Programas SIG utilizados en el presente trabajo.

Funciones Hidrológicas	Hydrologic Modeling	HydroTools 1.0	Hidrology de ArcMap
Detección de áreas planas	-	√	√
Detección de áreas de drenaje interno	√	√	√
Llenado de áreas de drenaje interno	√	√	√
Dirección de flujo	√	√	√
Longitud de flujo	√	√	√
Acumulación de flujo	√	√	√
Cambio de flujo	-	√	-
Máximo flujo	-	√	-
Designación de quebradas	-	√	√
Áreas de contribución	-	√	√
Cuencas	√	-	√
Atributos de las cuencas	√	-	√
Puntos de Lluvia instantáneos	√	√	√

Schauble (2003), señala que HydroTools (Cuadro 1) es un programa para analizar la hidrología de las cuencas. Posee muchas funciones que hasta el año 2003, no estaban disponible en los SIG

como por ejemplo los cálculos de flujo con los algoritmos diferentes, la opción entre un algoritmo de flujo simple, D8, uno de flujo múltiple, MD o un algoritmo de flujo combinado, MDD8, para calcular la descarga y otras propiedades hidrológicas de una captación, la opción para usar las grillas de peso adicionales o las grillas del traslado llamado grilla de filtración. La opción entre las funciones diferentes como la acumulación de flujo, máximo de flujo o cambio de flujo. Por consiguiente es posible no sólo calcular las grillas de acumulación, sino también analizar el cambio relativo dentro de una captación. HydroTools se integra completamente al programa SIG más popular empleado en la actualidad, el programa ArcView 3.x.

### 3 MATERIALES Y METODO

#### 3.1 Materiales

##### 3.1.1 Área de estudio



**Figura 1.** Fotografía satelital del la zona en estudio (ESC 1:55000 aprox.).

El predio Rucamanque se encuentra emplazado aproximadamente en los 38°39´ Latitud Sur y 72°36´ Longitud Oeste, en la IX Región de La Araucanía, a 12 km al N-N.O de la ciudad de Temuco, sobre la vertiente sur del cordón montañoso Huimpil – Ñielol, en cotas variables entre los 200 a 550 msnm, con una superficie de 435 hectáreas (Ramírez *et al*, 1989). Limita al Norte y Este, con los fundos El Arrejón y La Envidia, Monte Oscuro al Oeste, todos de propiedad de Forestal Mininco SA.; colinda al Sur y Oeste con el fundo Los Copihues y al Sureste con la Comunidad Indígena Monteverde. En lo que se refiere al clima, no existen datos propios del predio, y se asume valores correspondientes a la ciudad de Temuco que manifiesta un clima templado- húmedo con una pluviometría media de 1.157,4 mm/año y una temperatura media anual que oscila alrededor de 13,7 °C (Salas, 2001).

De acuerdo a Magofke (1985), Rucamanque se emplaza en el cordón montañoso Huimpil-Ñielol, irrumpiendo en la depresión intermedia sin llegar a disectarla y sin conectarse a los cordones montañosos de la Cordillera de los Andes o de la Costa con un origen tectónico distintos de éstas, estimándose que su formación sería entre los períodos paleoceno y pleistoceno.

Su topografía se destaca por fuertes pendientes, mayores al 45% en un 17,5% en el total de su superficie, caracterizándose por un relieve ondulado a irregular con una altitud media de 376 msnm, concentrando las mayores cotas en el sector noreste del predio (Salas, 2001). El mismo autor menciona, que se distinguen dos tipos de suelo dependiendo de su altimetría, trumaos a mayor altitud y suelos, de transición entre trumaos y rojo arcillosos en cotas menores, caracterizados por la existencia de cenizas volcánicas y presencia de arcilla en los horizontes inferiores.

Ramírez *et al.*(1989) señala que una de las comunidades vegetales más importantes del predio es *Lapagerio-Aextoxiconetum punctatii*, Bosque de Olivillo, que se presenta ocupando el fondo de las quebradas y se extiende por sus laderas; dicho bosque alcanza su mayor altitud en la exposición Sur, caracterizándose como un bosque perennifolio, hidrófilo, con abundantes trepadoras y pocas epifitas la especie dominante es olivillo (*Aextoxicon punctatum*), con una cobertura promedio de un 80%, seguido de *Chusquea quila*. Otra comunidad vegetacional es *Nothofago-Perseetum lingue*, Bosque de Roble-Laurel-Lingue, que es una asociación mixta, parcialmente caducifolia con abundancia de especies leñosas; ésta prospera preferentemente en la parte superior de Rucamanque y en las colinas adyacentes, presentando pocas epifitas y abundantes lianas, en esta comunidad la especie dominante es Roble (*Nothofagus oblicua*), con una cobertura promedio de un 78%, continuando la Quila (*Chusquea quila*); Lingue (*Persea lingue*) y Olivillo (*Aextoxicon punctatum*) aparecen como especie acompañantes. Magofke (1985) señala que al norte del río Cautín es un ecosistema forestal único en su género, condiciones que lo convierten en un relicto.

En relación a las características hidrológicas del predio en estudio, Magofke (1985) clasifica este sistema como una cuenca hidrográfica menor. Esta microcuenca divide el predio en sentido norte sur y es alimentada, principalmente, por nueve quebradas adicionales y su principal efluente corresponde al estero Chivilcán que nace desde la Bocatoma de Chivilcán.

### **3.1.2 Materiales cartográficos, equipos y programas computacionales.**

Para realizar el presente trabajo, los materiales cartográficos disponibles, las cubiertas digitales, los programas y equipos computacionales así como los instrumentos para las mediciones en terreno fueron los siguientes:

- Plano de uso actual.
- Fotografías aéreas, año 1994 escala 1:10.000 y año 1998 escala 1:5.000.
- Cubiertas de Curvas de nivel cada 25m, Uso actual e Hidrografía.
- Ortofotocarta, La Envidia – 68, escala 1:10.000, año 1997, con Fotografías FONDEF 1:20.000, año 1994-95, con curvas de nivel cada 10 m.
- 3 Computadores Personales Pentium IV
- Programa Estadístico SPSS versión 11.
- Programa ArcView GIS, Versión 3.1
- Programa AutoCAD 2000.
- Programa ERDAS, Versión 8.4.
- Programa ARC/INFO PC 3.5
- Extensión Hydrotools del Programa ArcView 3.1.
- Huinchas métricas de 50 m marca Lufkin.
- GPS, marca Magellan, modelo Tracker.
- Hipsómetros marca SUUNTO.
- Brújula marca SUUNTO.

## **3.2 Método**

### **3.2.1 Recopilación y procesamiento de la información de terreno.**

#### **3.2.1.1 Análisis preliminar de la cartografía**

Con la cartografía disponible en el Laboratorio de Ordenamiento Territorial del Departamento de Ciencias Forestales de Ingeniería Forestal de la Universidad de La Frontera, (Uso actual del Suelo, Hidrografía, ortofoto y Curvas de Nivel cada 25m), se realizó un análisis preliminar de la localización de las quebradas, contando con antecedentes previos, tanto de quebradas cartografiadas inexistentes y otras que, habiéndose encontrado en salidas a terreno, efectuadas con anterioridad, no habían sido fotointerpretadas.

El análisis preliminar entregó fuertes diferencias respecto a la localización de quebradas sobre las curvas de nivel equidistantes cada 25m, constatándose además que en algunos sectores no había coincidencia entre el modelo fotogramétrico y dichas curvas de nivel. Por lo tanto, se decidió volver a confeccionar la red hídrica, sobre el modelo digital de terreno, ya que este fue la base del análisis hidrológico realizado posteriormente. Sobre este modelo se delinearon las quebradas y sus respectivas cuencas, obteniendo de esta forma las longitudes y áreas respectivas. En este contexto, la interpretación de las curvas de nivel se utilizó como un enlace entre la fotointerpretación y los sistemas de información geográfica (Mena *et al.*, 2003).

#### **3.2.1.2 Diseño de Muestreo.**

Realizado el proceso antes descrito, se aplicó el Muestreo de Lista a Priori, que consistió en la utilización de una variable auxiliar (z) conocida que puede obtenerse a bajo costo, que describe y posee una alta correlación con la variable (y), y que represente a la población a muestrear. En el proceso de selección muestral, la probabilidad de selección de cada individuo es proporcional al

valor de la variable auxiliar; en este caso, se utilizó como variable auxiliar la longitud de las quebradas observadas en la fotointerpretación, permitiendo así, realizar una selección muestral en donde la probabilidad de selección de cada quebrada sea proporcional a su longitud con el fin de obtener una muestra representativa de la población en estudio (Prodan *et al.*, 1997). Así, la variable (y) que describe a la población, corresponde a la longitud total de las quebradas medidas en terreno.

### **3.2.1.3 Base Cartográfica.**

Para obtener una base cartográfica ortogonal del predio Rucamanque fue preciso utilizar la ortofotocarta La Envidia -68 del Instituto Geográfico Militar, con el objeto de georeferenciar las fotografías aéreas obtenidas del vuelo Agosto 1994 a escala 1:10.000. Dicho proceso, fue realizado utilizando el programa ERDAS Versión 8.4. Los datos empleados para su proyección corresponden a los datos geodésicos, Datum y elipsoide Sudamericano 1969, y los datos cartográficos son los proporcionados por el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM), para el HUSO 18. En esta etapa, se traspasó la información obtenida en el proceso antes descrito, a un SIG utilizando el programa ArcView versión 3.1, a fin de visualizar las coberturas (ArcView 3.x), y de esta forma obtener los puntos de referencia para las coordenadas de inicio y término del levantamiento de terreno, así como también las cotas del modelo digital de terreno.

### **3.2.1.4 Toma de datos en Terreno.**

Definidas las quebradas a inventariar, se procedió a efectuar labores de reconocimiento en terreno, usando las fotografías aéreas de la zona en estudio, para posteriormente llevar a cabo un levantamiento topográfico, en el cual se recopiló información de las variables de longitud, pendiente, dirección, profundidad y ancho del curso, así como también la presencia de agua; estas mediciones fueron efectuadas con huincha, hipsómetro y brújula. Adicionalmente se controlaron puntos singulares mediante GPS, para que en suma se contara con datos suficientes que

permitieran determinar la ubicación exacta de las quebradas, tanto en planimetría como en altimetría, apoyando y corrigiendo en lo pertinente las curvas de nivel del sector y emplazar la red hídrica de acuerdo a las coordenadas de la zona.

Para la recopilación de datos de terreno se organizaron, ocasionalmente, hasta 2 brigadas de trabajo, con el objeto de ejecutar acciones en forma simultánea en las distintas quebradas a inventariar. Todos estos equipos contaban con los instrumentos requeridos y un criterio preestablecido para realizar el proceso de recolección de datos. En primer lugar, se realizó la identificación y levantamiento de la Quebrada Principal, denominada Quebrada Cero, a partir de la cual se determinaron los puntos de confluencia de cada una de las quebradas secundarias analizadas, materializando estos puntos en terreno para amarres y verificaciones posteriores.

A raíz de la espesa cubierta vegetal, principalmente compuesta por *Chusquea quila*, preponderante en las quebradas en estudio, el levantamiento de cada una de las quebradas debió realizarse empleando normalmente distancias cortas, sumado a continuos cambios de dirección, por ende, la probabilidad de error se consideró en función de cada una de las mediciones, pero por sobre todo, proporcional al camino recorrido.

De igual forma, y a fin de contar con una mayor precisión en las cotas de la Quebrada Cero, se realizó una nivelación taquimétrica en el sendero emplazado en el cuadrante sur oriente del predio, dando cota a los dos puentes peatonales que cruzan la quebrada y por ende a su lecho en cada uno de dichos puntos, siendo estos últimos utilizados como cotas de referencia en el levantamiento altimétrico.

### **3.2.1.5 Compensación de declinación magnética**

Una vez realizada la toma de datos en terreno, éstos fueron vertidos en una planilla Excel, donde se realizó la corrección de la declinación magnética, correspondiente a la diferencia resultante



entre la dirección cartográfica de la Ortofotocarta, La Envidia – 68, escala 1:10.000, con una posición real medida en terreno con brújula e identificada en dicha ortofotocarta, empleando para este caso, la línea física del límite Este del predio, obteniendo una corrección ascendente a 9° NE, los que se agregaron a la lectura de cada uno de los puntos colectados.

### 3.2.1.6 Compensación de errores de cierre.

Posteriormente, se efectuó la corrección entre la distancia medida en terreno, usando la pendiente registrada por el hipsómetro, transformando esta distancia inclinada en distancia horizontal y obteniendo su correspondiente diferencia de altura o  $\Delta h$  entre puntos.

Una vez realizadas las correcciones antes indicadas, y partiendo de puntos coordenados conocidos, se procedió a unir dichos puntos para generar una poligonal que diera forma a cada una de las quebradas, calculando las respectivas coordenadas de cada uno de los puntos de terreno, para determinar así el error de cierre en sus coordenadas norte y este por las diferencias de distancia con respecto al punto de llegada, también punto conocido. Cabe destacar que las coordenadas de los puntos conocidos (amarras), fueron obtenidas a partir de la georreferenciación de la fotografía aérea del predio, donde se proporcionó referencia UTM a puntos-objeto emplazados en sectores visibles, los cuales fueron incluidos en el levantamiento realizado.

El error, definido como

$$e = \sqrt{(eN)^2 + (eE)^2} \quad (3.1)$$

Donde:

$e$  : Error total

$eE$  y  $eN$  : Son las proyecciones Este y Norte de la discrepancia de cierre en coordenadas.

También puede ser expresado como

$$e = \sqrt{(N_K - N_F)^2 + (E_K - E_F)^2} \quad (3.2)$$

Donde

N y E : Proyecciones ortogonales en coordenadas Norte y Este, respectivamente

K : Subíndice que indica el valor de llegada según cálculo a partir del punto conocido de salida.

F : Subíndice correspondiente al valor real del punto conocido de llegada.

De acuerdo a lo indicado en MOP (2001), lo anterior se puede plantear de la siguiente manera:

$$EI + \sum_{i=0}^n Li \sin(Aci) - EC = eE \quad (3.3)$$

$$NI + \sum_{i=0}^n Li \cos(Aci) - NC = eN \quad (3.4)$$

Donde:

EI y NI : Corresponden a las coordenadas del vértice de inicio.

EC y NC : Equivale a las coordenadas del vértice de cierre.

Li : Son las longitudes de los lados medidas en terreno reducidas a la horizontal.

Aci : Son los azimutes de los lados ya corregidos.

$Li \sin(Aci)$  y  $Li \cos(Aci)$  : Corresponden a la variación en posición, o camino recorrido entre cada uno de los puntos o vértices de la poligonal en el sentido de sus respectivas proyecciones ortogonales.

Considerando que para los valores de la poligonal obtenida en este estudio, no es razonable efectuar correcciones angulares y de distancia en forma separada, debido principalmente a la precisión del instrumental empleado en la medición angular, se procedió a compensar el error directamente de las coordenadas antes calculadas, mediante el método de los caminos recorridos, de acuerdo al MOP(1983), por cuanto las versiones posteriores de este manual no hacen mención al uso de poligonales simples. Destacando que el camino recorrido se calcula de igual forma a la indicada en el párrafo precedente, vale decir  $Li \sin(Aci)$  y  $Li \cos(Aci)$ .

Así, el criterio de compensación empleado fue desplazar cada vértice, o punto, en forma proporcional a la distancia entre este y el punto de partida (camino recorrido), empleando las siguientes formulas:

$$\text{Coordenada Este: } X_K = X_i \pm \frac{e_x}{\sum_0^n L_x} \sum_0^K L_x \quad (3.5)$$

$$\text{Coordenada Norte: } Y_K = Y_i \pm \frac{e_y}{\sum_0^n L_y} \sum_0^K L_y \quad (3.6)$$

Donde:

$X_i, Y_i$  : Coordenadas iniciales Este y Norte respectivamente.

$e_x, e_y$  : Error en sentido Este y Norte.

$L_y, L_x$  : Longitud recorrida entre punto inicial y a corregir.

De igual forma, la compensación de cota se realizó conforme al procedimiento descrito según MOP (2001), distribuyendo la corrección del error en forma proporcional al camino recorrido. Para esto, se calculó la cota de cada uno de los puntos a partir de cotas conocidas, las que, como

se indicó anteriormente, se determinaron por georreferenciación de puntos-objeto conocidos, concretamente el portón de entrada al predio y árboles singulares emplazados aledaños al camino cortafuego, para posteriormente comparar la cota obtenida en el término del trayecto con la que correspondería de acuerdo a los puntos georreferenciados; la diferencia entre ambas cotas corresponde al error total, y su corrección para los diversos puntos intermedios se efectuó empleando la siguiente fórmula:

$$C'_K = C_K \pm \frac{e}{L_T} \cdot L_K \quad (3.7)$$

Donde:

$C_K$  : Cota del punto sin corrección.

$e$  : Error total en el tramo.

$L_T$  : Longitud del tramo en análisis.

$L_K$  : Longitud recorrida desde el inicio al punto a corregir.

Las correcciones antes descritas fueron realizadas en primer lugar a la quebrada principal, a fin de obtener los puntos de confluencia de las quebradas secundarias, y a partir de estos se calcularon los puntos pertenecientes a cada una de estas quebradas. Posteriormente se verificaron los errores de cierre para las quebradas que finalizaban con puntos conocidos, o puntos de amarre, realizando las correcciones de cota y de coordenadas conforme al procedimiento antes descrito. Destacando que este método, al efectuar las correcciones directamente sobre las coordenadas calculadas, realiza en forma conjunta la corrección por azimut y distancia. Posteriormente este levantamiento en terreno, ordenado en la planilla Excel, se procesó mediante el programa AutoCAD 2000, para la representación gráfica de cada uno de los puntos

### 3.2.1.7 Determinación de superficie de cursos de agua para la red hídrica

A fin de determinar la superficie generada por los alineamientos que dan forma en planta a cada una de las quebradas en estudio, se utilizaron los anchos registrados en terreno y el respectivo alineamiento azimutal entre dos lados consecutivos.

En primer lugar, se define el azimut entre el punto anterior y el punto de cálculo, se deduce la bisectriz del ángulo conformado por estos alineamientos, la cual se transforma en un azimut auxiliar, denominado azimut auxiliar N° 1, el cual se complementa con la mitad de la medida del ancho de la quebrada o canal, registrado para ese punto, y mediante el empleo de coordenadas polares se determina la posición del punto correspondiente a esa mitad del ancho del canal, al cual se denomina punto A. Con el objeto de obtener la posición de la otra mitad del ancho total, se suma 180° al azimut auxiliar 1 y se obtiene un nuevo azimut, denominado azimut auxiliar 2, el cual en complemento con la mitad del ancho faltante, y mediante el uso de coordenadas polares define la posición de este nuevo punto, denominado punto B (MOP, 2001)

Lo anterior se puede expresar como:

$$\omega = Az1 + 180^\circ - Az2 \quad (3.8)$$

$$\text{Azimut Auxiliar N}^\circ 1: \alpha = Az2 + \frac{\omega}{2} \quad (3.9)$$

$$\text{Azimut Auxiliar N}^\circ 2: \beta = \alpha + 180^\circ \quad (3.10)$$

$$\Delta N_A = \frac{a}{2} \cos \alpha, \quad \Delta E_A = \frac{a}{2} \sin \alpha \quad (3.11)$$

$$\Delta N_B = \frac{a}{2} \cos \beta, \Delta E_B = \frac{a}{2} \sin \beta \quad (3.12)$$

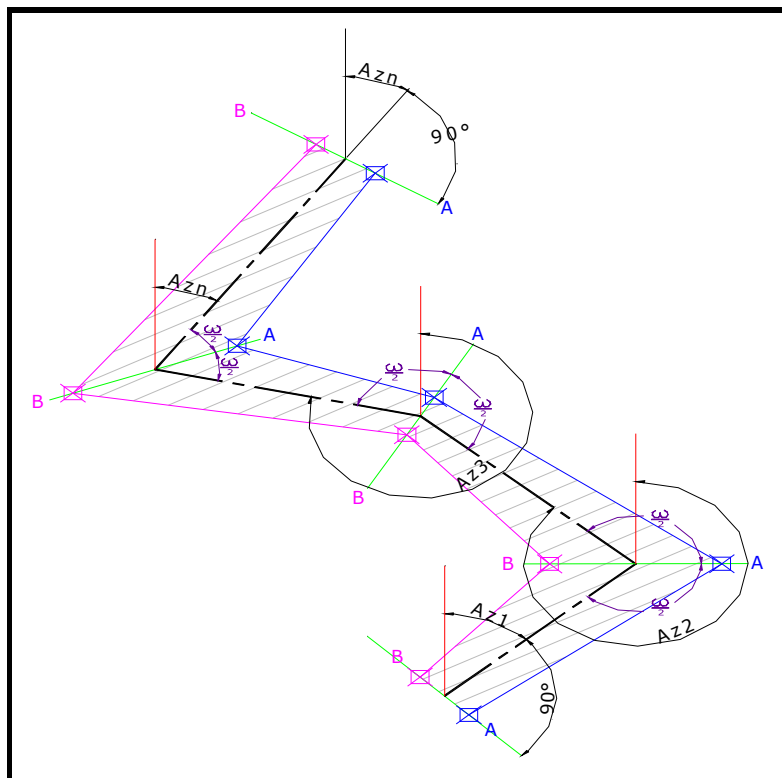
Donde:

$Az_1$  y  $Az_2$ : Corresponden a los azimutes del punto anterior y del punto donde se efectúa el cálculo respectivamente.

$\Delta N_i$  y  $\Delta E_i$ : Corresponden a la variación en distancia y sentido entre el eje del punto analizado y el borde calculado.

En la eventualidad que los azimutes auxiliares 1 o 2, resultasen mayores a  $360^\circ$ , se resta  $360^\circ$  al valor de dicho azimut y se realizan los cálculos con este nuevo resultado. De igual forma, si el resultado es negativo se le suma  $360^\circ$  y se procede con este nuevo valor.

Para el caso de puntos iniciales, que cuentan solo con un azimut, el procedimiento consiste en proyectar la mitad del ancho a cada uno de los lados en la dirección del azimut registrado, sumándole  $90^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente. En forma similar se procede con los puntos terminales, donde se repite al último azimut registrado y se le suman  $90^\circ$  y  $180^\circ$ . Una vez se cuenta con la totalidad de los puntos A y B calculados, se unen estos mediante líneas o polilíneas, según su designación, con el objeto de obtener la forma y la superficie que representa la quebrada en análisis, este proceso es generado en el programa AutoCAD 2000. El procedimiento antes descrito, se esquematiza en la Figura 2, indicada a continuación:



**Figura 2.** Diagrama del cálculo de superficies del curso de agua..

### 3.2.1.8 Análisis Espacial del levantamiento de red hídrica.

Con la cubierta de la superficie de cursos de agua, se realizó un análisis de sobreposición (CLIP) con el MDE, borrando el segmento de las curvas de nivel intersectadas por la superficie de cursos de agua, de manera de incorporar en esos sectores, mediante un segundo análisis de sobreposición (UNION) los antecedentes de localización y cotas para toda la red hídrica muestreada en el levantamiento.

Además, se incorporaron líneas estructurales como datos auxiliares que definen elementos lineales con valores de altitud asociados a vértices a fin de asegurar el ajuste de la superficie topográfica, por cuanto y coincidentemente con lo recomendado por Felicísimo (1994), la calidad de un MDE mejora significativamente introduciendo esta información.

De igual forma, Kenny y Matthews (2005) indican que un método común para aumentar la exactitud de límites del cuencas es utilizar la red de hidrología para post-condicionar al modelo de elevación digital, de esta forma la red de drenaje asegura cumplir con la topografía local. Este proceso se conoce como quemado de arroyo (*stream burning*).

El proceso de integración de hidrografía vectorial en una capa raster de elevación (*stream burning*) se puede resumir en cuatro pasos generales: (1) rasterización de una red hidrográfica vectorial, (2) asignar valores de altitud del MDE a las celdas del raster de la red hidrográfica, (3) manipular las celdas del raster de la red hidrográfica para asegurarse que las altitudes vas descendiendo hacia los “*outlets points*” (bocatoma), y (4) introducir una diferencial de elevación fija entre las celdas del raster de red hidrográfica y las celdas del raster de la superficie del terreno (Saunders, 1999). *Stream burning* promueve la réplica digital de las redes hidrológicas existentes mediante las funciones automatizadas de dirección de flujo y acumulación de flujo. Esto es importante para asegurar la coincidencia de la red hidrológica con los datos de puntos de localización en terreno, tales como turbinas generadoras, localizaciones de descargas y estaciones de muestreo, que pueden ser localizadas utilizando técnicas GPS. El logro de una red hidrológica exacta también es importante para propósitos de modelado de calidad de agua, por ejemplo, para asegurar que los parámetros cinéticos de la disminución de un agente contaminante son aplicados en una longitud de la red hidrográfica y período de tiempo apropiados.

### **3.2.1.9 Construcción de perfiles de terreno.**

Con los puntos capturados en terreno se confeccionaron perfiles longitudinales de escorrentía, utilizando el programa Autocad 2000, con lo que se visualiza gráficamente las pendientes y desarrollos involucrados, base fundamental para la mayor parte de los proyectos hidrológicos por su exactitud en graficar la sinuosidad del terreno (Ruiz,1998); paralelamente se graficaron los perfiles del modelo digital de terreno seleccionado (SPOT), con el objeto de determinar cuanto discrepaba el MDT con el levantamiento efectuado en terreno (Triviño *et al.*, 2001). Para una



correcta comparación, se verificó que las cotas de inicio y término de quebradas, correspondieran a los valores localizados en el MDT.

Para la evaluación de los modelos se utilizaron medidas de exactitud y sesgo de las estimaciones, el estadígrafo utilizado para medir exactitud corresponde al Error Cuadrático Medio y para la evaluación de sesgo se utilizó Diferencia Agregada, según las formulas siguientes (Prodan *et al.*, 1997):

Error Cuadrático Medio (ECM):

$$ECM(\%) = \frac{100}{\bar{z}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - zMDE_i)^2}{n}} \quad (3.13)$$

Diferencia Agregada (DA):

$$DA(\%) = \frac{100}{\bar{z}} \left( \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - zMDE_i)}{n} \right) \quad (3.14)$$

Donde

$zMDE_i$  : Cota del MDE.

$z_i$  : Cota del levantamiento de terreno.

$\bar{z}$  : Cota promedio del levantamiento de terreno.

$n$  : Numero total de observaciones.

### **3.2.2. Procesamiento del Modelo Digital de Terreno.**

#### **3.2.2.1 Comparación de Modelos Digitales de Terreno con curvas de nivel cada 10 y 25 m.**

Para ambas cubiertas, se construyeron las correspondientes estructuras de redes de triángulos irregulares, denominadas TIN, considerando para cada caso su respectiva topología de líneas y puntos. Se efectuaron los análisis con TIN realizados para curvas de nivel equidistantes cada 25 y 10 metros, con 4 y 39 puntos acotados respectivamente, analizando factores topográficos de exposición, altitud y pendiente. Para ello se consideró lo estipulado para los rangos de uso común según los Anexos 1, 2 y 3 utilizados por CONAMA y, para el caso de la pendiente, se procedió según lo estipula el Decreto Ley N° 701 año 1974 y su reglamento técnico, D.S. N° 259 de 1980. Pretendiendo, de esta forma, verificar diferencias significativas entre ambos modelos digitales de terreno (MDT), formados por los TIN antes indicados.

Para determinar si existían diferencias significativas de los factores físicos de exposición, altitud y pendiente, se compararon dichos factores correspondientes a ambas estructuras TIN en función de la superficie, empleando la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov y la prueba “t” de comparación de medias de datos pareados, ambos al 95% de confiabilidad, y señalados por Murray (1993). Este proceso fue realizado con el paquete estadístico SPSS versión 11.

#### **3.2.2.2 Comparación de Modelos Digitales de Elevación**

A pesar de que la estructura TIN es la más adecuada para construir un modelo digital de elevación, MDE, por su capacidad de representar un relieve complejo con precisión, ésta se encuentra afectada por los problemas típicos de las estructuras vectoriales y la ausencia de un desarrollo suficiente de algoritmo de análisis. Por tales razones, lo más usual es crear un MDE basado en un modelo TIN y posteriormente, generar un MDE matricial convencional mediante

procesos de interpolación; el principal inconveniente en la construcción de la matriz regular, es básicamente un problema de interpolación con el conjunto de puntos con coordenadas (x, y, z) (FAO, 1996), distribuidos irregularmente en triángulos, debido a que se asigna a cada nodo del MDE matricial un valor de altitud estimado a partir del TIN. Obviamente, la estructura matricial no puede representar puntos singulares ni estructuras lineales como el TIN, por lo que parte de los beneficios de la triangulación se pierden (Felicísimo, 1994).

Además, como el análisis hidrológico se realiza mediante información RASTER, para la cubierta de curvas de nivel seleccionada en el proceso anterior se realizó una comparación del tamaño de la cuadrícula cada 5 y 10 m, de la zona en estudio, con respecto a los factores físicos de exposición, altitud y pendiente; con ello se buscó verificar diferencias significativas entre ambas cuadrículas y compatibilizar la información RASTER con la información vectorial de las quebradas, en un nivel de resolución que no pierda exactitud (Felicísimo, 1994).

De esta forma, considerando que el tamaño de la celda es uniforme y conocido, la elevación de una celda puede compararse fácilmente con la de la celda vecina, mediante cálculos matemáticos puede determinar la celda vecina que tiene la mayor diferencia de elevación, esto sirve como base para calcular otras características de la celda como pendiente, aspecto o exposición (FAO, 1996).

Con el objeto de establecer las diferencias significativas entre las grillas, estas fueron estadísticamente evaluadas utilizando el programa estadístico SPSS versión 11, mediante la prueba de bondad de ajuste usando la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov, y la prueba “t” de comparación de medias de datos pareados, al 95% de confiabilidad (Freund y Walpole, 1990).

### **3.2.2.3 Verificación de Supuestos de Normalidad**

La dódima de Kolmogorov-Smirnov, compara una función de distribución acumulada observada con una distribución acumulada teórica. La teórica puede ser normal, uniforme o de Poisson, para

este caso, se desea verificar una distribución normal de los datos. Los parámetros de la distribución teórica son estimados desde los datos observados (datos del TIN-10 o RASTER-10). Los Máximos Valores Absolutos indican las mayores diferencias entre las funciones de distribución acumulada teórica y acumulada observada. Grandes valores de significancia (mayor a 0,05) indican que la distribución observada equivale a la distribución teórica.

#### **3.2.2.4 Comparación de datos pareados**

El procedimiento de la prueba “t”, de muestras pareadas, compara el promedio de dos variables que representan el mismo grupo en diferentes tiempos o relaciones de grupos (por ej. TIN y RASTER).

Un bajo valor de significancia para la prueba “t”, generalmente menor que 0,05, indica que hay diferencias significativas entre las 2 variables.

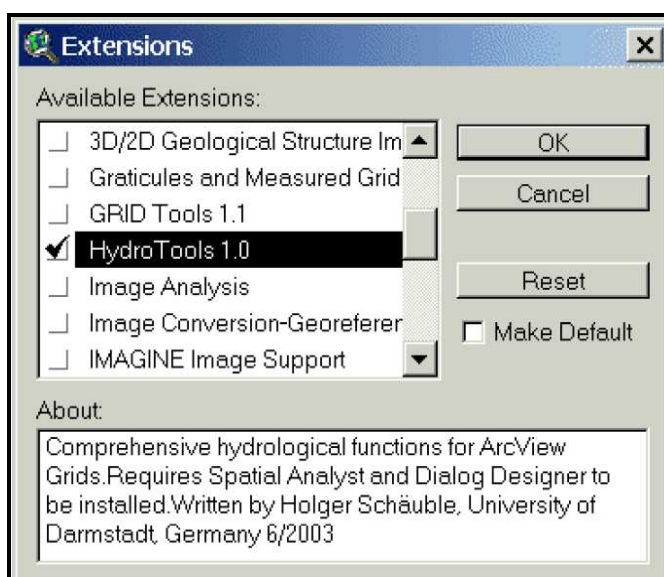
Si el intervalo de confianza para la diferencia promedio no contiene ceros, esto también indica que la diferencia es significativa.

Si el valor de significancia es alto y el intervalo de confianza para la diferencia promedio contiene ceros, entonces, no se puede concluir que existan diferencias significativas entre el promedio de las dos variables.

#### **3.2.3 Aplicación de la herramienta Hydrotools 1.0 para ArcView 3.x**

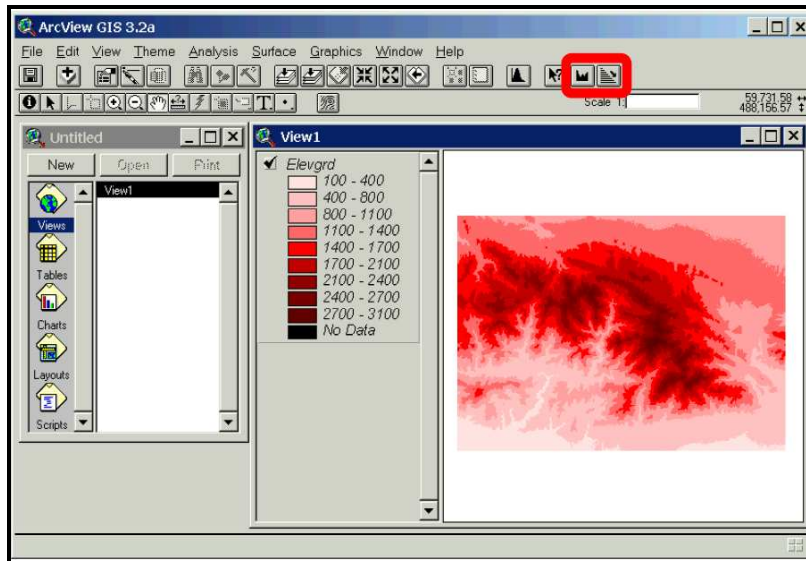
Hydrotools es un programa para analizar las captaciones hidrológicas, esta compuesto por tres algoritmos diferentes: flujo simple (D8), Flujo Múltiple (MD), y flujo combinado (MDD8); para el desarrollo de esta tesis se empleará el algoritmo de flujo simple (Schäuble, 2003).

HydroTools proporciona dos archivos: un archivo de extensión llamado hydrotools.avx y un archivo de rutinas llamado hydrotools.dll, mientras el archivo de extensión responsable de la comunicación entre el usuario y el programa ArcView. El archivo de rutinas hydrotools.dll comprende todas las funciones necesarias para las variadas simulaciones hidrológicas. Hydrotools es activado como se observa en la figura 3.

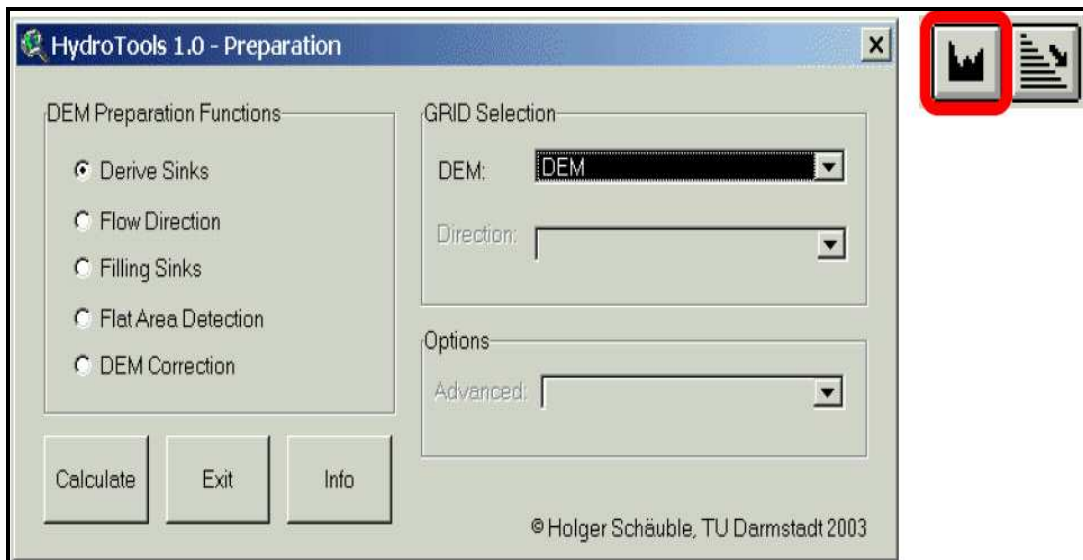


**Figura 3.** Activación de HydroTools 1.0 en la ventana de “*Extensions*” de ArcView 3.x

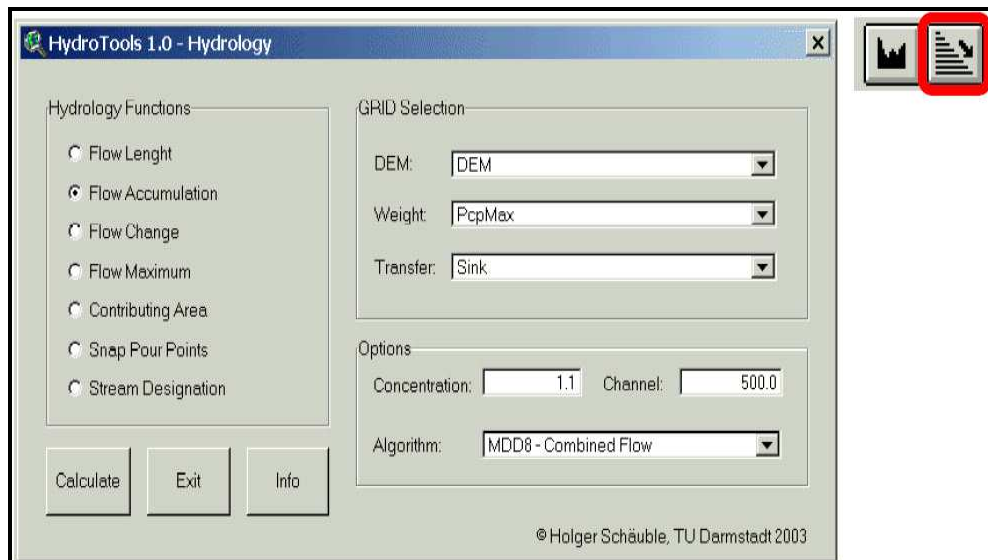
Seleccionando uno de los botones (Figura 4), se proporcionan las funciones específicas, algunas de las cuales comprenden la corrección del modelo digital de elevación (MDE) requerido para el análisis hidrológico. El primer botón abre la ventana “*Preparation*” (Figura 5) que proporciona las funciones para encontrar y corregir los errores en los MDE. Sin tales correcciones cada cálculo siguiente podría estar lleno de errores, por lo tanto, esta ventana es el principio del análisis. El segundo botón abre la ventana “*Hydrology*” (Figura 6) el cual proporciona las diferentes funciones para analizar las propiedades hidrológicas de captaciones.



**Figura 4.** Botones de HydroTools 1.0 (destacados en color rojo) que habilitan la selección de diferentes ventanas de análisis



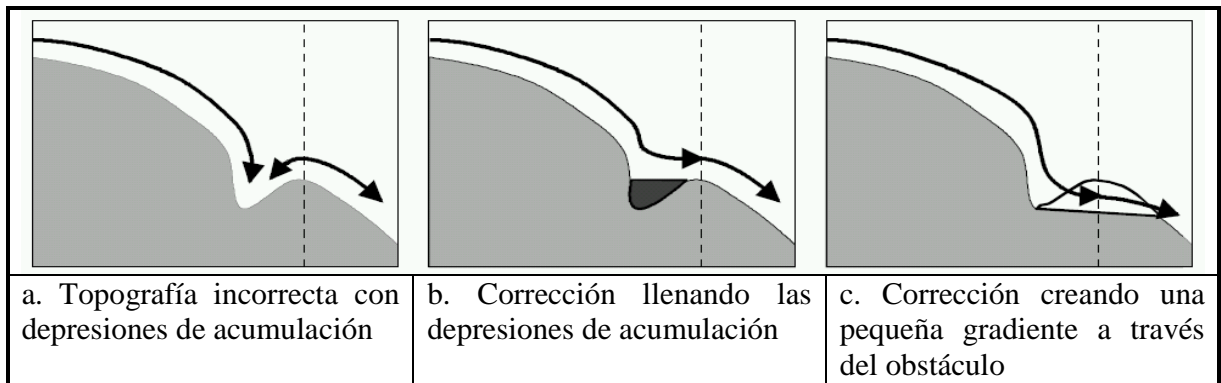
**Figura 5.** Ventana "Preparation" con funciones para corregir los MDE.



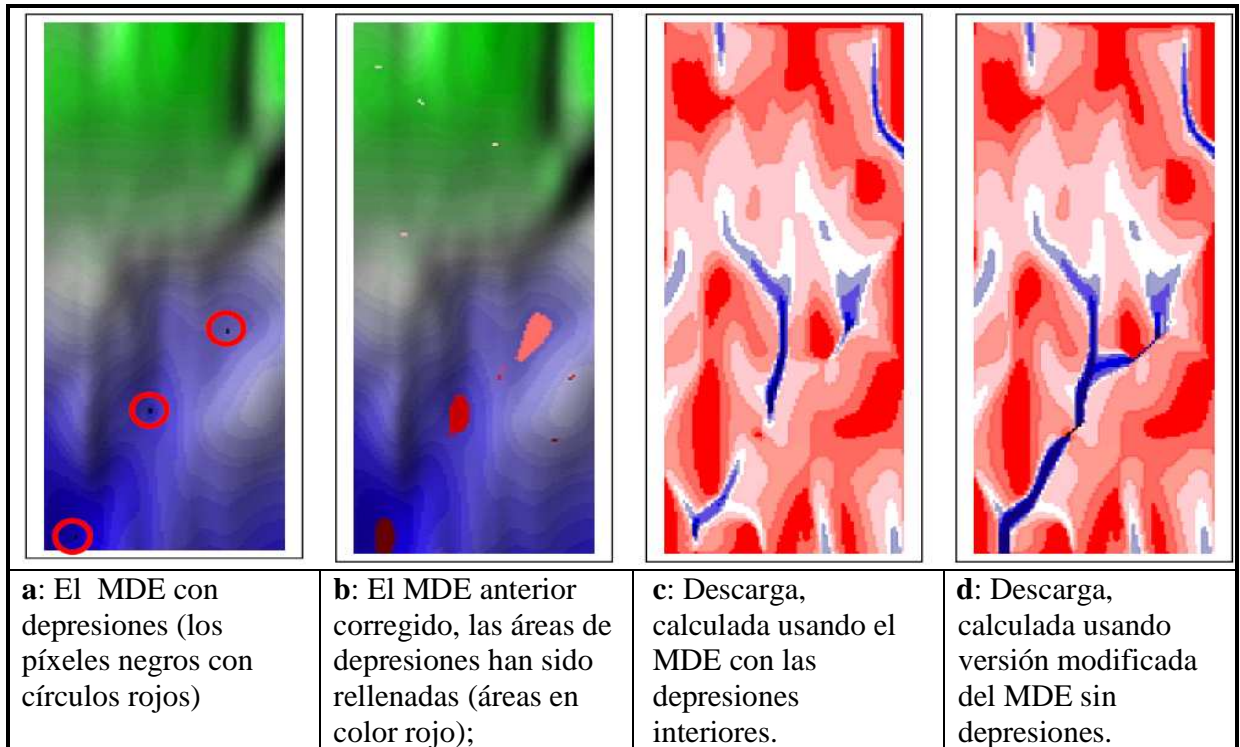
**Figura 6.** Ventana “Hydrology” con funciones hidrológicas para analizar MDE y Captaciones.

### 3.2.3.1 Funciones para la corrección de MDE

Al inicio de cada análisis hidrológico, se debe garantizar la corrección y exactitud del MDE. Esto es necesario por cuanto los MDE contienen pequeños errores y artefactos en la mayoría de los casos. Algunos de ellos corresponden a erróneas depresiones de acumulación, donde se detendría el agua (*Dischargeless Sinks*), que se crean durante la interpolación de un MDE de un TIN a un RASTER; otros errores corresponden a hoyos artificiales o áreas planas que cubren a menudo pequeñas superficies de terreno. De los anteriores, los elementos más cruciales son las depresiones de acumulación que cortan el flujo de agua y, por consiguiente, conllevan a cálculos hidrológicos con resultados erróneos (ver Figura 7a, y Figura 8). Para descubrirlos y corregirlos, el programa cuenta con 4 funciones disponibles en ventana “Preparation”, y se acompañan por una rutina que calcula las direcciones de flujo de un MDE (Figura 5).



**Figura 7.** Depresiones de acumulación en un MDE y sus correcciones. **a:** Las depresiones de acumulación y sus efectos en el flujo de agua, ilustrado por el ejemplo de una pendiente que interrumpe el flujo de agua y falsea los cálculos hidrológicos, especialmente cuando nacen de artefactos durante la interpolación de los MDE. **b:** Primera Posibilidad de preparar un MDE para los sucesivos análisis hidrológicos: Llenando depresiones usando la función *Filling Sinks* (necesario para realizar los cálculos del algoritmo D8 de Flujo Individual); **c:** Segunda Posibilidad de preparar un MDE para los sucesivos análisis hidrológicos: La ruptura de un obstáculo usando la función DEM Corrección.



**Figura 8.** Funciones necesarias para la corrección del MDE.

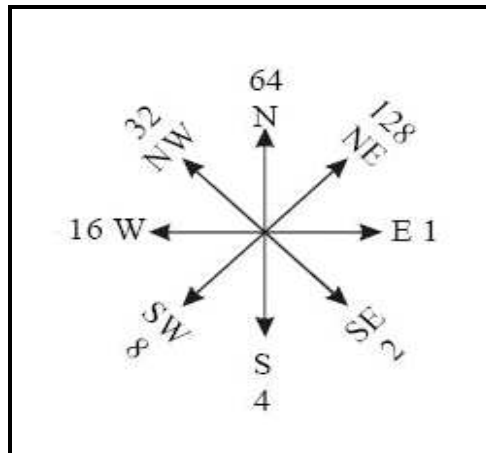


**3.2.3.1.1 Depresiones de acumulación (*Derive Sinks*).** Esta función descubre las depresiones de acumulación en un MDE y entrega a cada uno de ellos un número correlativo, debiendo seleccionar un MDE en la caja opciones DEM, de la sección de selección de grilla (*Grid Selection*). Como resultado, se obtiene una nueva grilla donde se muestran las depresiones internas, todas las áreas hidrológicas correctas se marcarán con valores *No Data* y todas las depresiones internas de acumulación se marcan con los números correlativos.

**3.2.3.1.2 Llenado de acumulaciones (*Filling Sinks*).** Esta función llena las depresiones de acumulación hasta alcanzar una altura igual a las áreas adyacentes (Figura 7b), para lo cual es necesario seleccionar un MDE en la caja opciones de selección de grilla (*Grid Selection*). Debido al algoritmo iterativo, el cálculo puede tomar un tiempo bastante largo, especialmente para los procesos que involucren archivos con grandes cantidades de datos.

**3.2.3.1.3 Detección de áreas planas (*Flat Area Detection*).** Esta función detecta las áreas planas en un MDE y las enumera correlativamente. El uso de esta función y los valores calculados es coincidente con la función depresiones de acumulación (las áreas correctas corresponden a valores de *No Data* y las áreas planas corresponden a números correlativos).

**3.2.3.1.4 Dirección de Flujo (*Flow Direction*).** Esta función calcula la Dirección de Flujo. Una nueva grilla es calculada desde el MDE que fue previamente rectificado con la función de llenado de acumulaciones (a fin de evitar que contengan depresiones sin descargas), la nueva grilla de dirección tendrá 8 categorías, números enteros de 1 a 128 (Figura 9). Cada valor representa la orientación de la celda de la siguiente forma: E=1, SE=2, S=4, SW=8, W=16, NW=32, N=64, NE=128. Además, es posible especificar el tratamiento del cálculo de bordes de la grilla mediante dos opciones diferentes en la sección avanzada: la opción "*Force Edge*" calcula los valores de dirección de flujo que van hacia fuera de la grilla y la opción "*No Force Edges*" calcula los valores de dirección de flujo que van hacia el interior de la grilla.



**Figura 9.** Codificación de dirección de flujo.

**3.2.3.1.5 Corrección del MDE (*DEM Correction*).** Esta función corrige las depresiones y áreas planas en un MDE bajando todas las áreas vecinas importantes (Figura 7c). Esto se cumple comparando las altitudes de un MDE con las direcciones de flujo de una grilla de dirección de flujo. En caso de cualquier inconsistencia (direcciones de flujo que indican un terreno con gradiente pero altitudes que indican una pendiente), el MDE se baja con un pequeño valor (en decrementos de 0,0001) hasta que la contradicción haya desaparecido (es decir el obstáculo se rompe). En caso de total concordancia entre las altitudes y los valores de la dirección de flujo (los terrenos descendentes y altitudes que disminuyen) el MDE podrá permanecer sin ser modificado.

### **3.2.3.2 Funciones para analizar el MDE y grandes captaciones.**

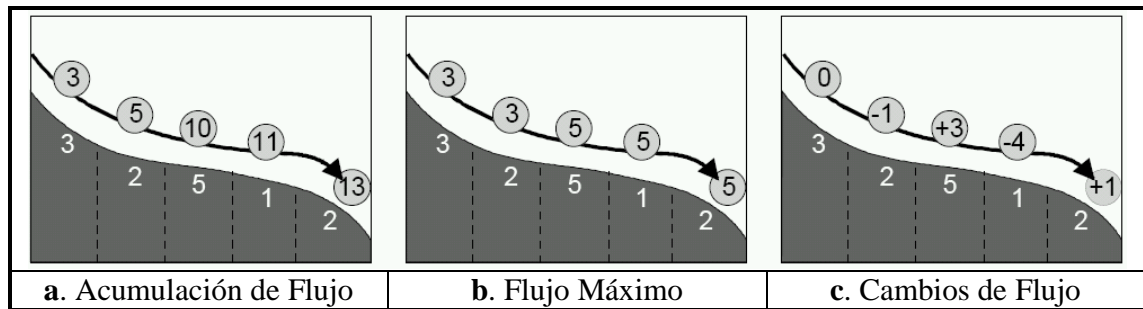
Estas proporcionan capacidad para considerar diferentes tasas de filtración por un lado, así como también la capacidad de aplicar diferentes algoritmos de flujo; para el presente caso se aplicó el algoritmo común de flujo simple (D8).

**3.2.3.2.1 Longitud de flujo (*Flow Length*).** Esta función calcula la longitud de flujo desde una grilla de dirección de flujo (seleccionada en la ventana de opciones de Dirección) que se derivó del MDE. Cada celda es numerada con el largo del flujo correspondiente al camino de flujo que cubre la distancia más larga de la cuenca. Para el caso en estudio se escogió la dirección descendente y para ello, se seleccionó la Opción “*Downward*”. De igual forma, Horton (1945), señalado por (MOPT, 1992) menciona que dio origen al estudio cuantitativo de redes de ríos, desarrollando un sistema para ordenar las redes de ríos y derivando algunas leyes al relacionar el número y la longitud de los ríos de diferente orden. El sistema de ordenamiento de ríos de Horton, levemente modificado por Strahler (1964), se indica a continuación: Los canales reconocidos más pequeños se designan como de orden 1; normalmente estos canales fluyen sólo durante tiempo húmedo. Cuando dos canales de orden 1 se unen, resulta un canal de orden 2 hacia aguas abajo; en general, cuando canales de orden  $i$  se unen, resulta un canal de orden  $i+1$ . Cuando un canal de orden bajo se une con otro canal de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los dos órdenes (Chow *et al*, 1994).

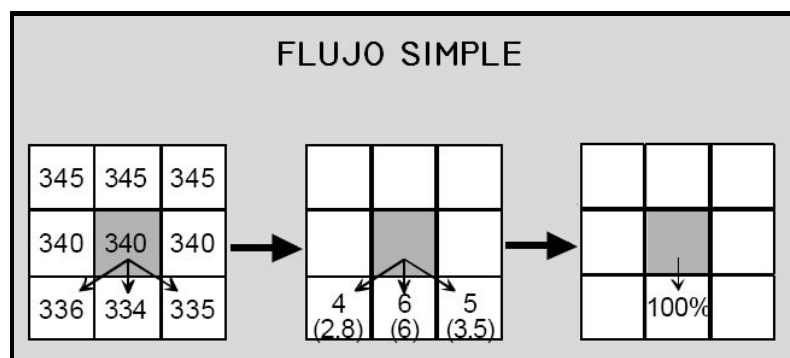
**3.2.3.2.2 Acumulación de flujo (*Flow Accumulation*).** Esta función calcula la acumulación de flujo de un MDE. La acumulación de flujo es una función que calcula la cantidad de fluido, agua o partículas de contaminante, que se mueve hacia una captación en los valles (Figura 10a), seleccionándose para el presente estudio el método de cálculo D8. Esta acumulación de flujo es calculada por un algoritmo de flujo simple (O'Callaghan & Mark, 1984), cuyo método se ilustra en la Figura 11. Para su procesamiento, Hydrotools necesita al menos una celda de dirección de flujo que debe calcularse por la Función Dirección de Flujo (seleccionada de las opciones de Dirección); los resultados de este proceso se ilustran en la Figura 12.

El análisis de acumulación de flujo puede modificarse considerando una ponderación optativa o incluir una grilla de transferencia, para lo cual se utiliza una grilla ponderada, seleccionada en la ventana de opciones *Weight*, cuya ponderación normal (celda con valor = 1) puede cambiarse para considerar una precipitación con variación espacial. Usando la grilla de transferencia

(seleccionada en ventana de opciones *Transfer*), el valor de la filtración usual de una celda (valor = 1) puede cambiarse de la misma manera, dicho valor equivale al estado estándar sin filtración.

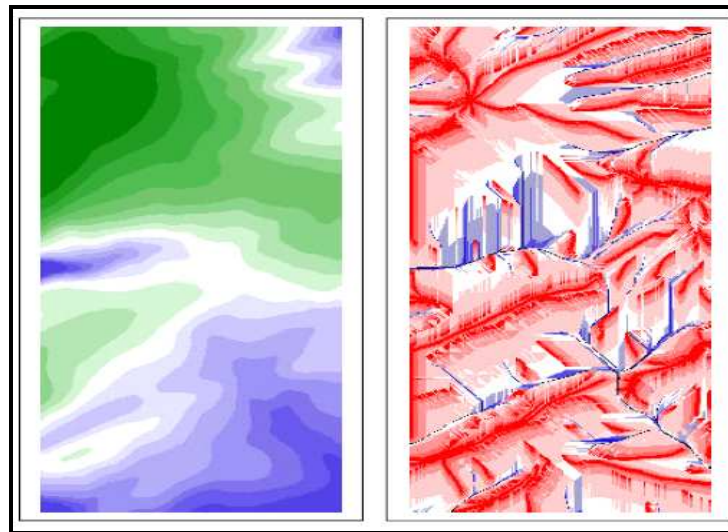


**Figura 10.** Funciones básicas para los cálculos de propiedades de flujo. **a:** Sumatoria de cantidad de agua, calculada con la función de Acumulación de Flujo; **b:** Mayores intensidades de lluvias en las partes superiores de la captación, calculado con la función de Flujo Máximo; **c:** Alteración de las intensidades de lluvia en dirección de pendiente, calculado con la función de Cambio de Flujo.



**Figura 11.** Algoritmos básicos para calcular movimiento de Flujo Simple.

De la Figura 11 se desglosa parte de un MDE con altitudes en m.; la flecha negra muestra posibles vías del flujo desde la grilla central gris, luego por diferencias en altitud de las vías de flujo, en m; diferencias ajustadas en paréntesis (debido a que la mayor diferencia es calculada a la esquinas de las celdas con la fórmula: diferencia de alturas /  $\sqrt{2}$ ) y finalmente la porción de flujo recibido, calculado con algoritmo de flujo simple y el principio: 100% del flujo a la celda de mayor gradiente.



**Figura 12.** Cálculos de acumulación de flujo con algoritmo simple. **a:** El MDE (las altitudes aumentan desde azul al verde); **b:** La acumulación de flujo por el Método de Flujo Simple D8 (Las descargas aumentan desde el rojo al azul)

**3.2.3.2.3 Cambio de flujo (*Flow Change*).** Esta función calcula los cambios de flujo en dirección de la pendiente. Usando una grilla ponderada especificada puede determinarse si los valores de la celda están aumentando o disminuyendo en dirección de la gradiente (Figura 10c), o bien que las celdas adyacentes consideradas están escurriendo directamente en la celda actual.

Se escogió el método de cálculo, D8, usando el algoritmo de flujo simple (Figura 11). Se analizó cuánto cambia el valor de las celdas en la dirección de la cuesta de mayor pendiente. HydroTools necesita una grilla de dirección de flujo previamente calculada con la función dirección de flujo (seleccionada en la ventana *Direction*) y una grilla ponderada (seleccionada en opciones de la ventana *Value*).

La grilla ponderada a utilizar para efectuar el cambio de flujo corresponde a una distribución mensual de precipitación en la cual se determinó la lluvia promedio de un día de agosto del año 2005. Para realizar la distribución de estas precipitaciones se utilizaron las isoyetas de 1.300 a 1.400 mm/año, por cuanto la ubicación del predio se encuentra contenida dentro de estas.

**3.2.3.2.4 Máximo flujo (*Flow Maximun*).** Esta función calcula los valores máximos de flujo ocurridos en las áreas río arriba de una captación (Figura 10b). Contraria a la función de Acumulación de Flujo, sólo los valores más altos son determinados y mantenidos para el resultado de la captación. Se escogió el método de cálculo de los valores máximos usando el algoritmo de flujo simple, D8 (Figura 11). Hydrotools necesita una grilla de dirección de flujo (seleccionada en ventana *Direction*) y una grilla ponderada (seleccionada en opciones de la ventana *Value*).

**3.2.3.2.5 Área de contribución (*Contributing Area*).** Esta función calcula el área de contribución de cada celda individual o área (Figura 10a). Hydrotools necesita una grilla de dirección de flujo y una grilla fuente, que especifica los puntos de partida del análisis (por ejemplo: las celdas que especifican las estaciones de aforo o áreas que especifican los ríos de valles). Todas las celdas en la grilla fuente (seleccionada en opciones de ventana *Source*) debe tener un número entero (puntos de control) o valores *No Data* (áreas no examinadas).

**3.2.3.2.6 Definición del área mínima.** Con el objeto de determinar la capacidad de subdivisión de subcuencas del predio Rucamanque, se confeccionó la estructura de las subcuencas con tres tamaños diferentes. Se utilizó un área mínima crítica de acuerdo al valor de unidad cartografiable mínima de 6,5 hectáreas empleada en el Catastro de Bosque Nativo (CONAMA, 1997). Para mayores superficies de subcuencas se utilizaron en forma arbitraria, un área mínima de 20 y 65 hectáreas. Se efectuó una división de cuencas con un área mínima de 6.5 ha., de donde se extrajo la información correspondiente a área, perímetro, longitud, altitud y factor de forma de las subcuencas, asociando los estadígrafos correspondientes a los datos registrados

**3.2.3.2.7 Designación de arroyos (*Stream Designation*).** Esta función caracteriza y numera las extensiones individuales de un sistema de ríos. Se logra examinando una grilla especial de arroyos con la ayuda de un RASTER de dirección de flujo. La grilla de arroyos consiste en

números enteros que caracterizan el sistema de ríos y valores de *No Data* que especifican las áreas restantes. Para realizar esta operación, Hydrotools necesita 3 tipos de datos: una grilla de arroyos (seleccionada en opciones de la ventana *Stream*), una grilla de dirección de flujo (seleccionada en opciones de la ventana *Direction*) y una especificación sobre el método de caracterización (seleccionada en opciones de la ventana *Method*; se eligió el Orden Strahler del arroyo, asignando la numeración del río encontrado según el método de Strahler).

### **3.2.4 Comparación y análisis de métodos: Levantamiento Topográfico, Fotointerpretación y MDE.**

Se realizó una comparación e intercepción de la red hídrica con los métodos empleados, interceptando el levantamiento de terreno con el modelado de la fotointerpretación y posteriormente con el modelado generado por el MDE, verificando el porcentaje de celdas coincidentes entre los métodos. El análisis se efectuó en dos tamaños de celda 5x5 y 10x10 m. (Kenny y Matthews, 2005).

### **3.2.5 Caracterización geomorfología de la cuenca hidrográfica.**

Se realizó una descripción geomorfológica según el criterio indicado por Pedraza (1996), efectuando mediciones básicas y generando la mayoría de las variables morfométricas utilizadas en los análisis morfométricos tradicionales de una cuenca, obteniendo los siguientes parámetros:

#### **3.2.5.1 Área de la cuenca**

El área de la cuenca,  $A$ , es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Esta se define como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. A fin de

obtener una evaluación precisa, se delimitó el área de la cuenca en función de la línea de contorno o de divorcio procediendo a calcularla empleando el programa ArcView 3.1, para lo cual se digitalizó la cuenca principal.

### 3.2.5.2 Longitud, perímetro de la cuenca.

La longitud de la cuenca,  $L$ , esta definida como la proyección horizontal de la distancia del cauce principal entre un punto aguas abajo y otro punto ubicado aguas arriba, donde la línea de tendencia general del cauce principal corte la línea de contorno o de divorcio de la cuenca. El perímetro de la cuenca,  $P$ , corresponde a la longitud de la línea de divorcio de la hoya hidrográfica.

### 3.2.5.3 Pendiente media del cauce principal

La pendiente del cauce influye directamente en la velocidad de flujo de agua y el arrastre de sedimentos en el lecho. Este parámetro corresponde al cociente entre la diferencia de cotas extremas del curso principal y la longitud de este.

$$j = 100 \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad (3.15)$$

Donde:

$j$  : Pendiente media del cauce (%).

$H_{\max}$  : Altitud máxima del cauce (m).

$H_{\min}$  : Altitud mínima del cauce (m).

$L$  : Longitud del cauce (m).



### 3.2.5.4 Pendiente media de la cuenca

La forma más directa de calcular la pendiente media de la cuenca es considerar la media ponderada de todas las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante, llegando a la siguiente expresión:

$$S = \frac{D \times L}{A} 100 \quad (3.16)$$

Donde:

- $S$  : Pendiente media de la cuenca (%).
- $D$  : Intervalo entre curvas de nivel.
- $L$  : Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca.
- $A$  : Área de la cuenca.

### 3.2.5.5 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius.

Para obtener la forma de la cuenca hidrográfica, se utilizó el índice de Gravelius, el cual crece con la irregularidad en la forma de la cuenca (Cuadro 2). Esta función permite determinar el coeficiente de compacidad de la cuenca, a partir de la siguiente relación:

$$K = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3.17)$$

Donde:

- $K$  : Coeficiente de Gravelius
- $P$  : Perímetro de la cuenca en  $\text{km}^2$ .
- $A$  : Superficie de la cuenca en  $\text{km}^2$ .

**Cuadro 2.** Coeficiente de Gravelius

<b>Coeficiente de Gravelius</b>	<b>Forma de la cuenca</b>
1,00 -1,25	Redonda
1,25 -1,50	Ovalada
1,50 – 1,75	Oblonga

Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este parámetro, describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. Así, dos cuencas que tengan la misma área, podrán tener respuestas hidrológicas completamente diferentes en función de su forma, ya que ésta condicionará el tiempo de concentración. Las cuencas redondeadas tienen tiempos de concentración cortos, con gastos pico muy fuertes y recesiones rápidas, mientras que las alargadas tienen gastos pico más atenuados y recesiones más prolongadas (Ortiz, 2004). Entendiendo por tiempo de concentración, el tiempo que demora la partícula de agua que cae en el punto mas alejado de la cuenca en llegar a la desembocadura.

#### **3.2.5.6 Curva hipsométrica.**

Esta curva representa el área drenada variando en función de la altura de la cuenca. También puede entenderse como la variación media del relieve de la hoya. La curva hipsométrica se construye trasladando, al eje de las abscisas, los valores en porcentaje de la superficie drenada, en función de una determinada cota altimétrica, la cual se grafica en el eje de las ordenadas.

#### **3.2.5.7 Altura media y mediana**

Para la obtención de estos indicadores, y con el objeto de estudiar con mayor detalle la distribución del relieve dentro de la cuenca, especialmente las denominadas altitudes centrales, se

utilizó la curva hipsométrica. Usando la misma clasificación que la empleada por Guerra y González (2002), las definiciones de estos parámetros, son las siguientes: La altitud mediana, corresponde a una cota que divide a la superficie de la cuenca en dos áreas iguales. La altura media,  $H$ , es la altitud promedio de la superficie de la cuenca.

### 3.2.5.8 Densidad de drenaje.

Está definida como la relación entre la longitud total a lo largo de todos los cursos de agua de la cuenca, en su proyección horizontal, con respecto a la superficie total de la hoya. La densidad de drenaje ( $D_i$ ), es otra propiedad fundamental de una cuenca, que controla la eficiencia del drenaje y señala el estado erosivo (Senciales, 1998), por cuanto en zonas de alta densidad la escorrentía recorre la superficie rápidamente, rebajando el tiempo de concentración e incrementando el pico de crecida, al haber menor infiltración.

$$D_i = \sum \frac{l_i}{A} \quad (3.18)$$

Donde:

$D_i$  : Densidad de drenaje en km/km<sup>2</sup>

$A$  : Área en km<sup>2</sup>

$l_i$  : Longitud de cada cauce en km

### 3.2.6 Cálculo de caudal para canales abiertos

#### 3.2.6.1 Cálculo de caudal

A pesar que el caudal, generalmente, es la variable más importante en los estudios hidrológicos de carácter cuantitativo (Chow *et al* ,1994), en este estudio no se registró directamente. En su lugar, los controles se limitaron a observar el nivel de agua con el objeto de constatar presencia de agua y registrando ancho y profundidad del cauce a fin de obtener el perímetro mojado y el área de la sección. Así, con los resultados obtenidos anteriormente, se procedió a evaluar el caudal de acuerdo a la fórmula:

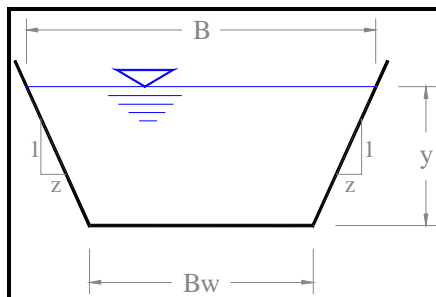
$$Q = A \times V \quad (3.25)$$

Donde

- $Q$  : Caudal en (m<sup>3</sup>/s).  
 $V$  : Velocidad del caudal (m/s).  
 $A$  : Área de la sección (m<sup>2</sup>).

#### 3.2.6.2 Funciones geométricas para elementos del canal.

Para efectuar los cálculos de caudal se determinó la función geométrica trapecio (Figura 13), por ser esta la que mejor representa al cauce natural de la quebrada principal del predio Rucamanque. Esta sección posee las siguientes características:



Fuente: Chow, Maidment, Mays(1994).

**Figura 13.** Forma geométrica adoptada para representación del lecho.

De la Figura 13 se visualiza:

$$\text{Área} \quad : \quad A = (B_w + zy)y \quad \text{ó} \quad A = \frac{(B + B_w)}{2} y \quad (3.22)$$

$$\text{Perímetro Mojado} : \quad P = B_w + 2y\sqrt{(1 + z^2)} \quad (3.23)$$

$$\text{Radio Hidráulico} : \quad R = \frac{(B_w + zy)y}{B_w + 2y\sqrt{(1 + z^2)}} \quad (3.24)$$

### 3.2.6.3 Cálculo de velocidad

El flujo en canales abiertos corre a través de un canal con una superficie libre, tal como la superficie en un arroyo, cuya velocidad se puede determinar a través de la llamada ecuación de Manning, citada por Chow *et al*, 1994:

$$V = \frac{R^{2/3} \times S_f^{1/2}}{n} \quad (3.19)$$

Donde:

$V$  : Velocidad del caudal (m/s)

- $R$  : Radio hidráulico (m).
- $S_f$  : Pendiente de fricción.
- $n$  : Coeficiente de rugosidad de Manning según Cuadro 3; para Rucamanque se utilizó coeficiente para árboles densos.

**Cuadro 3.** Coeficientes de rugosidad de Manning para varias superficies de canales abiertos

Material	Coeficiente de Rugosidad de Manning típico
Canales naturales	
Limpios y rectos	0,030
Limpios y curvos	0,040
Curvos con hierbas y piscinas	0,050
Con matorral y árboles	0,100
Planicies de inundación	
Pastos	0,035
Cultivos	0,040
Hierbas y pequeños matorrales	0,050
Matorrales densos	0,070
Árboles densos	0,100

Fuente: Chow, Maidment y Mays (1994).

La ecuación de Manning es válida para flujo completamente turbulento, para el cual el factor de fricción de Darcy-Weisbach ( $f$ ) es independiente del *Número de Reynolds* ( $R$ ); Herderson (1966), citado por Chow *et al* (1994), sugiere el siguiente criterio para flujo completamente turbulento, por tanto los valores de caudal se validaron con la siguiente ecuación:

$$n^6 \sqrt{RS_f} \geq 1,1 \times 10^{-13} \quad \text{Con } R \text{ en metros} \quad (3.20)$$

Para efectuar el modelado del caudal por punto registrado, éstos se calcularon en una planilla Excel usando las fórmulas y coeficientes indicados anteriormente para realizar una división en cuartiles (Cuadro 4) determinados a través del programa computacional SPSS, los cuales fueron

posteriormente representados en el perfil longitudinal de la quebrada principal mediante el programa AutoCAD 2000.

**Cuadro 4** División en cuartiles del caudal

Porcentaje del total del valor de caudal (%)	Rangos (ℓ/s)
P <sub>25</sub>	0 - 5
P <sub>50</sub>	5 - 11,13
P <sub>75</sub>	11.13 - 22,53

Para corroborar el cálculo realizado anteriormente se empleó el Método Racional a fin de determinar el valor tentativo del Caudal Total de salida de la cuenca, en el entendido que este método sólo entrega evaluaciones aproximadas, por cuanto supone que el coeficiente de escorrentía se mantiene constante, lo cual es estrictamente válido sólo para áreas impermeables. La fórmula y los parámetros de verificación empleados corresponden a:

$$Q = \frac{CiA}{3,6} \left[ \frac{m^3}{seg} \right] \quad (3.26)$$

Donde:

- C* : Coeficiente de escorrentía, se asumió 0,38 en función de los factores de relieve, infiltración, cobertura vegetal y almacenamiento superficial de la cuenca Rucamanque, según valores de tabla 3.702.503.B de MOP (2001).
- i* : Intensidad de lluvia, se utilizó un periodo de retorno de 10 años, según tabla 3.702.402.A de MOP (2001).
- A* : Área de la cuenca en km<sup>2</sup>

Con el fin de determinar el tiempo de concentración correspondiente a la cuenca, se utilizó la fórmula de California Culverts Practice, para cuencas de montaña, conforme a lo indicado en la tabla 3.702.501.A según MOP (2002):

$$T_c = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (3.27)$$

Donde:

$L$  : Longitud del cauce (km)

$H$  : Diferencia de nivel total entre cotas extremas de la cuenca (m)

Complementariamente a lo anterior, se aplicó la fórmula propuesta por Bell, indicada en 3.702.405 según MOP (2002).

$$P_t^T = (0.54t^{0.25} - 0.50)(0.2 \ln T + 0.52)P_1^{10} \quad (3.28)$$

Siendo:

$P_t^T$  : Precipitación (mm) con Período de Retorno T años y duración t minutos

$P_1^{10}$  : Precipitación (mm) con T=10 años y duración de 1 hora, según tabla 3.702.402.A

$\ln T$  : Logaritmo en base  $e$  del período de retorno

$t$  : Tiempo de concentración

Finalmente la intensidad a utilizar en la formula 3.26 queda dada por:

$$I_t^T \text{ [mm/h]} = \frac{P_t^T}{t/60} \quad (3.29)$$

Considerando que no existe información acerca de estimaciones de caudal para la cuenca emplazada en el predio Rucamanque, se optó por efectuar cálculos primarios por cuanto se contaba con datos que hacían posible estimar estos valores. Sin embargo, se hace presente que estos constituyen una información meramente referencial.



## **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

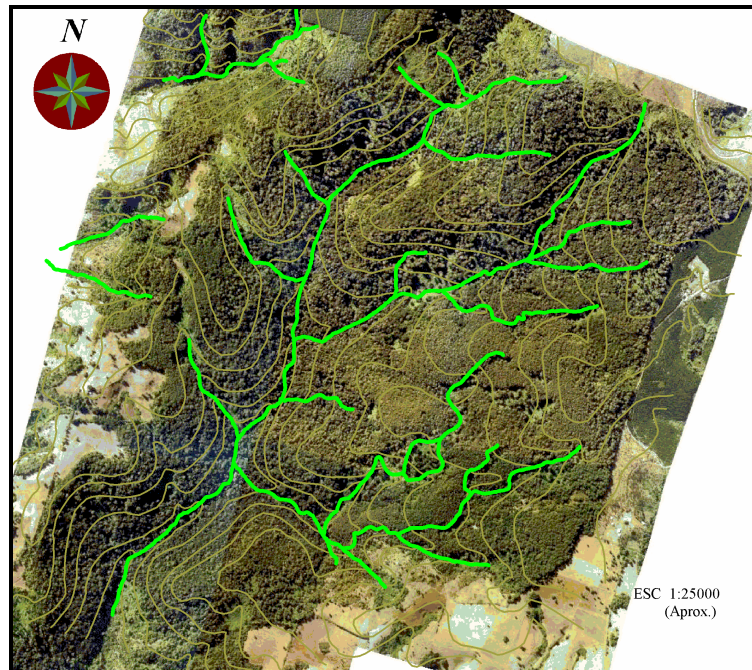
### **4.1 Recopilación y procesamiento de la información de terreno.**

#### **4.1.1 Análisis preliminar de la cartografía.**

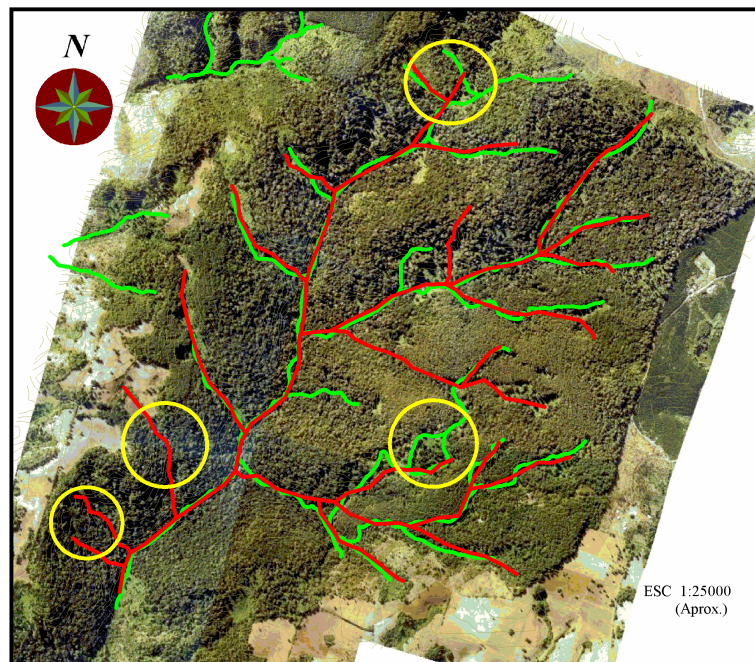
En el área de análisis existen tres microcuencas, a saber: Trabunco, Pichitemuco y Coilaco, con superficies individuales ascendentes a 1158,78 ha, 3172,70 ha y 1077,20 ha, respectivamente (Jara, 2001). Para el presente estudio, se determinó considerar sólo la microcuenca principal, Pichitemuco, toda vez que las microcuencas emplazadas en los extremos del predio, Trabunco y Coilaco, ejercen sólo una mínima influencia hidrológica, por cuanto sus afluentes desembocan en los predios contiguos y no son contribuyentes a la quebrada principal del predio, situación que puede observarse en la Figura 14, imponiéndose, además, un límite artificial equivalente a los límites del predio Rucamanque.

Al analizar toda la información existente, se advirtió que había inconsistencia entre el MDT, generado con curvas de nivel cada 25 m, el modelo fotogramétrico y la fotointerpretación digital de la red hídrica, situación que se aprecia en la Figura 14.

En consecuencia, y tal como se aprecia en la Figura 15, se determinó efectuar una nueva fotointerpretación y delimitación de quebradas, que fuera consistente con el MDT construido con curvas de nivel cada 10 m, por cuanto para efectuar los análisis posteriores se requería mejorar el MDE.



**Figura 14.** Red hídrica del predio Rucamanque con curvas de nivel cada 25 m.



**Figura 15.** Nueva fotointerpretación de la red hídrica del predio Rucamanque con curvas de nivel cada 10 m. Superposición de red hídrica existente.

El Cuadro 5 presenta una población de 21 quebradas, delimitadas en la nueva fotointerpretación, a las cuales se les midieron sus longitudes a fin de realizar el análisis del muestreo de lista a priori.

**Cuadro 5.** Población de 21 quebrabas de la red hidrológica del predio Rucamanque.

<b>Quebrada N°</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Longitud Acumulada (m)</b>
1	2534,2	2534,2
2	1684,3	4218,5
3	901,5	5120,0
4	1401,2	6521,2
5	219,7	6740,9
6	403,6	7144,5
7	246,8	7391,3
8	494,6	7885,9
9	326,9	8212,8
10	446,7	8659,5
11	301,8	8961,3
12	631,3	9592,6
13	687,0	10279,6
14	218,3	10497,9
15	566,8	11064,7
16	503,1	11567,8
17	207,3	11775,1
18	331,8	12106,9
19	470,8	12577,7
20	476,8	13054,5
21	230,6	13285,1

#### **4.1.2 Diseño de Muestreo.**

Con el objeto de determinar las quebradas a inventariar, se aplicó el muestreo de lista a priori, obteniendo, en forma aleatoria, las quebradas que son expuestas en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Quebradas seleccionadas a muestrear.

<b>Quebrada N°</b>	<b>Longitud (m)</b>
1	2534,2
2	1684,3
4	1401,2
5	219,7
8	494,6
13	687,0
18	331,8
<b>Total</b>	<b>7352,6</b>

El total de la población, según cartografía existente, posee una longitud acumulada de 13.285,1 m (Cuadro 7) con un 91,44% de error de estimación. Aplicando los estimadores del muestreo PPS, la estimación de la longitud total de las quebradas asciende a 14.227,43 m, con lo cual, el error de muestreo de la longitud de estas corresponde a un 17,33%, el que expresado en metros alcanza a un rango de variación de 2.465,4 m (Cuadro 8).

**Cuadro 7.** Parámetros Poblacionales según cartografía existente

<b>Parámetros Poblacionales</b>	<b>Población</b>
Y Longitud Total (m)	13285,10
Y media (m/quebrada)	632,62
Sy	578,47
Sy%	91,44

**Cuadro 8.** Calculo de estimación para la muestra de la población del muestreo de PPS

<b>Parámetros Poblacionales</b>	<b>Estimador</b>	<b>Población</b>
Media	1,07	14.227,43
Varianza	0,05	9116974
Desv. Estándar	0,23	3019,43
Coficiente variación (%)	21,22	21,22
E. Típico	0,19	2465,4
E Típico (%)	17,33	17,33

#### **4.1.3 Toma de datos en Terreno.**

En la toma de datos en terreno se controlaron 1118 puntos, correspondientes a las quebradas, sendero y camino corta fuego del predio Rucamanque (Cuadro 10), estos dos últimos casos, pertenecen a sectores que fueron medidos con el fin de ser utilizados posteriormente como amarres de georreferenciación de la red hídrica y de esta forma permitir su correcto emplazamiento con coordenadas (E, N, Z).

Las quebradas fueron nombradas en orden de detección en terreno y en orden de la toma de datos (Cuadro 9 y Anexo 4), denominándose Q-0 a la quebrada principal de Rucamanque, la cual, y de acuerdo al ID correlativo geográfico asignado automáticamente por el programa ArcView, es denominada quebrada N°1, por tanto, las quebradas denominadas arbitrariamente Q-1, Q-2, Q-3, Q-4, Q-5 y Q-6 corresponden, respectivamente, a las quebradas N° 18, 4, 13, 2, 8 y 5.

Cabe destacar que, en atención a las características topográficas y de densidad de cubierta vegetal del predio, se pudo concluir que no es posible realizar un levantamiento de este sector mediante la utilización de instrumental topográfico de mayor precisión, como estaciones totales o niveles automáticos, toda vez que para su materialización sería necesario realizar cortes de la espesura mediante roces programados en las respectivas quebradas, situación contraproducente, por cuanto se destruiría una parte importante del entorno a estudiar al estar afectando la cubierta de protección vegetal de las quebradas del relicto. Por lo tanto, el empleo de los equipos utilizados parece ser la mejor opción tomando los respectivos resguardos en cuanto a la nivelación del hipsómetro, horizontalidad o inclinación de la huincha de acuerdo a la pendiente registrada por el hipsómetro y la correspondiente colimación de la brújula; además, y conforme a lo mostrado por las fotografías aéreas, es posible determinar amarras físicas que sirven para cotejar los rumbos registrados en terreno y proceder a su correspondientes compensaciones de cierre en cota y coordenadas UTM.

**Cuadro 9** Resumen de puntos relevante del modelado del levantamiento de la red hídrica.

Quebrada	Coordenadas			Descripción Punto Red Hídrica	Longitud Hídrica	Total puntos controlados	Longitud Total Muestreo
	Este	Norte	Cota				
Q-0	708,496.1	5,717,509.7	191.5	Inicio	2,838.24	310	2,838.24
	709,846.4	5,719,522.8	396.3	Término			
Q-1	708,533.1	5,717,666.6	200.5	Inicio	221.07	42	221.07
	708,420.6	5,717,835.3	253.4	Término			
Q-2	708,945.4	5,717,950.8	232.4	Inicio	720.66	96	720.66
	709,533.4	5,717,793.1	325.2	Término			
Q-3	708,969.9	5,718,129.7	243.3	Inicio	375.09	60	375.09
	708,794.9	5,718,438.4	314.1	Término			
Q-4*	709,195.7	5,718,512.1	279.7	Inicio	1820.58	246	1910.11
	710,491.7	5,719,366.7	516.0	Término			
Q-5	709,227.6	5,718,698.9	297.9	Inicio	630.84	99	630.84
	708,907.5	5,719,169.8	398.3	Término			
Q-6*	709,748.7	5,719,390.6	384.4	Inicio	190.76	85	492.52
	709,636.4	5,719,521.6	440.4	Término			
Q-1-1	708,453.5	5,717,802.5	239.0	Inicio	38.84	6	38.84
	708,467.2	5,717,835.9	254.8	Término			

\* Quebradas Q-4 y Q-6, el muestreo total incluyó toma de datos hasta puntos de control, registrando una longitud mayor que la red hídrica detectada.

**Cuadro 10** Resumen de puntos relevantes del predio Rucamanque (Datum 69/Huso 18).

Descripción	Coordenadas			Observaciones
	Este	Norte	Cota	
Camino Cortafuego	710,714.0	5,719,347.1	554.1	Inicio
	710,494.5	5,719,448.6	540.2	Punto de amarre con Q-4
	710,166.1	5,719,649.6	509.6	Término
Estaca Cerco Forestal Mininco	709,513.3	5,719,704.7	504.1	Punto de amarre Q-6, esquina Norte-Oeste del Predio Rucamanque
Puente	708,507.2	5,717,610.7	197.10 - 197.90	Fondo canal y puente peatonal sur en Quebrada Principal
Puente	708,732.8	5,717,795.9	215.10 - 216.50	Fondo canal y Puente Peatonal Norte en Quebrada Principal
Portón	708,151.1	5,717,631.8	316.8	Portón Acceso a Predio Rucamanque

A modo de comprobar los supuestos del muestreo PPS, se verificó la correlación entre la variable auxiliar (Z), correspondiente al dato previo de longitud de las quebradas, la cual fue extraída de la fotointerpretación, y la variable descriptiva (Y) correspondiente a la longitud de las quebradas de la toma de datos en terreno; se realizó una regresión lineal, mediante el método de Mínimos Cuadrados, que arrojó un coeficiente de correlación  $R = 0,928$  y un  $R^2 = 0,860$ , parámetros que indican la existencia de una alta correlación entre las variables.

#### 4.1.4 Compensación de errores de cierre.

Tal como se indicó en la metodología, la compensación de errores de cierre se realizó distribuyendo éstos, proporcionalmente entre los distintos puntos de acuerdo a su camino recorrido desde el origen.

En primer lugar, y considerando que se contaba con datos georreferenciados correspondientes al portón de acceso al predio, se procedió a compensar el sendero emplazado en el sector sur poniente con la intención de ser empleado posteriormente como línea estructural base para el cálculo del inicio de la poligonal de la quebrada principal; dicho sendero se desarrolla en una longitud total de 2457,56 m y en su levantamiento se acusó un error de cierre ascendente a 5,91 m, cuyas proyecciones ortogonales y errores de cierre equivalen a:

Norte:  $eN = -0,80$  m, en una proyección ortogonal recorrida  $\Delta N = 1.642,03$  m.

Este:  $eE = -5,86$  m, en una proyección ortogonal recorrida  $\Delta E = 1.523,97$  m.

Como la corrección se efectúa con signo inverso al error obtenido, lo anterior significó efectuar una corrección ascendente a:

Norte:  $+ 0.000487$  m/m

Este:  $+ 0.003842$  m/m



Vale decir, se corrigió dicha cantidad por cada metro de camino recorrido en la proyección ortogonal correspondiente, destacando que el bajo error de cierre obtenido de 0,24% en relación a la distancia total recorrida, le otorga la validez necesaria a la medición, por cuanto la precisión obtenida permite inferir que para cualquier punto de la poligonal, su valor real tendrá una dispersión máxima igual al error total registrado, o error de cierre, siendo su valor mas probable el correspondiente al valor del punto corregido de acuerdo a la compensación efectuada, y considerando además, que en el caso mas desfavorable, la máxima dispersión no alterará los requerimientos de precisión para la ejecución de este modelo hidrológico.

Como ya se indicó anteriormente, con los datos compensados del sendero se realizó, a partir de su inicio, el cálculo de coordenadas de la quebrada principal, la cual se encuentra en su término ligada a la Quebrada N° 6, que a su vez se amarra con un punto conocido emplazado al final de la misma. Así, el error de cierre, para este caso, alcanzo a un 1,89% el cual fue compensado, al igual que en los casos anteriores, en forma proporcional a su recorrido.

Con los datos de la quebrada principal, se procedió a dar coordenadas a los puntos de confluencia de cada una de las quebradas secundarias, obteniendo los errores de cierre que se muestran en el Cuadro 11.

Se estima que los errores de cierre antes indicados no son producto de una fuente única, sino de diversos tipos de errores, entre los cuales se pueden indicar los errores en la toma de datos en terreno, los de anotación, lectura y entrenamiento del equipo, errores instrumentales, entendiéndose por tales la verificación de colimaciones de los equipos utilizados, calibraciones de huinchas y jalones, además de los errores propios de la fotointerpretación asociados a errores contenidos en la ortofoto; así por tanto, el error final corresponde a la sumatoria de los errores antes mencionados. Sin embargo, y de acuerdo a los errores porcentuales registrados, se puede asegurar que, para el nivel de precisión que requiere este tipo de levantamientos, no es influyente si la quebrada se encuentra con un emplazamiento errado en los porcentajes antes indicados, que en la

práctica, y salvo ocasiones excepcionales, sólo alcanzan a valores máximos iguales a la mitad de dicho error.

**Cuadro 11.** Resumen de errores de cierre por quebrada registrada.

<b>Quebrada N°</b>	<b>Error de cierre, referido al camino recorrido</b>	<b>Longitud Camino Recorrido (m)</b>	<b>Observación</b>
Q-1	Sin Cierre	221.07	
Q-1-1	Sin Cierre	38.84	
Q-2	Sin Cierre	720.66	
Q-3	3.72%	374.15	
Q-4	4.07%	1910.11	
Q-5	2.99%	630.84	
Q-6	1.89%	2659.83	Incluido en tramo de Q-0

#### **4.1.5 Confección de superficies de quebradas.**

Con los datos obtenidos del buffer, se consiguió obtener las superficies individuales y totales de los cursos de agua emplazados en el fondo de las quebradas (Anexo 6), así como también la forma que este curso adquiere en su recorrido por el predio, de igual forma se observa el comportamiento de la red hídrica en su recorrido por la quebrada. Así, con las variaciones de los anchos, es posible inferir los aumentos y/o disminuciones de velocidad del agua en el entendido que esta se encuentra en directa relación con las variaciones de sección asociada a las variaciones de pendiente del lecho.

#### **4.1.6 Análisis Espacial del levantamiento de red hídrica.**

Conociendo los niveles de veracidad de la fotointerpretación de las fotografías aéreas, se considera que el levantamiento en terreno permite corroborar la información existente, obteniendo una mayor cantidad y mejor calidad de datos, con lo que se logra una mayor exactitud

en la localización de las quebradas (Anexos 4 y 6). Por lo tanto, a partir de esta consideración se empleó esta metodología como línea de base, comparándola con la fotointerpretación existente de las quebradas, en el marco de la presencia, exactitud de la localización y longitud de la red hídrica.

#### **4.1.7 Perfiles longitudinales.**

Coincidentemente con lo planteado por Felicísimo (1994), la generación de perfiles es imprescindible para solucionar el problema de la intervisibilidad, pendiente y desarrollo del cauce.

En las Figuras 16 a 19, se visualiza, una fuerte discrepancia entre la cota obtenida en terreno y la entregada por el MDE; esta diferencia tiene como origen, principalmente, la forma de terrazas regulares que adoptan los MDE al observarlos transversalmente. Lo anterior se origina por la introducción de datos auxiliares, en este caso las curvas de nivel (Felicísimo, 1994), que habitualmente se descomponen en puntos acotados, previa reducción de la densidad de vértices de las líneas.

#### **4.1.8 Evaluación y comportamiento del MDE.**

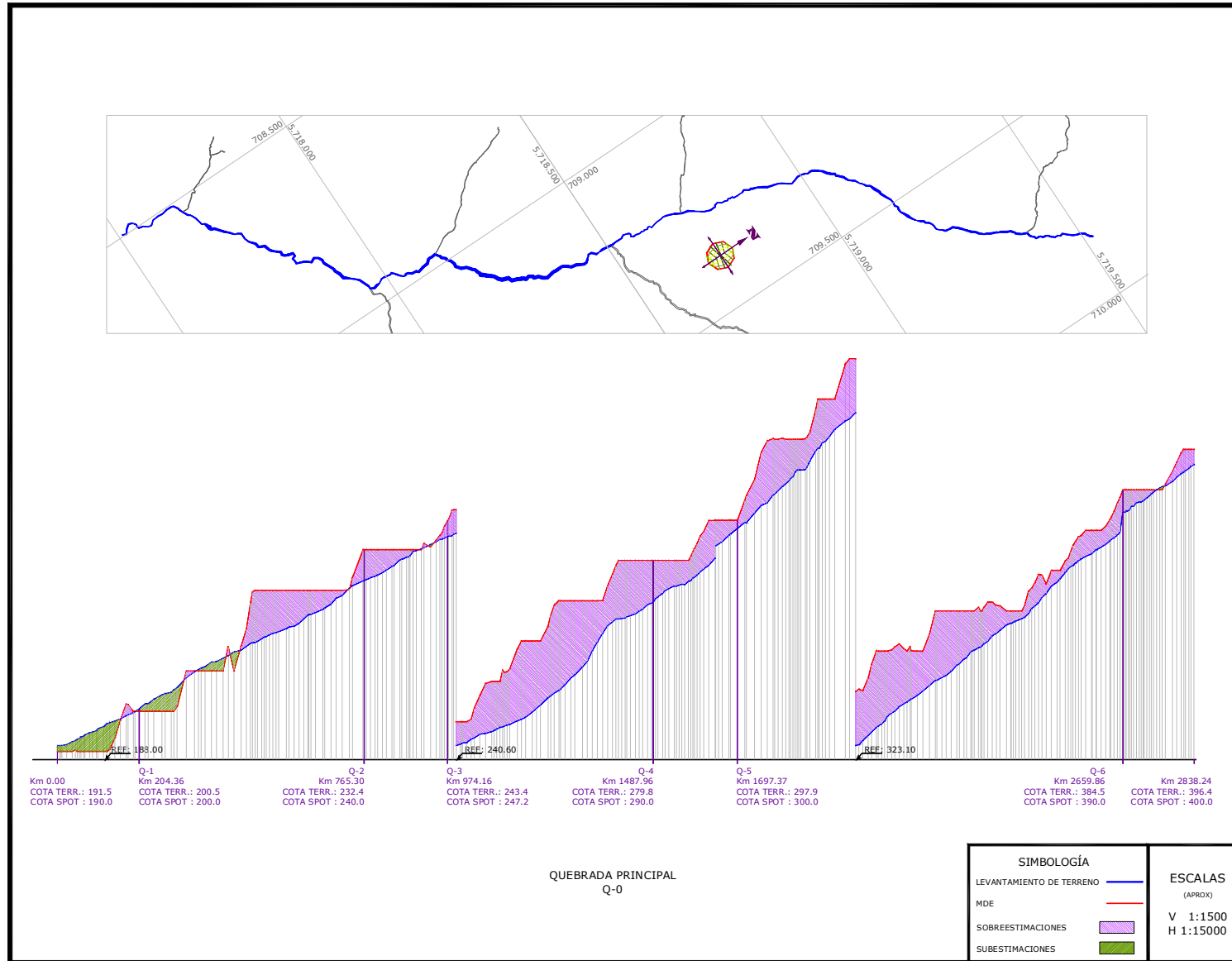
El levantamiento de terreno se comparó con el MDE, desde la cota de inicio de la quebrada hasta la cota final, obtenidas del MDE, corrigiendo las cotas parciales de todos los puntos del levantamiento mediante el método del camino recorrido. Todas las quebradas fueron evaluadas analizando el comportamiento de la variable altitud mediante los estadígrafos ECM y DA.

Como se indica en el Cuadro 12, el ECM del modelo MDE es aceptable en términos de promedios, por cuanto todos sus valores son inferiores a un 10% y el DA se encuentra en el rango

aceptable, destacando que la mayoría de los signos del DA son negativos por lo que el MDE, de acuerdo a lo indicado por Prodan *et al* (1997), se encuentra sobreestimado, situación que se puede ratificar observando los perfiles longitudinales que se encuentran esquematizados en las Figuras 16 a 19, en los cuales se aprecia claramente que el modelo digital esta en la mayor parte sobre el levantamiento de terreno. La excepción se produce en la quebrada N° 6 mostrada en la Figura 19 donde gran parte del MDE se encuentra por debajo del levantamiento de terreno, lo que es corroborado con el DA que evidencia signo positivo.

**Cuadro 12.** Parámetros estadísticos para diferencias de cotas entre MDE y levantamiento en terreno a nivel de quebrada.

<b>Quebrada</b>	<b>Promedio</b>	<b>Residual</b>	<b>Absoluto</b>	<b>N</b>	<b>ECM%</b>	<b>DA%</b>
Q-0	287,9	-2111,7	26075,5	310	3,19	-2,4
Q-1	224,5	-190,4	1827,4	42	2,94	-2,0
Q-1-1	247,4	-9,2	21,1	7	0,70	-0,5
Q-2	275,5	-907,1	9331,4	96	3,58	-3,4
Q-3	282,8	-323,6	2252,0	60	2,17	-1,9
Q-4	378,7	-607,4	21289,2	246	2,46	-0,7
Q-5	352,6	-368,6	2680,6	99	1,48	-1,1
Q-6	439,7	213,7	2453,1	83	1,24	0,6



**Figura 16 :** Perfil longitudinal comparativo Terreno – MDE Quebrada Principal

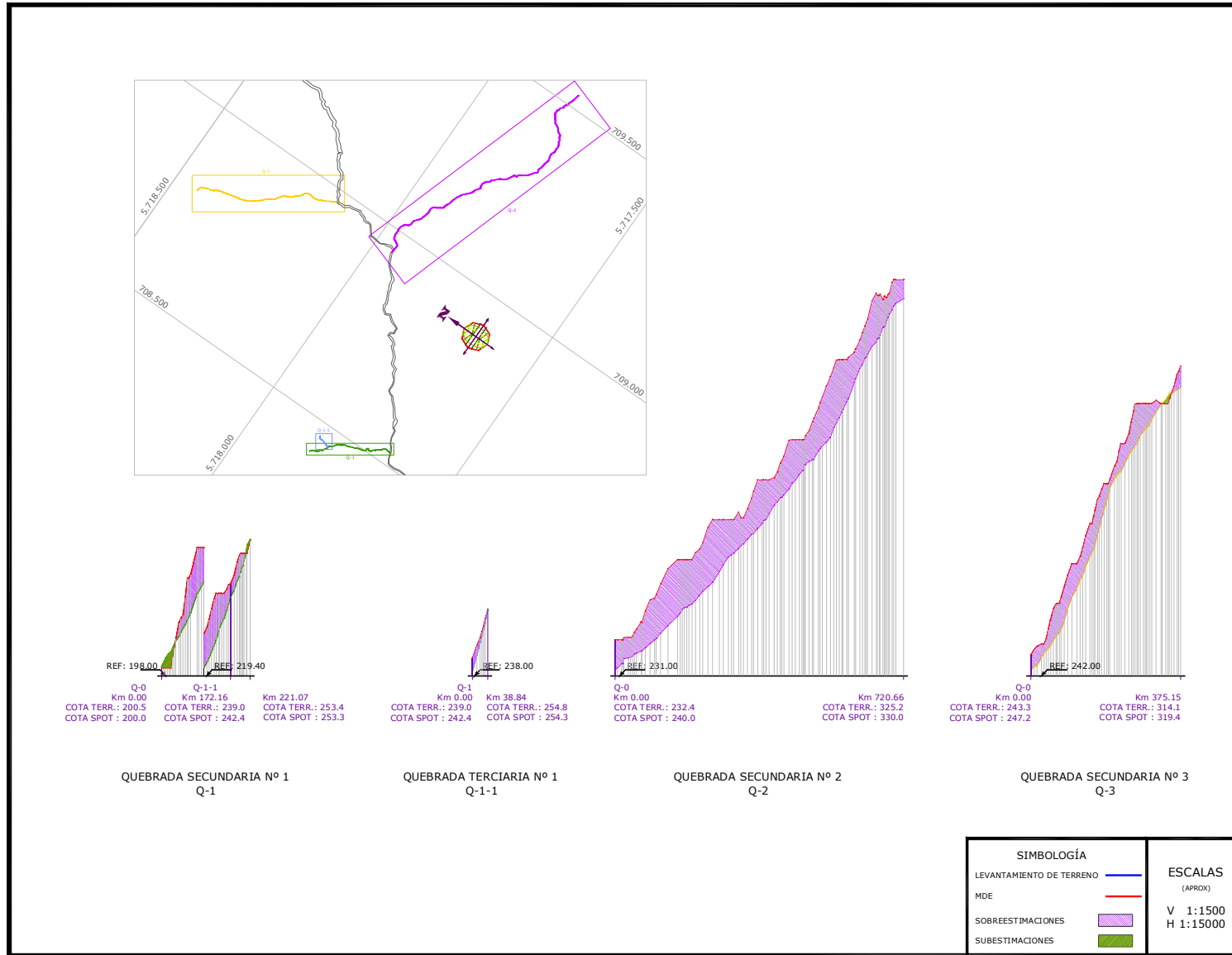


Figura 17 : Perfil longitudinal comparativo Terreno – MDE, Quebradas N° 1, 2 , 3 y 1-1

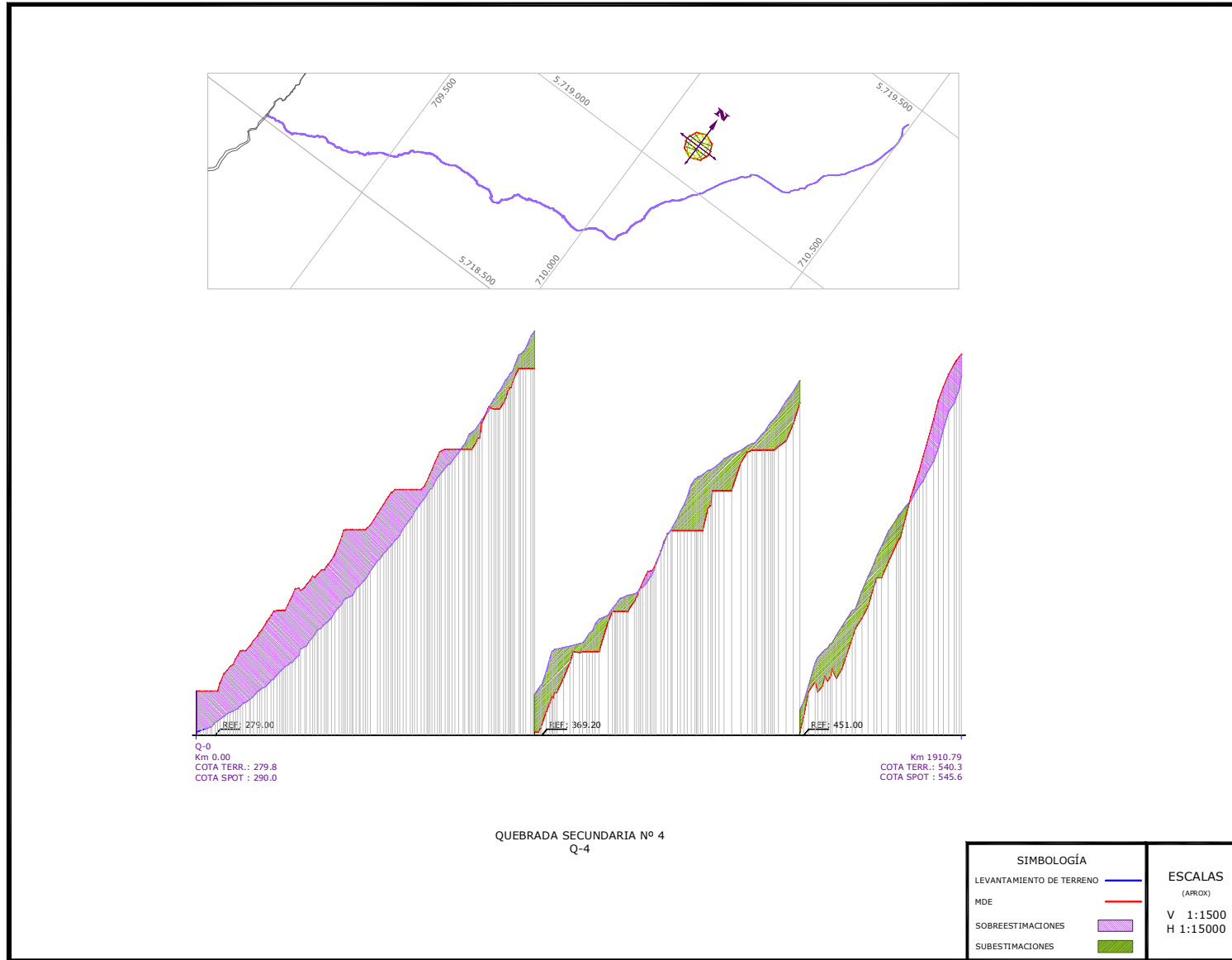


Figura 18 : Perfil longitudinal comparativo Terreno – MDE, Quebrada N° 4

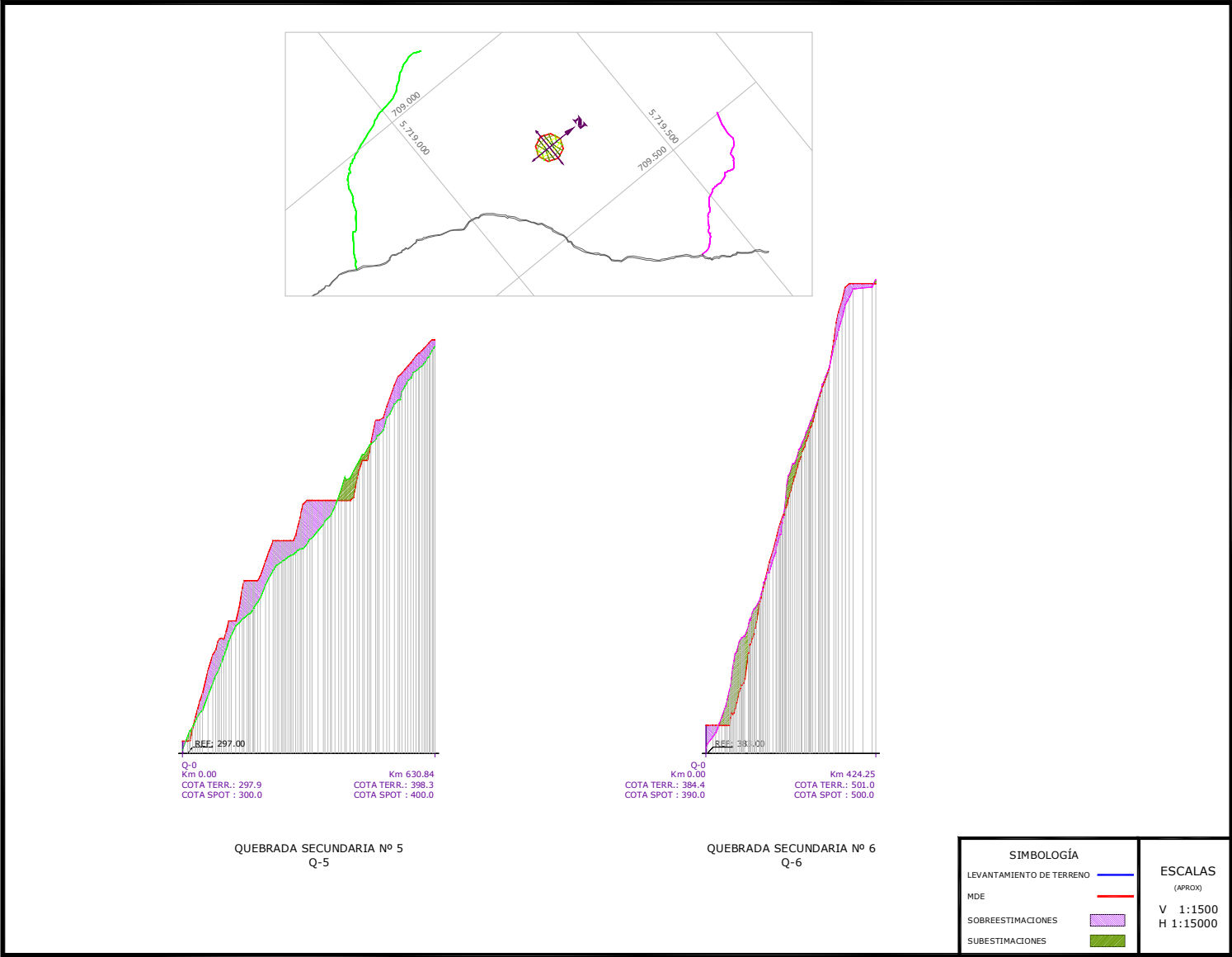
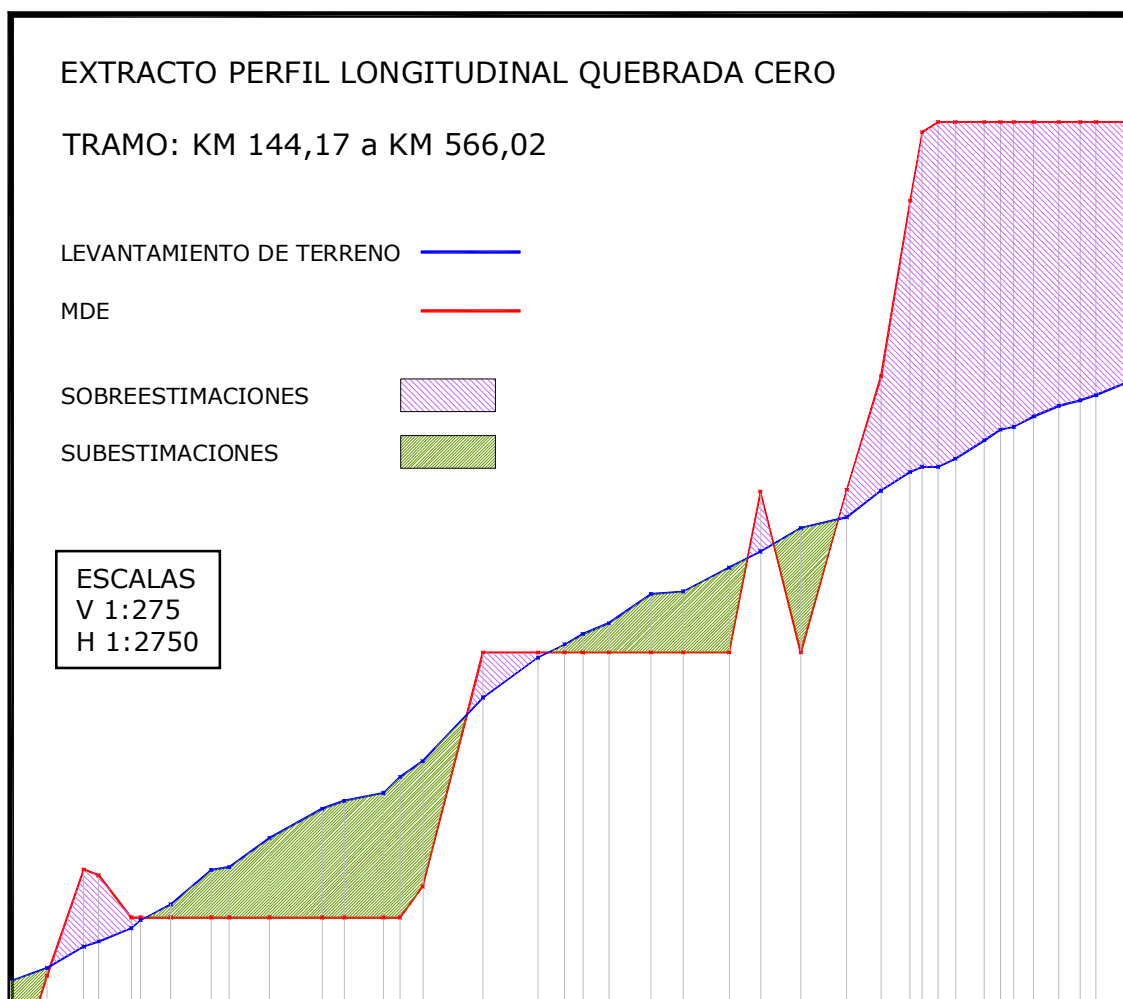


Figura 19: Perfil longitudinal comparativo Terreno – MDE, Quebradas No 5 y No 6



Además, se pueden advertir zonas que registran zigzagueos abruptos en forma de pico ocasionados cuando la quebrada toca a la siguiente curva de nivel (Felicísimo, 1994), para luego retornar a la misma, situaciones que no existen en la realidad observada en terreno, generando así un desfase entre la ubicación real y la registrada en el MDE. En cambio, el levantamiento en terreno refleja la sinuosidad de la superficie de la red hídrica, eliminando la forma aterrazada mostrada por el MDE, siendo esta forma concordante con la realidad observada y por ende se asume el levantamiento de terreno como la representación adecuada (Figura 20).



**Figura 20** Detalle de Perfil Longitudinal

## 4.2 Procesamiento del Modelo Digital de Terreno.

### 4.2.1 Comparación de Modelos Digitales de Terreno con curvas de nivel equidistantes cada 10 y 25 m.

Se efectuaron dos análisis de estructuras vectoriales de tipo TIN (*triangulated irregular network*) en curvas de nivel equidistantes cada 10 y 25 metros, con 39 y 4 puntos acotados respectivamente, a objeto de determinar cual de estas dos cubiertas era la distribución óptima para ser empleada como base en la ejecución de la estructura RASTER, la que finalmente modelará al MDE del predio en estudio. Cabe destacar que dichos análisis se efectuaron en función de los parámetros de exposición (Cuadro 15), pendiente (Cuadro 16) y altitud (Cuadro 17).

El Cuadro 13, muestra la existencia de diferencias entre ambas estructuras; en el caso de la pendiente esta alcanza un 6,7%, lo que representa una diferencia de altitud entre ellas de 10 m. Se estima que las diferencias se deberían al tamaño que genera la triangulación, a menor distancia entre las curvas de nivel, menor es el tamaño de los triángulos, por ende, esta más cercano a la sinuosidad de la superficie terrestre y por lo tanto los valores representan de mejor forma la topografía real del terreno. Asimismo, y tal como se observa en el Cuadro 14, en el caso de exposición, ambos TIN muestran la misma predominancia en exposición modal.

**Cuadro 13** Valores promedios ponderados para los factores topográficos.

Factor Topográfico	Pendiente (%)		Altitud (m)	
	TIN-10	TIN-25	TIN-10	TIN-25
Media	33,3	26,6	384,3	374,4

**Cuadro 14** Valor modal del factor topográfico de exposición

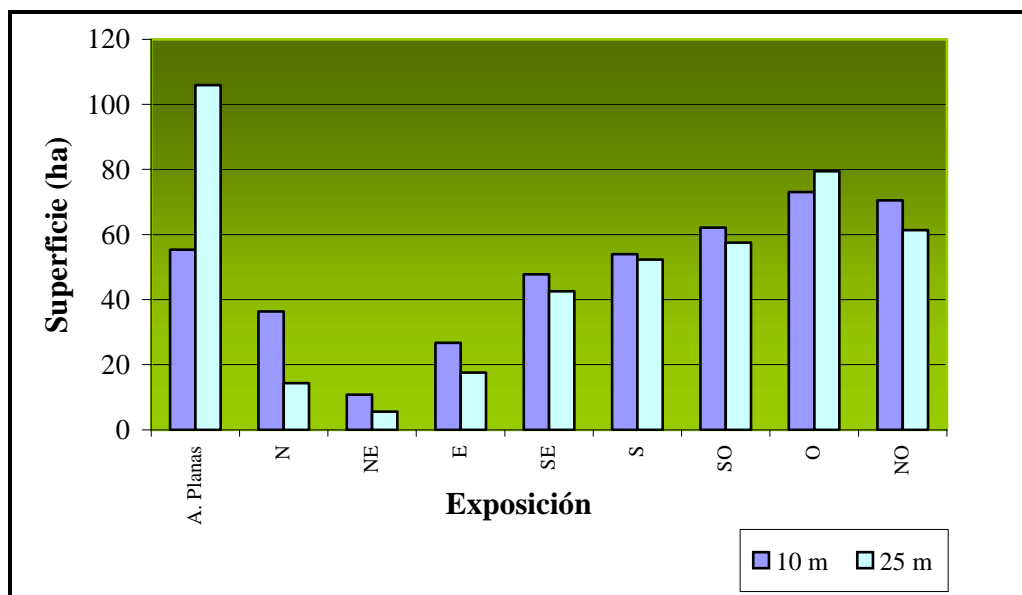
Factor Topográfico	Exposición	
	TIN 10	TIN 25
Exposición modal	NO - O	NO - O

#### 4.2.1.1 Análisis de Resumen de Superficies por rangos.

El Análisis del Factor Topográfico de Exposición, mostrado en el Cuadro 15, indica que para la estructura TIN-25, con curvas de nivel equidistantes a 25 m, la superficie plana alcanza a 105,9 ha, equivalente a un 24% del área total del predio, mientras que para el caso de la estructura TIN-10 con curvas de nivel equidistantes cada 10 m, esta superficie asciende a un 13% del área total; 55,3 ha; de lo anterior se puede inferir que en este último caso existe una disminución de las áreas planas ascendente a un 52,2% de lo observado con curvas de nivel cada 25 m. Coincidentemente, para ambos procesos analizados, el menor porcentaje de superficie de exposición se encuentra en las direcciones N, NE y E. Para el caso de curvas de nivel cada 10 m, estas superficies alcanzan valores de 8, 2 y 6% respectivamente, en lo que respecta a las curvas de nivel cada 25 m., estos ascienden a 3, 1 y 4% respectivamente. Cabe destacar, que la menor superficie de exposición del predio se encuentra en orientación NE, observando que para esta última se presenta una diferencia entre ambas estructuras TIN de un 50%. En las otras exposiciones, como se puede apreciar en el Cuadro 15, no se observan diferencias significativas entre ambas curvas. La representación gráfica de los valores anteriormente analizados se muestran en la Figura 21.

**Cuadro 15.** Resumen de superficie (ha) por rangos de Exposición.

Rango de exposición	TIN curvas de nivel	
	10 m	25 m
Áreas planas	55,3	105,9
N	36,3	14,4
NE	10,8	5,6
E	26,7	17,6
SE	47,8	42,6
S	54,0	52,2
SO	62,1	57,5
O	73,1	79,5
NO	70,5	61,3
Total superficie (ha)	436,6	436,6



**Figura 21.** Gráfico de superficie (ha) por rangos de Exposición.

En la Figura 21 se observa que, en general, todas las categorías del MDT-10, exceptuando la áreas planas y exposición oeste, son superiores a las mostradas por el MDT-25. Esto se produjo al incluir, para el MDT-10, 39 puntos acotados, permitiendo reclasificar zonas a otras categorías y ocasionando una disminución de las zonas planas. Cabe destacar, que los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales adosados al terreno, formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle en función de la complejidad del relieve (Felicísimo, 1994), por lo tanto, a menor distancia entre curvas de nivel se obtiene una mayor exactitud del relieve.

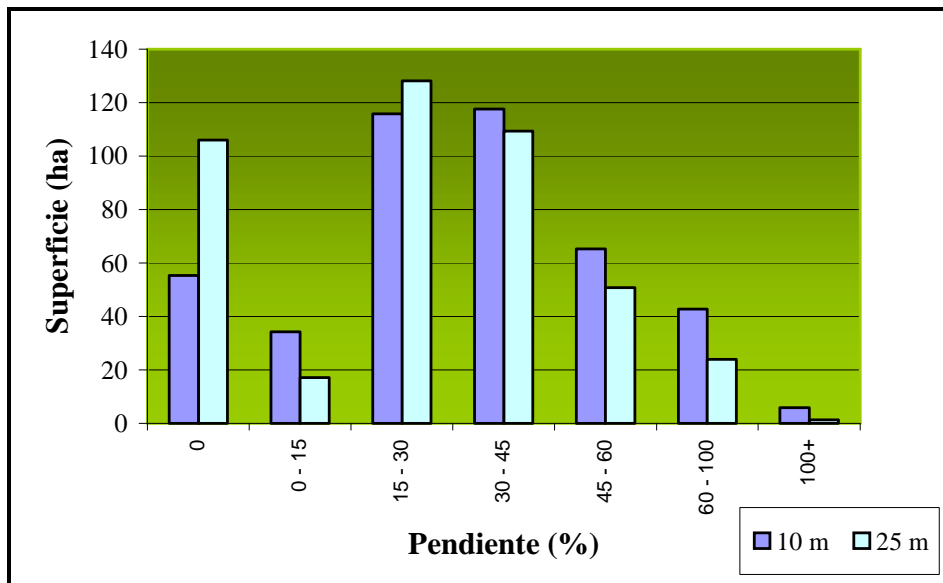
Conforme a la legislación vigente en nuestro país (D.L. N° 701 de 1974), la tramificación de pendientes, para el análisis del predio, se realizó en intervalos de 15%. Así, del Cuadro 16 se observa que para ambas estructuras TIN, el mayor porcentaje, con respecto a la superficie total del predio, se emplaza entre las pendientes 15 a 45%, con extensiones similares para ambos procesos, obteniendo para la estructura TIN-10 una superficie de 233,2 ha y para la estructura TIN-25 un área de 237,2 ha., equivalentes aproximadamente a 54% de la superficie total. Para el caso de pendientes iguales a cero, en la red TIN-10 se genera una superficie de alrededor de 13%

del área total y en la red TIN-25 este valor asciende a 24%, donde físicamente la diferencia entre estas estructuras TIN bordea las 50 hectáreas, vale decir casi 100% de la superficie mostrada en la red TIN-10. Con respecto al rango de pendientes comprendidas entre 0 y 15 %, la estructura TIN-10 posee una superficie de 8% y para el caso del TIN-25 la superficie asciende a 4%, en ambos casos referidos al área total; de igual forma, en el rango de pendientes entre 45 y 60 %, no se produce una diferencia significativa, mientras que para el caso del rango comprendido entre 60 a 100 % de pendiente, la estructura TIN-10 presenta un 10% de la superficie versus un 5% mostrado en la estructura TIN-25. Para el caso de pendientes mayores a 100%, la estructura TIN-10 presenta una superficie cuatro veces mayor que la mostrada por la estructura TIN-25. En Figura 22, se visualiza la comparación de resultados entre ambas estructuras TIN.

**Cuadro 16.** Resumen de superficie (ha) por rangos de Pendiente.

<b>Rango de Pendiente (%)</b>	<b>TIN curvas de nivel</b>	
	<b>10 m</b>	<b>25 m</b>
0	55,3	105,9
0 - 15	34,3	17,2
15 - 30	115,7	128,0
30 - 45	117,5	109,2
45 - 60	65,2	50,8
60 - 100	42,7	24,0
100 +	5,9	1,4
<b>Total superficie (ha)</b>	<b>436,6</b>	<b>436,6</b>

Del gráfico mostrado en la Figura 22, se visualiza, para el caso de la estructura TIN-25, una notoria mayor superficie en las zonas de pendiente cero, por cuanto al estar constituida con curvas de nivel equidistantes cada 25 metros, abarca superficies mayores que las de una estructura TIN-10, conformada por curvas de nivel equidistantes cada 10 metros. A esto se agrega un incremento de la superficie por los cambios en la dirección de la curva, cada vez que esta intenta retornar sobre si misma no se produce triangulación y por ende el programa asume un área plana. Así mismo, es posible observar que en los rangos de pendiente superior a 30%, la estructura TIN-10 muestra siempre una mayor superficie.



**Figura 22.** Gráfico de superficie (ha) por rangos de Pendiente.

Coincidentemente con lo detectado en este estudio, Ruiz (1998) define la línea de cambio de pendiente como la intercepción de dos cuestas, tomando como supuesto que la línea de cambio de pendiente es oblicua, donde las líneas de mayor cota envuelven a las de cota menor, si se unen dos puntos de la misma curva la recta es exterior al terreno y la intercepción es entrante, adoptando diferentes formas como vaguadas o zonas planas, esto se ve reflejado cuando las aguas que caen en los puntos de una misma cota fluyen hacia la línea de cambio de pendiente continuando su flujo.

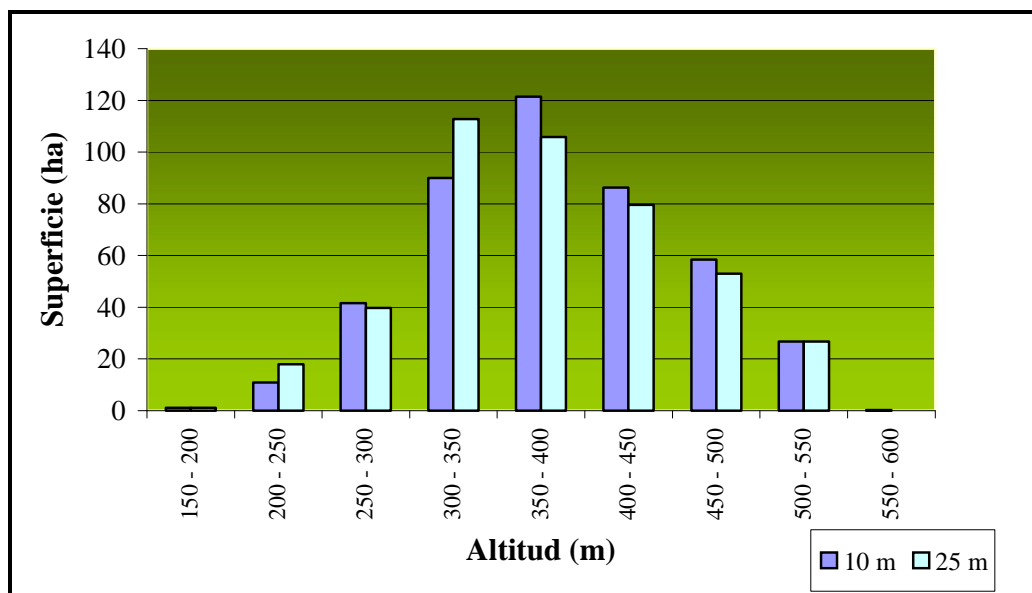
Del análisis de superficies por rango de altitud (Cuadro 17), se desprende que la mayor concentración de superficie predial se encuentra en el rango de altitud comprendido entre 300 y 450 metros, siendo coincidente en ambas estructuras TIN, con un valor de 68% de la superficie total para ambos casos. Adicionalmente, se observa que no existen diferencias significativas en los rangos de cotas menores a 300 m, así como tampoco se producen fuertes diferencias en el rango de 450 a 550 metros. Sin embargo, para el rango de cotas por sobre 550 m, sólo se observan resultados producto de la generación de la red de triángulos irregulares procedentes de las curvas de nivel equidistantes a 10 m, en donde se muestra una superficie ascendente a 0,22 hectáreas, destacando que la estructura TIN-25 no muestra superficie para este rango de cotas.

**Cuadro 17** Resumen de superficie (ha) por rangos de Altitud.

<b>Rango de Altitud (m)</b>	<b>TIN curvas de nivel</b>	
	<b>10 m</b>	<b>25 m</b>
150 - 200	1,03	1,0
200 - 250	10,96	17,9
250 - 300	41,56	39,7
300 - 350	89,97	112,8
350 - 400	121,37	105,8
400 - 450	86,34	79,7
450 - 500	58,48	53,0
500 - 550	26,73	26,8
550 - 600	0,22	0
<b>Total superficie (ha)</b>	<b>436,6</b>	<b>436,6</b>

Por lo anterior, y considerando que la generación de áreas planas corresponde a un error o deficiencia originada en el modelo vectorial, producto de la diferencia de cota entre las curvas de nivel equidistantes, situación incrementada proporcionalmente con el aumento de dicha diferencia de cotas, la elección de la estructura TIN-10, a emplear en el presente estudio, se basa principalmente por la gran disminución de las áreas planas que esta estructura presenta, por cuanto la minimización de esta anomalía es de significativa importancia para el posterior análisis del predio mediante el empleo del software Hydrotools, a desarrollarse en ambiente ArcView.

El parámetro altitud, mostrado en la Figura 23, no presenta grandes diferencias de superficie entre un TIN y otro, exceptuando entre el rango de 300 a 350 m, apreciándose claramente que en este rango la estructura TIN-25 es superior en superficie; a su vez, en el tramo de 350 a 400 m, la situación es a la inversa, siendo esta vez la red TIN-10 la que presenta abiertamente una mayor extensión. Sin embargo, y como se mencionó en el análisis de Cuadro 17, la sumatoria de las superficies entre ambos rangos (300-400) arroja un resultado equivalente. En el resto de los categorías se puede apreciar que la red TIN-10 muestra una leve superioridad en superficie con respecto a la estructura TIN-25. Sin embargo, cabe señalar, que dichas diferencias en altitud son meramente accidentales y no guardan ninguna relevancia, por cuanto si las curvas de nivel fueran múltiplo exacto de 10, vale decir 20 o 30 y no así 25 metros, los resultados serían iguales.



**Figura 23.** Gráfico de superficie (ha) por rangos de Altitud.

#### 4.2.1.2 Descripción de análisis estadístico de las estructuras vectoriales TIN.

Los resultados de las dójimas aplicadas a las estructuras vectoriales, se muestran en el Cuadro 18 observándose los parámetros de evaluación de normalidad, correspondientes a la media de la estructura vectorial y a su respectiva desviación estándar, arrojando como resultado que los factores topográficos, procesados con la prueba de análisis, cuentan con la normalidad requerida, por cuanto el valor de la Significancia (K-S) es muy superior al mínimo establecido en todos los casos analizados.

**Cuadro 18** Resumen de análisis estadísticos de la prueba de normalidad, Kolmogorov – Smirnov, para TIN-10 y TIN-25, expresado en superficie (ha).

Factor Topográfico / Parámetros	Exposición		Pendiente		Altitud	
	TIN-10	TIN-25	TIN-10	TIN-25	TIN-10	TIN-25
Media	48,51	48,50	62,37	62,36	48,51	54,56
Desviación estándar	20,61	32,61	41,44	51,26	43,41	41,13
Significancia* (K-S)	0,975	0,973	0,967	0,85	0,994	0,997

\*significativo al 95% de confiabilidad.



Del Cuadro 19, se desprende que el factor que presenta una mayor confiabilidad corresponde al parámetro altitud, toda vez que su intervalo de confianza es el de menor amplitud a pesar de contar con un valor de significancia levemente inferior a los demás parámetros analizados. Como contrapartida, y no obstante contar con el nivel de significancia más alto, se advierte que el parámetro pendiente muestra el intervalo de confianza de mayor amplitud.

**Cuadro 19** Resumen de análisis estadísticos de la prueba “t” para pares simples, TIN-10 y TIN-25, expresado en diferencias de superficie (ha).

TIN-10 – TIN-25	Diferencia	Intervalo de Confianza		Significancia
		Inferior	Superior	
Exposición	0,0103	-15,6678	15,6884	0,999
Pendiente	0,0132	-22,7850	22,8114	0,999
Altitud	-0,0162	-9,4394	9,4070	0,997

Después del análisis estadístico realizado a ambas redes TIN se determinó que la estructura vectorial que presenta mayor exactitud para ser transformada a una estructura matricial RASTER, es la red de triángulos irregulares realizada con curvas de nivel equidistantes cada 10 metros, vale decir TIN-10.

#### **4.2.2 Análisis de estructuras matriciales versus estructura vectorial.**

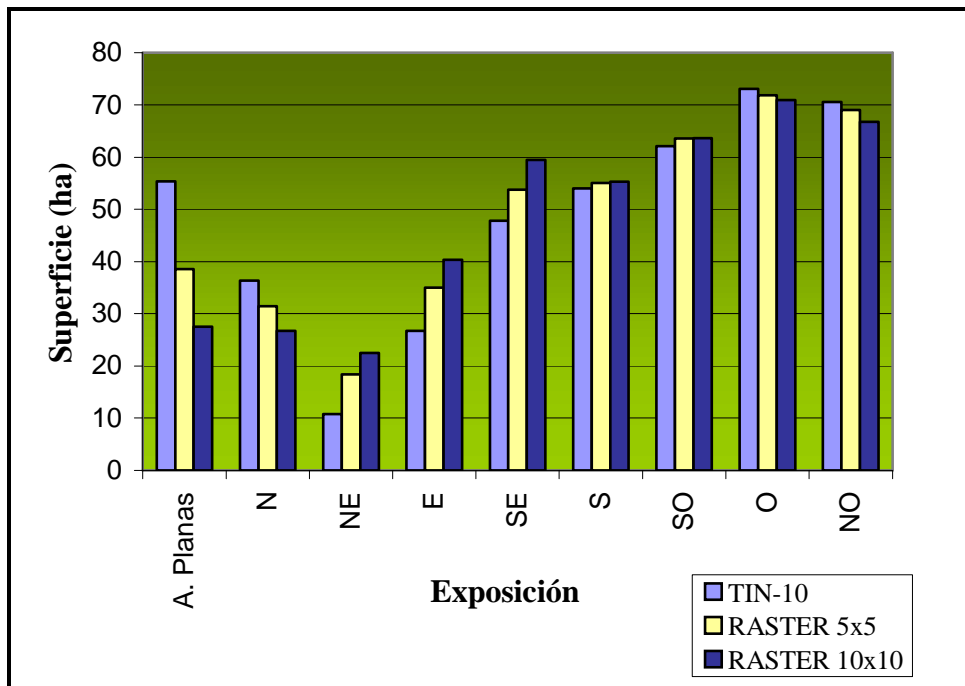
##### **4.2.2.1 Comparación de superficies de estructura matricial RASTER versus estructura vectorial TIN-10.**

Con la estructura vectorial TIN determinada anteriormente, se procedió a generar la estructura RASTER, consistente en una matriz regular conformada por un malla de celda cuadrada, para lo cual se analizaron dos diferentes tamaños de mallas, una grilla de 5x5 m y otra de 10x10 metros, las que posteriormente fueron comparadas con la estructura vectorial TIN-10 .

Del Cuadro 20, se desprende que la estructura RASTER 5x5 m tiene mayor similitud con la red TIN-10, toda vez que la superficie total de discrepancia toma en el RASTER 5 un menor valor, ascendente a 48.6 ha, equivalentes a 11.1% del total de la superficie predial de Rucamanque; para el caso del la estructura RASTER 10x10, la discrepancia asciende a 19.1% de la superficie total del predio. Cabe señalar, además, que todas las diferencias absolutas, por cuanto estas corresponden a superficies, son menores en todos los rangos en la estructura matricial RASTER 5x5 comparada con la estructura RASTER 10x10. Asimismo, y tal como se desprende del rango Áreas Planas, la estructura RASTER con celdas de 5x5m genera una superficie de este tipo que se eleva a 38,6 ha, lo cual equivale a un 70% de áreas coincidentes al ser comparado con la superficie mostrada por el TIN-10 y para el caso de la estructura RASTER 10x10, el porcentaje de áreas coincidentes, en este rango, asciende a 50%, vale decir un valor significativamente menor que el mostrado por la estructura matricial RASTER 5x5. Destacando que ambas estructuras RASTER, analizadas por el factor topográfico de exposición, presentan el mismo comportamiento en el desarrollo de los rangos, los cuales, así como su variación comparativa, en valores reales, se presentan en el grafico de la Figura 24.

**Cuadro 20** Resumen de superficie (ha) por rangos de exposición, comparación TIN-10 versus tamaño de celdas de RASTER.

Rango de Exposición	TIN-10	RASTER			
		5x5 m		10x10 m	
		Superficie (ha)	Diferencia Absoluta con TIN-10 (ha)	Superficie (ha)	Diferencia Absoluta con TIN-10 (ha)
Áreas planas	55,3	38,6	16,7	27,5	27,8
N	36,3	31,4	4,9	26,7	9,6
NE	10,8	18,4	7,6	22,5	11,7
E	26,7	35,0	8,3	40,4	13,7
SE	47,8	53,8	6,0	59,4	11,6
S	54,0	55,0	1,0	55,3	1,3
SO	62,1	63,5	1,4	63,7	1,6
O	73,1	71,9	1,2	70,9	2,2
NO	70,5	69	1,5	66,8	3,7
<b>Total Diferencia Absoluta Acumulada (ha)</b>			48,6		83,2



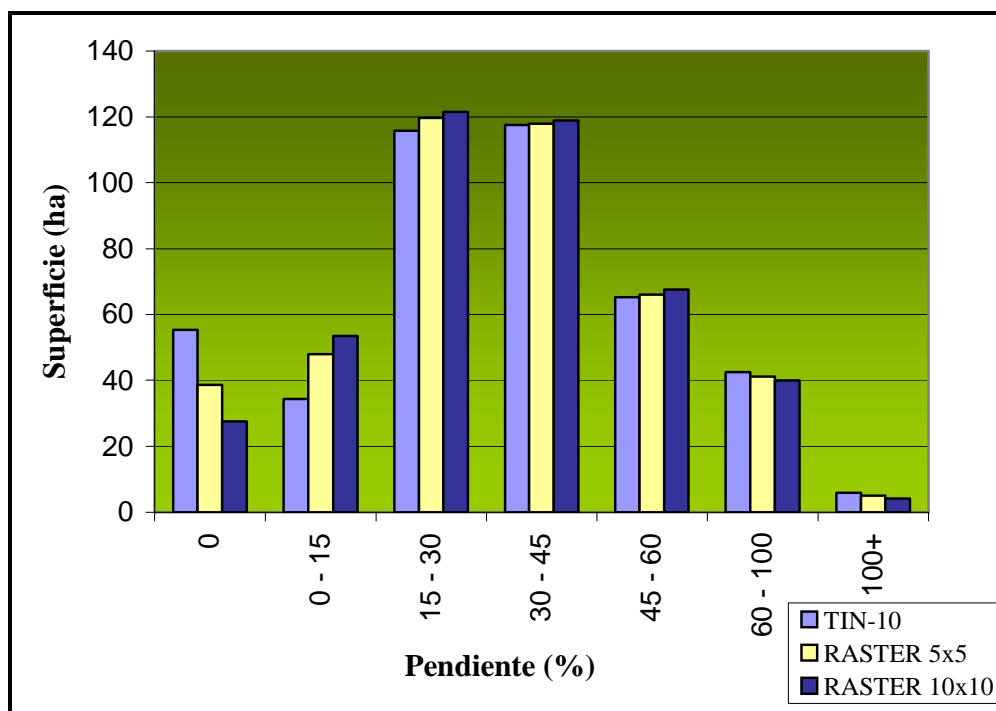
**Figura 24.** Gráfico de superficie (ha) por rangos de exposición, para factor físico de exposición comparando el TIN 10 con RASTER de 5x5 y 10x10.

Analizado el Cuadro 21, se observa que tanto la diferencia absoluta acumulada como las discrepancias absolutas parciales entre la red TIN-10 con la estructura RASTER 5x5 son menores que las registradas entre TIN-10 con RASTER 10x10, destacando que la superficie de discrepancia entre TIN-10 con RASTER 5x5 asciende a 38,3 ha, equivalente a 8,8% del total de la superficie del predio, en cambio la diferencia entre TIN-10 con RASTER 10x10 se eleva a 61,5 ha, equivalente a 14,1% con respecto al total de la superficie predial y a un 60,6% más que la discrepancia registrada entre TIN-10 con RASTER 5x5.

Asimismo, se advierte que para las pendientes superiores a 15% no se registran diferencias significativas en ambas estructuras matriciales, situación que vislumbra de mejor modo en el gráfico comparativo de la Figura 25.

**Cuadro 21.** Resumen de superficie (ha) por rangos de pendiente, comparación TIN-10 versus tamaño de celdas de RASTER.

Rango de Pendiente (%)	TIN-10	RASTER			
		5x5 m		10x10 m	
		Superficie (ha)	Diferencia Absoluta con TIN-10 (ha)	Superficie (ha)	Diferencia Absoluta con TIN-10 (ha)
0	55,3	38,6	16,7	27,5	27,8
0 - 15	34,3	48,1	13,8	53,6	19,3
15 - 30	115,7	119,7	4,0	121,6	5,9
30 - 45	117,5	118,1	0,6	119,0	1,5
45 - 60	65,2	66,0	0,8	67,6	2,4
60 - 100	42,7	41,2	1,5	39,9	2,8
100 +	5,9	5,0	0,9	4,1	1,8
<b>Total Diferencia Absoluta Acumulada (ha)</b>			38,30		61,50



**Figura 25.** Grafico de superficie (ha) por rangos de pendiente, para factor físico de pendiente comparando TIN-10 con estructuras RASTER de 5x5 y 10x10.

Los valores mostrados en el Cuadro 22, indican que ambas estructuras matriciales RASTER tienen un comportamiento similar en el factor topográfico de altitud, por cuanto sus divergencias en superficie con la red TIN-10 son, salvo excepciones, inferiores a una hectárea. Destacando que no es posible generalizar un comportamiento de las diferencias parciales, por cuanto estas dependen del rango evaluado; así por ejemplo las discrepancias son mayores en el RASTER 10x10 en los rangos comprendidos entre las cotas 150-300 y 450-550, pero, a su vez, el RASTER 5x5 presenta diferencias mayores en los rangos entre las cotas 300-450, mostrando ambas estructuras la misma disconformidad en el rango 550-600 metros.

Sin perjuicio de lo anterior, la estructura RASTER 5x5 presenta una menor superficie de diferencia absoluta acumulada con la estructura vectorial TIN-10, ascendente a 3,39 ha, siendo por tanto la matriz con mayor aproximación a dicha estructura vectorial, toda vez que la matriz RASTER 10x10 presenta una discordancia de 6,62 ha, equivalentes a una superficie 95,3% mayor que la presentada por la estructura RASTER 5x5.

**Cuadro 22** Resumen de superficie (ha) por rangos de altitud, comparación TIN 10 versus tamaño de celdas de raster.

Rango de Altitud (m)	TIN-10	RASTER			
		5x5 m		10x10 m	
		Superficie (ha)	Diferencia Absoluta con TIN-10 (ha)	Superficie (ha)	Diferencia Absoluta con TIN-10 (ha)
150 - 200	1,03	1,13	0,1	1,2	0.17
200 - 250	10,96	11,3	0,34	11,6	0.64
250 - 300	41,56	41,7	0,14	42,1	0.54
300 - 350	89,97	88,9	1,07	89,1	0.87
350 - 400	121,37	121,9	0,53	121,6	0.23
400 - 450	86,34	86,1	0,24	86,2	0.14
450 - 500	58,48	58,1	0,38	57,4	1.08
500 - 550	26,73	27,1	0,37	24	2.73
550 - 600	0,22	0	0,22	0	0.22
<b>Total Diferencia Absoluta Acumulada (ha)</b>			3,39		6,62

#### 4.2.2.2 Análisis estadístico para las estructuras raster.

Con el objeto de verificar cual de las dos estructuras RASTER analizadas ostenta una mayor correlación con la red TIN-10, se realizó la prueba t student; sin embargo esta prueba requiere, como requisito fundamental, la existencia de normalidad en la muestra, por lo que se verificó esta característica aplicando la dócima de Kolmorov-Smirnov, cuyos resultados se indican en el Cuadro 23, el que indica que tanto la media como la desviación estándar presentan normalidad en su distribución. Esto se ve corroborado con un alto nivel de significancia muy superior al 0.05, destacando que para el factor topográfico de exposición, la estructura RASTER 5x5 es superior en significancia que la RASTER 10x10, en cambio para el factor altitud los parámetros de normalidad y el nivel de significancia son prácticamente equivalentes.

**Cuadro 23** Resumen de análisis estadísticos de la prueba de normalidad, Kolmogorov – Smirnov, para raster 5x5 m y raster 10x10 m, expresado en superficie (ha).

Factor Topográfico	Exposición		Pendiente		Altitud	
	Raster5	Raster10	Raster5	Raster10	Raster5	Raster10
Estadígrafos						
Media	48,51	48,12	62,37	61,87	48,45	48,12
Desviación estándar	18,51	19	42,66	44,58	43,32	43,40
Significancia (K-S)	0,961	0,854	0,936	0,970	0,994	0,981

Con los resultados obtenidos del Cuadro 23, se realizaron los análisis estadísticos T-test, obteniendo los valores mostrados en el Cuadro 24; estos muestran valores p por sobre el mínimo estipulado, lo cual indica que la diferencia entre la red TIN-10 versus las estructuras RASTER no son significativas. Destacando que para el caso del factor topográfico de exposición se aprecia que para las funciones TIN-10 – RASTER 5x5 existe un menor rango en el intervalo de confianza y un nivel de significancia 0,998, lo que indica mayor similitud respecto al valor 0,930 correspondiente al TIN-10 - RASTER 10x10; este a su vez presenta un intervalo de confianza mayor.

En el caso de la pendiente nuevamente el rango menor de intervalo de confianza lo arroja el TIN-10- RASTER-5 con un nivel de significancia 0,998. A su vez en el factor de altitud se vuelve a repetir el escenario, a pesar de que los valores de significancia bajan a 0,716 y 0,299, continúan mostrando similitud, pero en mucho menor grado el TIN-10 – RASTER 10x10.

**Cuadro 24** Resumen de análisis estadísticos de la prueba “t” para pares simples, TIN-10 – RASTER 5x5 y TIN-10 – RASTER 10x10, expresado diferencias de superficie (ha).

Factor topográfico	Exposición		Pendiente		Altitud	
	TIN 10-raster 5	TIN 10-raster 10	TIN 10-raster 5	TIN 10-raster 10	TIN 10-raster 5	TIN 10-raster 10
Media	0,0056	0,39	0,0075	0,5014	0,0622	0,3967
Intervalo de Confianza						
Inferior	-5,9101	-9,5781	-8,3563	-12,5456	-0,3184	-0,4268
Superior	5,9212	10,3581	8,3713	13,5484	0,4428	1,2201
Significancia	0,998	0,930	0,998	0,928	0,716	0,299

Después de realizados los análisis de cada raster y compararlos con la estructura vectorial TIN 10 se asume que el raster seleccionado para los posteriores análisis es el RASTER 5x5 m, ya que muestra una correlación mayor con el TIN 10. Además posee el tamaño de la celda mas adecuada para el análisis de la incorporación de la red hídrica al MDE, esto debido que el ancho del cauce en algunos casos no es superior a metro y medio, y al realizar la ponderación de la celda, este si debe tener preponderancia.

### 4.3 Aplicación de la herramienta Hydrotools.

Para la realización de este estudio, se empleó la herramienta Hydrotools de ArcView 3.2 en dos etapas: primero aplicando funciones que permitieron corregir el MDE, y posteriormente aplicar las funciones hidrológicas, utilizando el algoritmo simple D8, con el objeto de comparar los resultados de estas aplicaciones entre un MDE mejorado, denominado así por cuanto este incluye el modelado del levantamiento en terreno de la red hídrica con sus correspondientes puntos de

control, y otro que sólo posee las características originales de un MDE. Para ambos casos se utilizó una estructura matricial de tamaño de celda de 5 x 5 m.

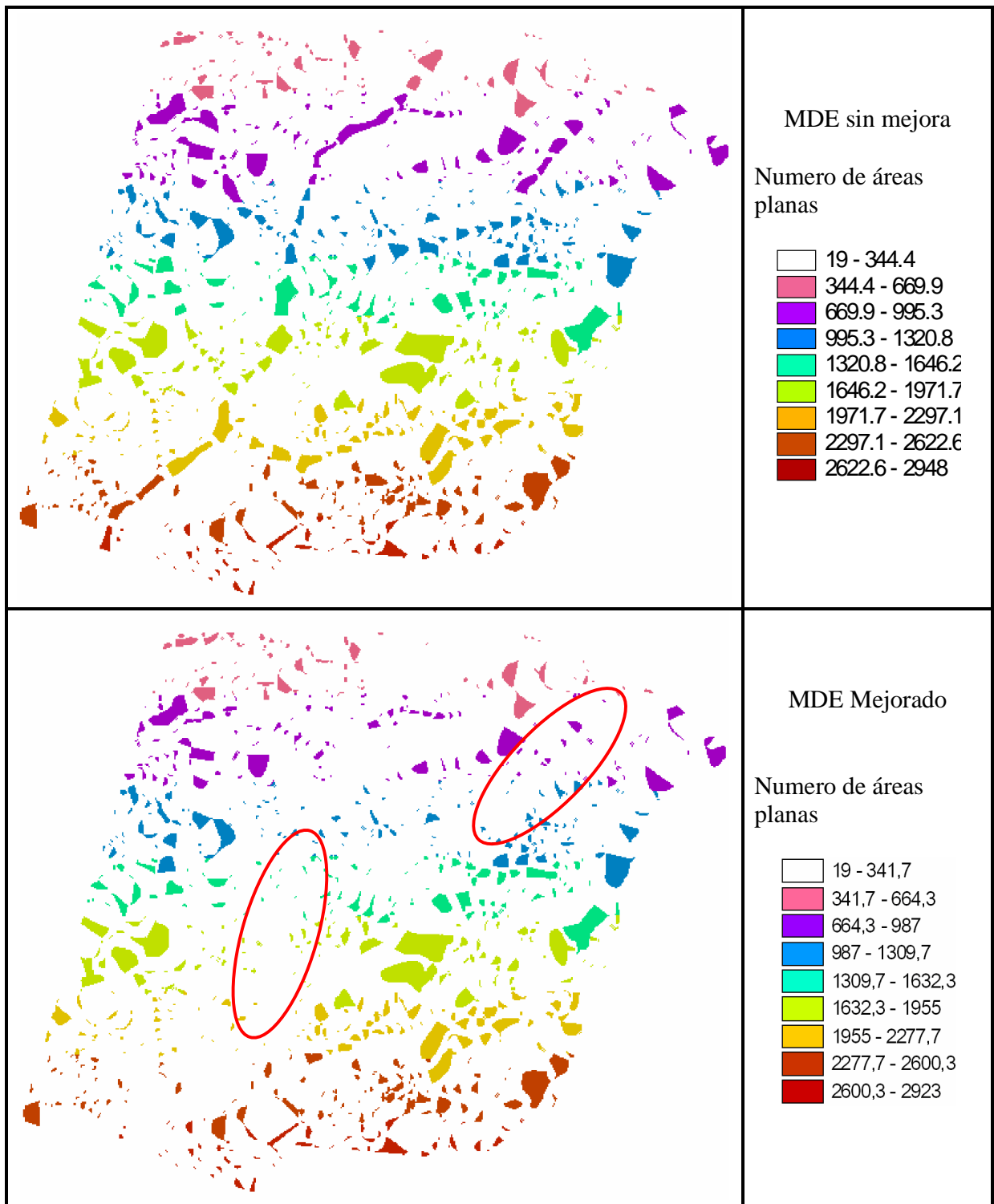
#### **4.3.1 Preparación del MDE.**

Para realizar la rectificación del modelo digital de elevación, entendiéndose por esto la detección y corrección tanto de áreas planas como áreas de drenaje interno, así como también la construcción de la dirección de flujo, se emplearon las siguientes funciones:

##### **4.3.1.1 Detección de áreas planas.**

De la Figura 26, correspondiente al modelo sin mejora, se aprecia la gran cantidad de zonas planas ascendente a 2948 celdas; para el caso del MDE mejorado este valor alcanza a 2923 celdas. A pesar que la diferencia numérica no es significativa entre ambos modelos, al realizar un análisis visual se aprecia claramente que el modelo mejorado eliminó gran parte de las zonas planas con la incorporación de la red hídrica al MDE, observando a su vez que el tamaño de las zonas planas disminuyó en forma ostensible en algunos sectores. Lo anterior se debe, principalmente, al tamaño de la celda del RASTER correspondiente a 5 x 5 m, y del ancho del lecho que posee la red hídrica en análisis. Al realizar la ponderación de la celda, esta queda con la altura del levantamiento de terreno corregida, eliminando de esta forma las zonas aterrazadas.





**Figura 26.** Detección de áreas planas en el MDE. En rojo se muestran algunos sectores corregidos.

En este tenor, Felicísimo (1984), indica que el aspecto aterrazado del MDE corresponde a un desequilibrio en la distribución espacial de los datos y del tamaño elegido para crear la matriz regular. Situación que fue corroborada durante la ejecución de este estudio, quedando demostrada en el proceso de elección de la estructura matricial de 5x5 m.

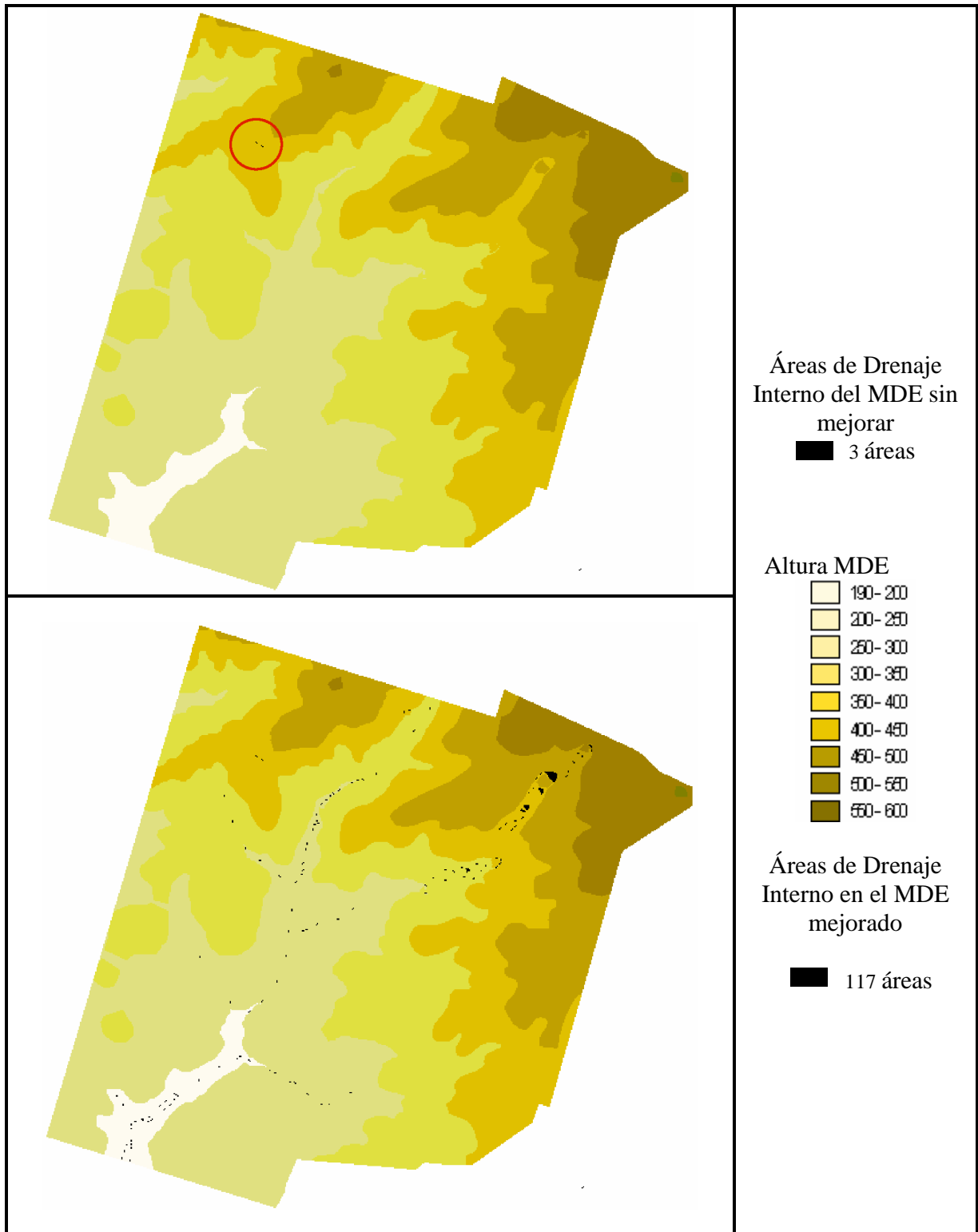
Por lo tanto, los resultados mostrados con el MDE mejorado, al incorporar el levantamiento de terreno, lograron corregir significativamente las zonas planas, esto se visualiza en los perfiles longitudinales mostrados en la Figuras 16 a 19 correspondientes a las quebradas en estudio.

#### **4.3.1.2 Detección de Áreas de Drenaje Interno.**

Como se puede apreciar en la Figura 27, en el MDE sin mejora sólo se visualizan tres celdas que muestran acumulación de depresiones; en cambio en el MDE mejorado, las acumulaciones de depresiones se observan en 117 celdas. Este aumento se debe a la interpolación del levantamiento en terreno de la red hídrica, ocasionando pozos en las zonas afectadas lo cual conlleva a una incoherencia en el escurrimiento del flujo.

Coincidentemente con lo anterior, Felicísimo (1994) señala que uno de los problemas es la aparición de concavidades a lo largo de los fondos de valles, este tipo de artefacto se genera por el uso de funciones de interpolación de grado superior en zonas conflictivas derivadas de la construcción del MDE.

Debido al levantamiento efectuado en terreno, fue posible detectar más áreas de drenaje interno que figuraban ocultas por las zonas planas, formadas por el espaciamiento de las curvas de nivel sumado al comportamiento erróneo de estas al generar sus cierres en forma oblicua, no moldeando su alargamiento conforme a la conducta real de la curva, bajo este criterio se da por sentado que las áreas de drenaje interno siempre existieron en las zonas de las quebradas, solo que el MDE sin mejora no tenía la capacidad de mostrarlas.

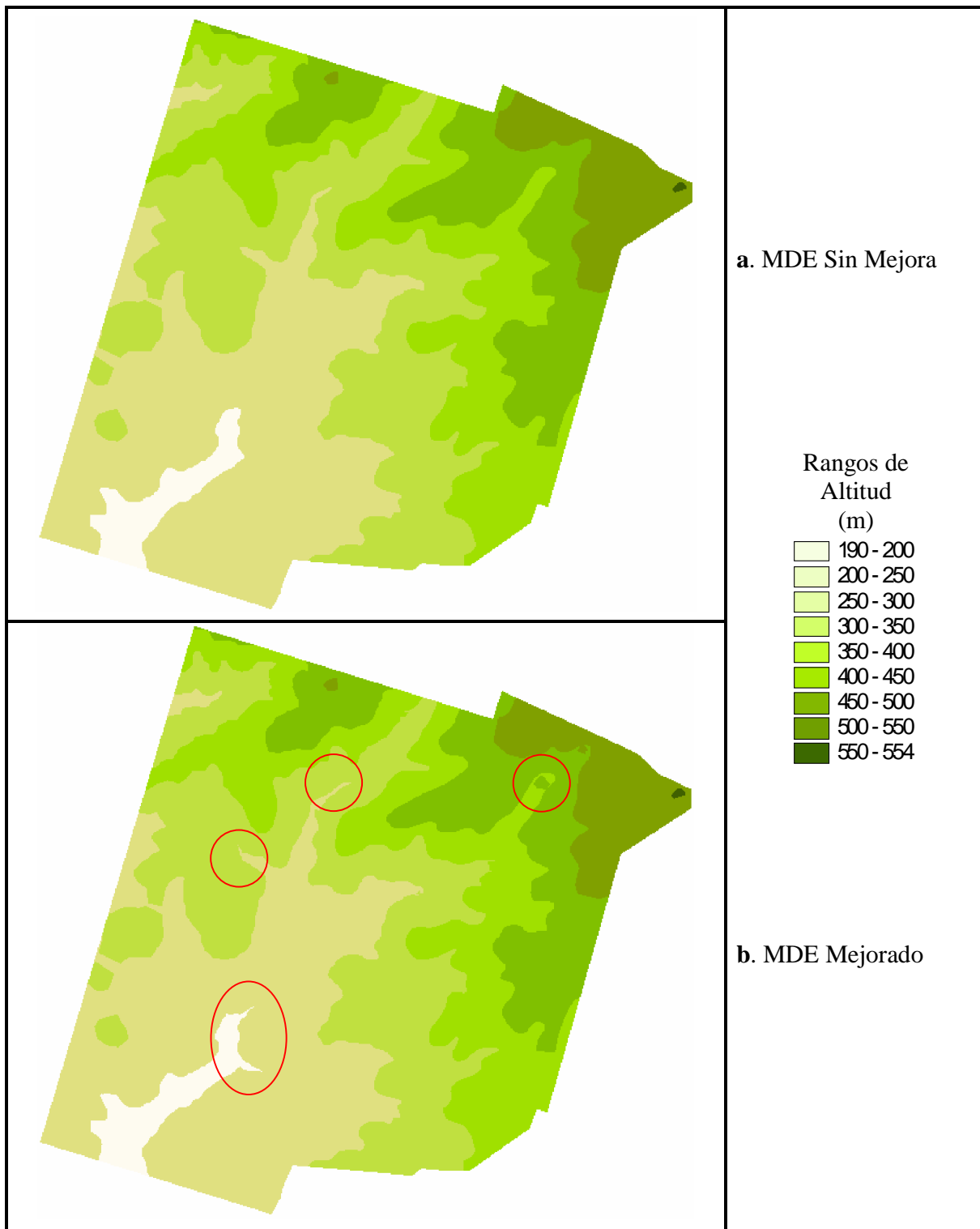


**Figura 27.** Áreas de Drenaje Interno en los MDE

#### **4.3.1.3 Llenado de Área de Drenaje Interno.**

En la Figura 28, se observa que las depresiones mostradas en la Figura 27 fueron corregidas en ambos modelos, tanto en el MDE sin mejora, rectificando las tres áreas de drenaje interno, como también en el MDE mejorado, al cual se le efectuó una rectificación de sus 117 depresiones de drenaje.

Por su parte, Felicísimo (1994), señala que lo ideal es generar el MDE mediante métodos que consideren el problema generado por la aparición de áreas de drenaje interno y lo solucionen en su origen. Una forma de enmendar esta deficiencia es introducir, en el MDE, la red hidrológica como líneas estructurales, de esta forma, la triangulación realizada durante la generación de la estructura vectorial TIN, basada en una red de triángulos irregulares, utilizará estas líneas como lados de dichos triángulos, asignándoles las altitudes correspondientes y trazando correctamente las líneas de flujo, para posteriormente efectuar la corrección de las concavidades del MDE mediante algoritmos, por cuanto la simulación de proceso hidrológico no interrumpe las líneas del flujo. Cabe destacar que el trazado fluvial debe ser introducido como información auxiliar.



**Figura 28.** Llenado de las Áreas de Drenaje Interno del MDE, enmarcado en rojo las zonas corregidas

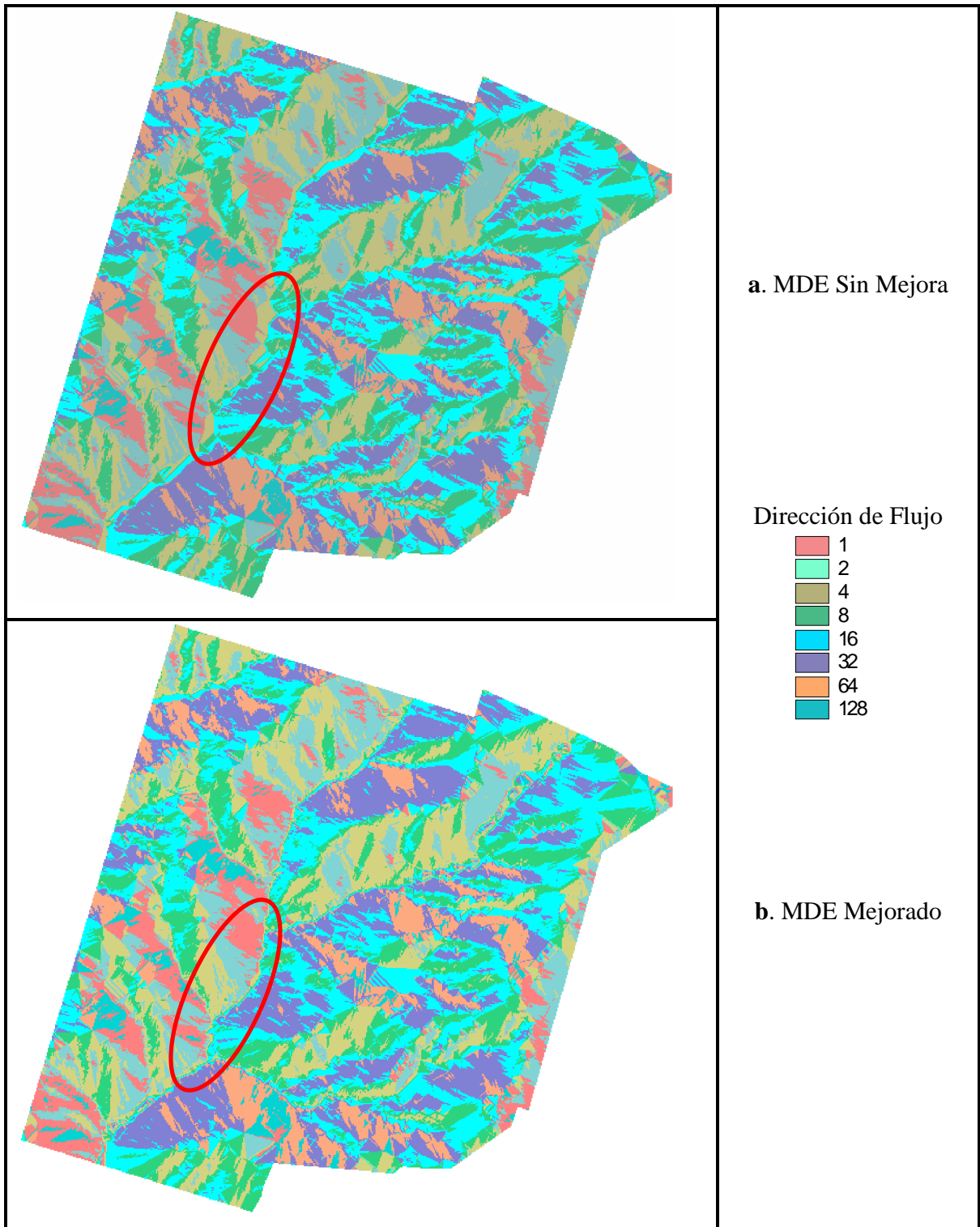
#### 4.3.1.4 Dirección de Flujo.

Para el caso de esta función, cuyos resultados se aprecian en la Figura 29, se advierte que no existen diferencias significativas entre los dos modelos. Destacando que las variaciones presentadas son generadas, en el MDE mejorado, a partir de la incorporación de la red hídrica, toda vez que esta última elimina un gran porcentaje de las áreas planas al distinguir el ancho real del cauce, la profundidad efectiva de este y por ende sus cotas asociadas. En tal escenario, para la representación del cauce, se aprecia al MDE sin mejora exhibiendo una línea mas ancha de coloración café (color N° 4 de la paleta de colores), provocada por efecto de las áreas planas que no fueron totalmente eliminadas por el programa Hydrotools. A su vez, en el MDE mejorado, la red hídrica se representa con una línea delgada de diferentes colores.

De los datos contenidos en el Cuadro 25, se observa que la trayectoria de flujo predominante corresponde a la dirección Oeste (código 16), con una superficie ascendente a 90,2 ha en el caso del MDE sin mejora y a 86,9 ha para el MDE mejorado. En contraposición, se observa que la dirección de flujo de menor incidencia se emplaza en exposición NE, con superficies que varían desde 11,1 y 11,8 hectáreas para los modelos sin mejora y mejorado, respectivamente. Tal y como se indicó anteriormente, no existen diferencias sustanciales en superficie, por cuanto la mayor discrepancia entre los modelos asciende a 3,3 ha en la exposición Oeste y su menor diferencia alcanza a 0,7 ha en la exposición NE.

**Cuadro 25.** Dirección de Flujo del MDE en exposición por superficie (ha).

<b>Dirección de Flujo</b>		<b>Superficie MDE (ha)</b>	
<b>Código</b>	<b>Sigla</b>	<b>Sin mejora</b>	<b>Mejorado</b>
1	E	31,7	33,1
2	SE	50,7	52,3
4	S	75,1	73,7
8	SO	67,8	66,8
16	O	90,2	86,9
32	NO	75,6	76,4
64	N	34,3	35,6
128	NE	11,1	11,8
<b>Total Superficie</b>		<b>436,5</b>	<b>436,5</b>



**Figura 29.** Dirección de flujo del MDE. Encerrados en rojo se muestran algunas de las zonas corregidas

En resumen, a pesar que en los mapas de llenado de áreas de drenaje interno no se observaron grandes diferencias, se debe considerar que los algoritmos de flujo son interrumpidos por las áreas de drenaje interno y esto se detecta en el mapa de dirección flujo.

Además, las principales diferencias se presentaron al mejorar el modelo por la incorporación de la información de quebradas medidas en terreno, eliminando de esta forma la mayor parte de estas superficies ya que la herramienta Hydrotools no corrige por completo estas imperfecciones.

Sin perjuicio de lo anterior, del Cuadro 28 se observa que las superficies relacionadas a la dirección de flujo de la quebrada principal, vale decir sentido Sur y SO, alcanzan a un total de 142.9 ha en el MDE sin mejora y 140.5 ha para el MDE mejorado, la diferencia entre ambos modelos (2.4 ha) corresponde a la anomalía que presenta el MDE sin mejora al considerar un exceso de áreas planas en la zona de escurrimiento. Por tal razón se seleccionó el MDE mejorado, con la incorporación de la red hídrica, para la ejecución del presente estudio.

#### **4.3.2 Funciones hidrológicas para analizar el MDE.**

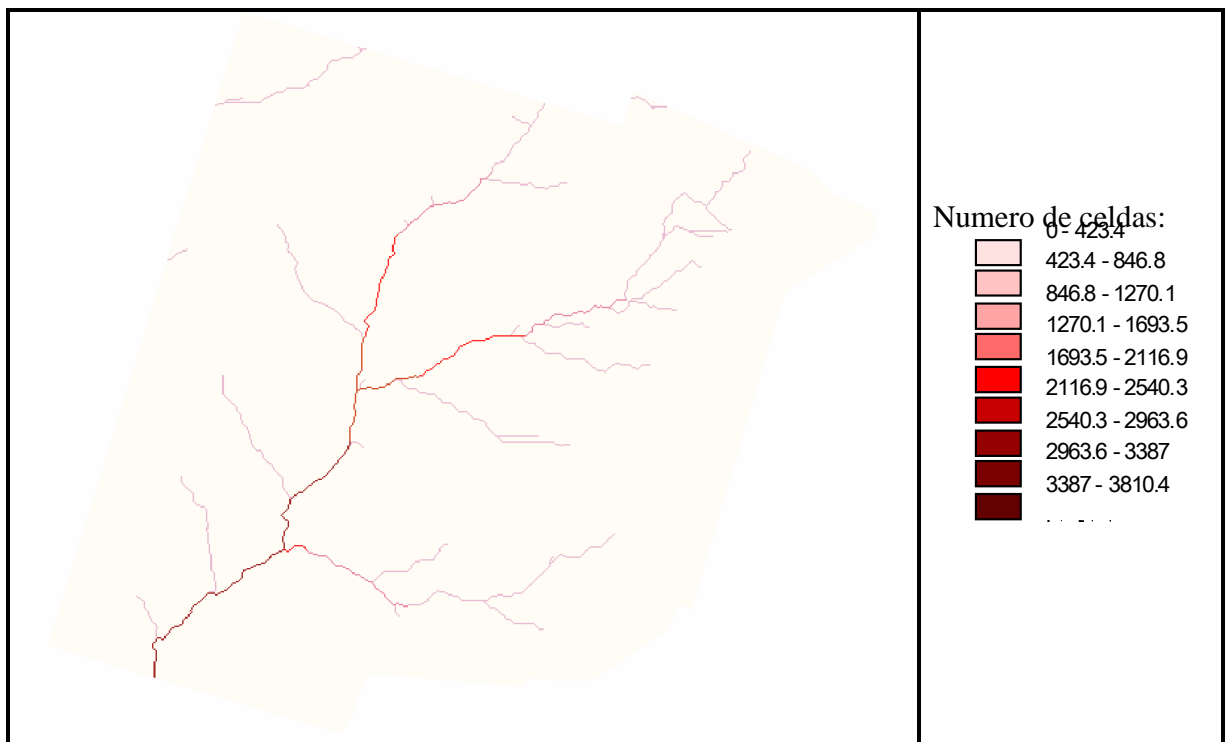
Este ítem proporciona diversas herramientas para efectuar el análisis hidrológico. Algunas de ellas son las correspondientes a análisis de longitud de flujo y acumulación de flujo simple; sin embargo, las más interesantes corresponden a las funciones de Cambio de Flujo y Máximo Flujo, ya que por una parte tienen la capacidad de considerar diferentes tasas de filtración y por otro lado pueden aplicar distintos algoritmos de flujo, como el empleado en este caso, el algoritmo común de flujo simple (D8).

A continuación se exponen los resultados obtenidos con la aplicación Hydrotools para las funciones hidrológicas del modelo mejorado.



#### 4.3.2.1 Longitud de flujo.

En la Figura 30 se observa que la longitud de flujo exhibe sus líneas contorneadas, manteniendo su sinuosidad en forma coherente con la topografía del terreno. De acuerdo a esta función, se determinó una longitud de 19.050 m, dicha extensión de flujo corresponde a la sumatoria de la longitud de todas las quebradas detectadas en el predio, siendo por tanto superior a las longitudes determinadas mediante el diseño de muestreo de las quebradas medidas en terreno, medida que asciende a 14.227 m.

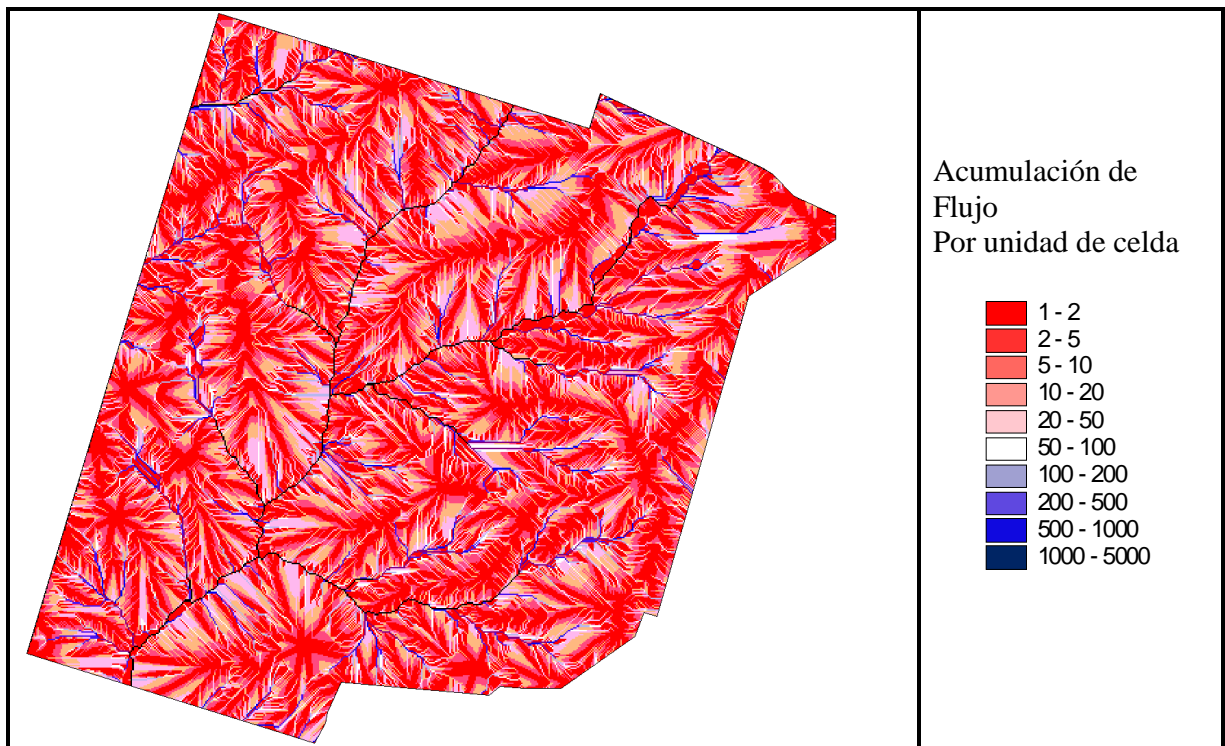


**Figura 30.** Longitud de flujo del MDE.

Esta cubierta es primordial para generar la designación de Strahler, la cual designa el orden de importancia del arroyo según el método indicado en 3.2.3.2.1, debido a que la herramienta Hydrotools la requiere para generar la designación de quebradas.

#### 4.3.2.2 Acumulación de flujo.

En la Figura 31 se puede visualizar que la descarga del flujo se produce desde el color rojo, que corresponde a zonas de mayores altitudes, hacia el color azul, que se relaciona a las zonas de menor altitud. Como se puede apreciar con la banda de colores, la acumulación en el color rojo, es lo que recibe en forma directa la celda, valor 1 a 2, en la banda siguiente de valor 2 a 5, corresponde a lo que recoge esa celda más el escurrimiento de la categoría anterior y así sucesivamente hasta llegar a la acumulación total que se genera en la red hídrica, de color azul oscuro, valor máximo 5000; entendiéndose por tanto que en esta zona la acumulación total de la celda corresponde a 5000 unidades.



**Figura 31.** Acumulación de flujo del MDE

Para la clarificación de la interpretación de este mapa, esta se puede ejemplificar de la siguiente forma: si se considera una cubierta de precipitación, considerando sólo la variable de

escurrimiento superficial y desestimando otras variables asociadas al ciclo hídrico (como por ejemplo la infiltración), se deberá multiplicar el valor obtenido en la cubierta de acumulación de flujo por los valores contenidos en la cubierta de precipitación

De igual manera, se puede continuar incorporando cubiertas vegetacionales o de suelo, que representen otras variables del ciclo hídrico, como por ejemplo la interceptación y la infiltración, para determinar la acumulación de flujo por la interacción de factores de precipitación, interceptación por tipo de vegetación, escurrimiento y percolación en el MDE.

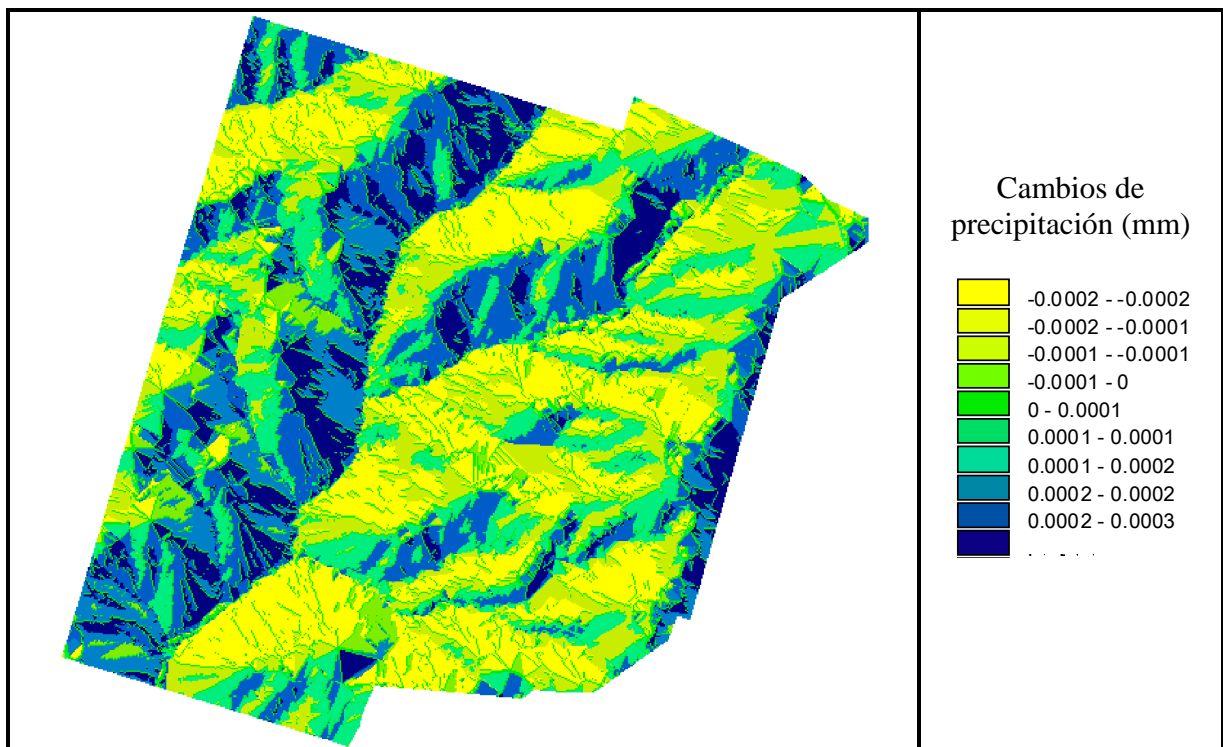
Al realizar esta cubierta se detectó la necesidad de contar con información mas detallada, específica y local de diversos factores involucrados en el modelado del ciclo hídrico, como por ejemplo evapotranspiración, precipitación, capacidad de absorción del suelo, infiltración, etc, de esta forma se evaluaría en mejor forma la acumulación de flujo correspondiente al predio Rucamanque.

#### **4.3.2.3 Cambio de Flujo.**

Cabe destacar que para la ejecución de esta etapa, se empleó una grilla correspondiente a una cubierta de precipitación elaborada a partir de las isoyetas de 1300 y 1400 mm/año; de ellas, lo que intercepta al predio propiamente tal, corresponde a las isoyetas que van desde 1320 en el noroeste hasta 1330 mm en el sureste, las cuales se desplazan en forma diagonal al predio Rucamanque. Debido a ello, las proporciones de precipitaciones no son diferenciables a mayor escala, toda vez que la información de precipitación está contemplada a nivel regional, no a nivel predial, por lo tanto tiene un grado mínimo de influencia para el sector en análisis.

De la Figura 32 se puede indicar que las celdas van desde el color amarillo oscuro, de valor negativo, hasta el color azul oscuro de valor positivo. Por citar un ejemplo, en el caso del color amarillo oscuro, el valor de la celda corresponde a valores desde -0.0003 hasta -0.0002 mm, el

cual representa al valor del diferencial de precipitación de la celda anterior menos la celda actual según la dirección del flujo, correspondiendo el cambio de precipitación a la celda actual. Generalizando este concepto para el resto de los rangos, se obtuvo que los cambios de precipitación fluctúan hasta el máximo diferencial en las áreas de dirección de flujo sur este, debido a que este coincide con la distribución de precipitaciones en esa misma dirección.

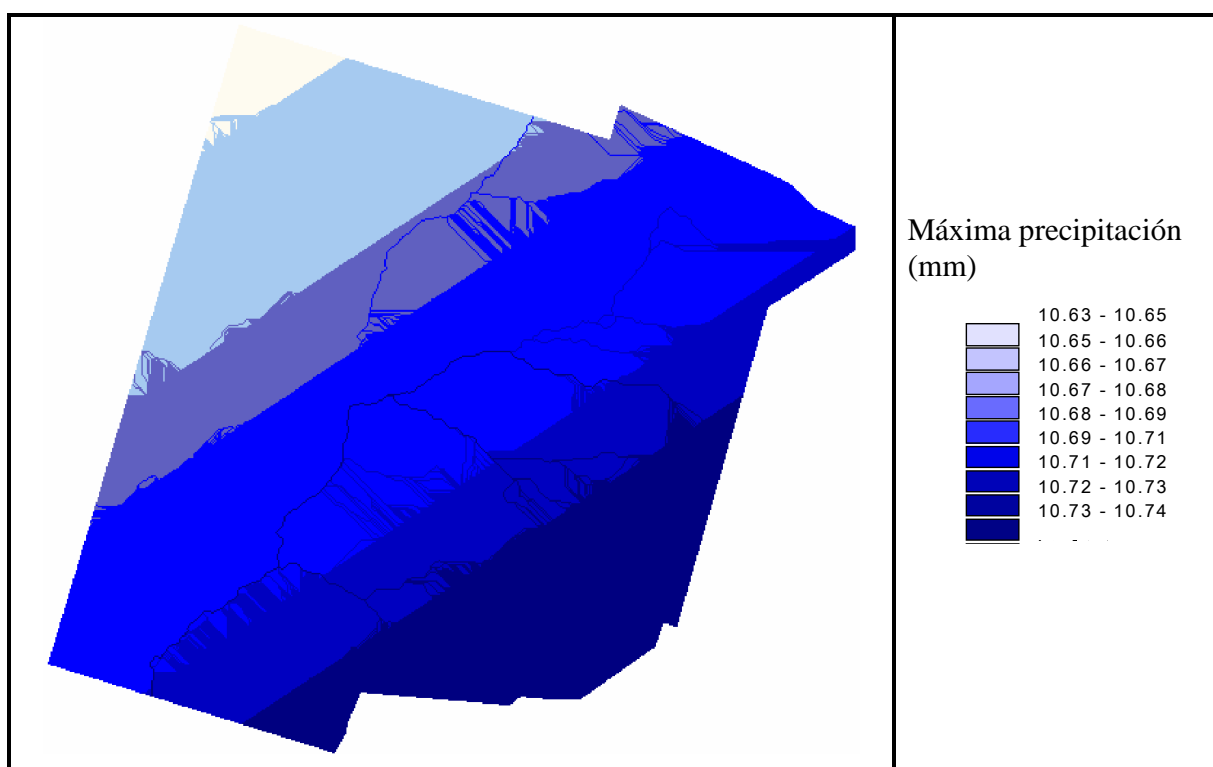


**Figura 32.** Cambio de flujo de la precipitación sobre el MDE

#### 4.3.2.4 Máximo flujo.

Cabe destacar que para elaborar esta cubierta se utilizó como grilla de ponderación la correspondiente a precipitación con las características ya mencionadas en el punto anterior. De tal forma, en la Figura 33 se visualizan los valores máximos de flujo ocurridos en las áreas aguas arriba de una captación, por lo tanto los valores más altos son determinados y conservados para el resultado de dicha captación, en este caso, cada celda conserva el mayor valor de la precipitación,

ya sea correspondiente a la celda actual o alguna de sus celdas anteriores por cuanto se mantiene siempre el valor mas alto. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, para el área en estudio, las precipitaciones varían desde un valor de 10,63 hasta 10,74 mm/día, de acuerdo a los valores que adquiere cada celda, dependiendo de la ubicación que esta tenga, tal y como se detalla en la paleta de colores.

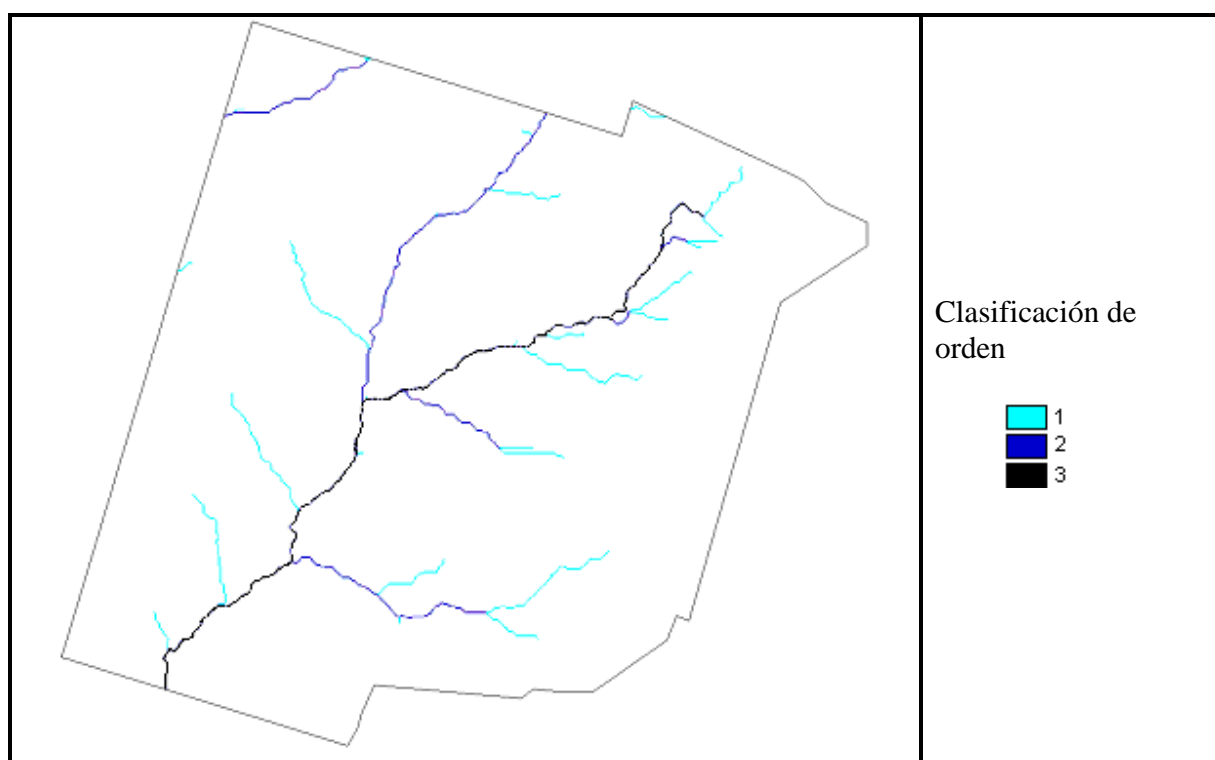


**Figura 33.** Máximo flujo de la precipitación sobre el MDE

#### 4.3.2.5 Designación de quebradas.

En la Figura 34 se puede observar la clasificación de quebradas localizadas según el método de Strahler donde el color calipso corresponde al primer orden, el color azul al segundo orden y el negro al tercer orden. De esta clasificación se puede inferir que el tercer orden que asignó Strahler es discutible, toda vez que, de acuerdo a esta clasificación, la quebrada principal

correspondería a la mostrada en color negro, sin embargo, en el levantamiento de terreno se determinó que esta corresponde a una quebrada secundaria. Según esta comprobación, el orden terciario corresponde a la quebrada central del predio Rucamanque, denominada quebrada Q-0.

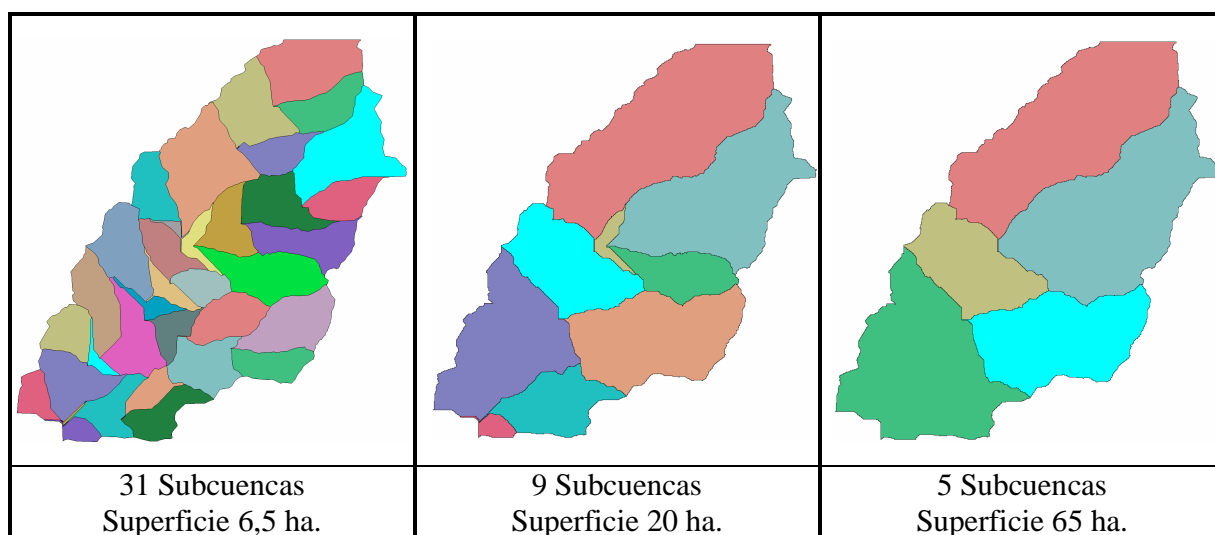


**Figura 34.** Designación de quebradas del MDE según Strahler

Concordante con lo realizado en el presente estudio, Lacroix *et al.* (2001) señalan que la red de drenaje es definida a través de tres pasos: inicialmente, una red de drenaje continua es delimitada por la selección de todas las celdas, con un área de drenaje que excede a un área mínima crítica especificada por el usuario; segundo, se determina la longitud de cauce mínimo, la cual es también definida por el usuario, eliminando a priori los cauces o eslabones más cortos de la red hídrica; tercero, se emplea el método de clasificación de Strahler para su numeración y conteo de las quebradas. Para el predio Rucamanque los cauces que se eliminaron comprendieron a la primera categoría, que concierne a los segmentos inferiores.

#### 4.3.2.6 Definición del tamaño mínimo de cuenca.

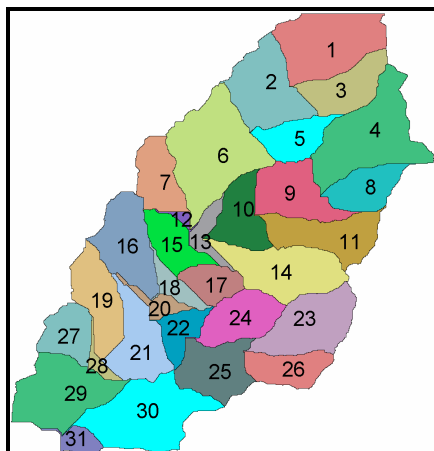
Se efectuó una división de cuencas con un área mínima, lo cual se realiza por la manipulación de los parámetros CSA y MCSL por el usuario (Figura 35), realizando una subdivisión de subcuencas con un área mínima de 6,5 ha. (Figura 36), de donde se extrajo la información correspondiente a área, perímetro, longitud, altitud y factor de forma de las subcuencas (Anexo 5), cuyos estadígrafos (Cuadro 26) indican un área promedio de las cuencas de 149.893,5 m<sup>2</sup>, con un perímetro de promedio 2306,5 m. La media de las cuencas tiene factor de forma 1.85 lo que genera una cuenca de forma oblonga y una longitud promedio de 479,3 m



**Figura 35.** Ejemplo de estructuras de subcuencas con tres tamaños arbitrarios de subcuencas para la microcuenca Chivilcán.

**Cuadro 26.** Resumen de estadígrafos de cuencas del predio Rucamanque.

Cuenca	Área	Perímetro	Longitud	Factor de Forma	Altitud
<b>Media</b>	149893,5	2306,5	479,3	1,85	362,6
<b>Desvest</b>	87334,1	640,3	235,8	0,4	83,0
<b>CV%</b>	58,3	27,8	49,2	21,1	22,9
<b>Mínimo</b>	10825	1160	92,0	1,4	201,1
<b>Máximo</b>	342200	3670	942,7	3,1	520,3



**Figura 36.** Ejemplo de estructuras de subcuenca con número de celdas arbitrarias de 2600 celdas para la microcuenca Chivilcán.

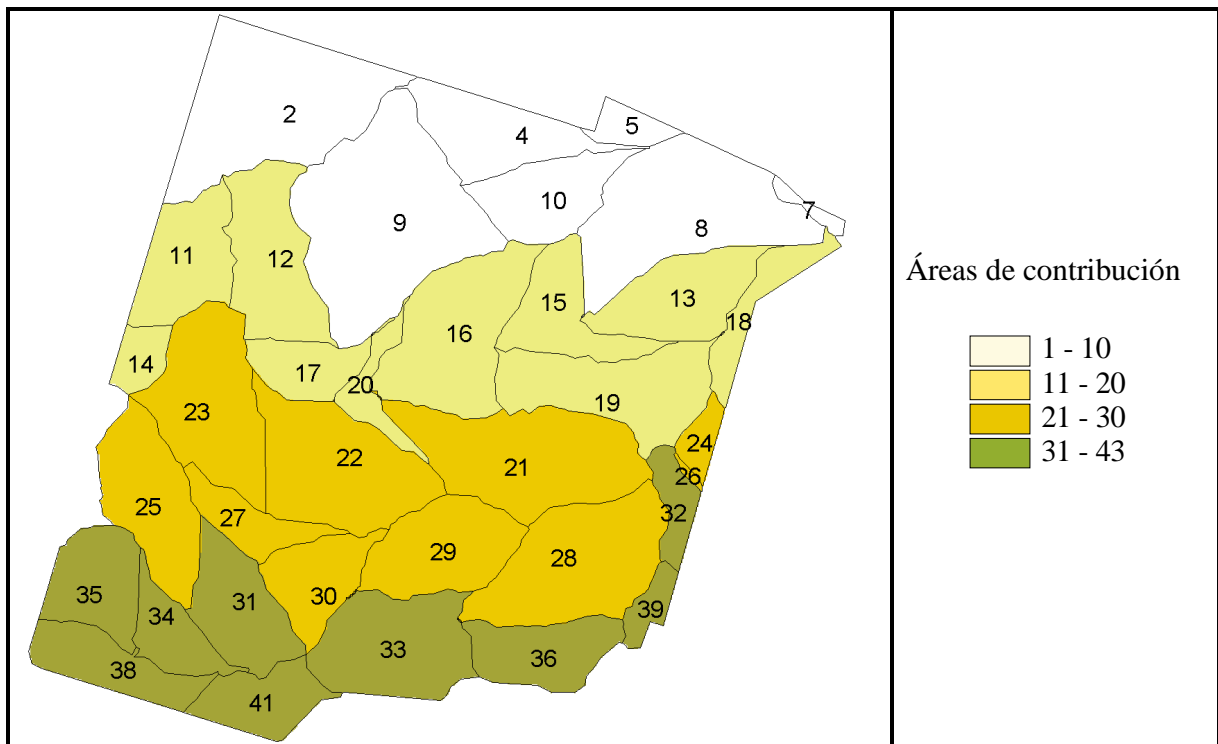
#### 4.3.2.7 Áreas de contribución.

Cabe señalar que para generar esta cubierta se empleó como fuente una cubierta de cuencas generada a partir del MDE mediante la herramienta Hydrologic Modeling que se complementa con la herramienta Hydrotools en la delimitación de cuencas.

En la Figura 37 se puede observar la distribución de las 36 subcuencas del predio Rucamanque, con un tamaño mínimo de 7,5 ha., con una cabida total de 428,1 ha. Se puede advertir que la subcuenca de mayor superficie es la subcuenca N° 9, seguida de la Subcuenca N° 2, ubicadas en la parte norte del predio. Las subcuencas de menor superficie corresponden a la Subcuenca N° 26, seguida de la Subcuenca N° 7, ubicadas en la zona este y noreste del predio.

Esta cubierta permite detectar la posible ubicación de las estaciones de aforo y las áreas de captaciones, así como también se pueden anexar la cubierta de designación de quebradas.





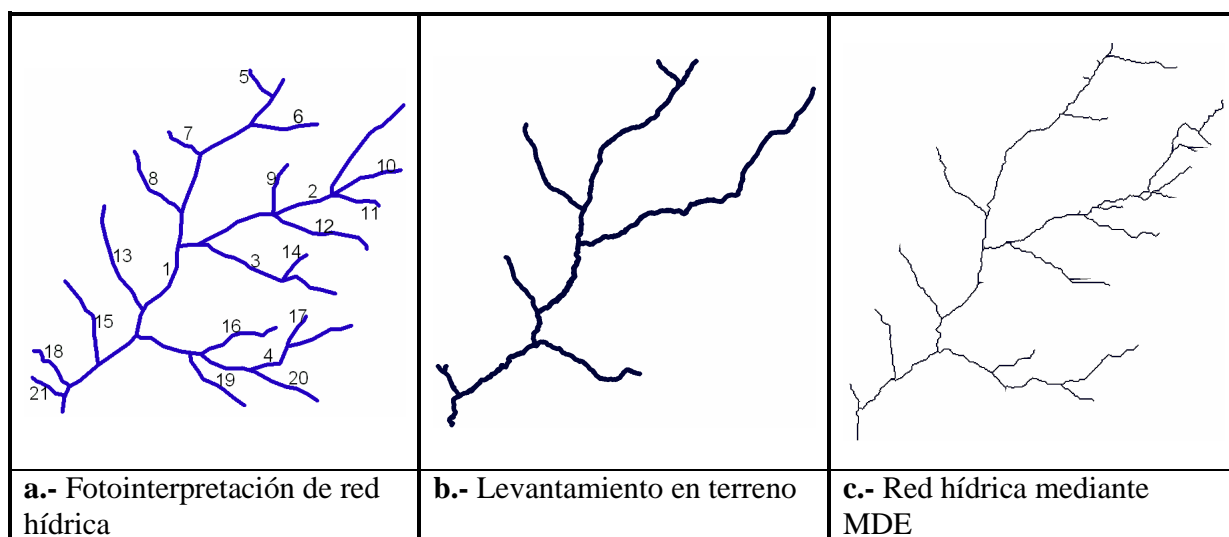
**Figura 37.** Áreas de contribución del MDE

#### 4.4 Modelados de red Hídrica del Predio Rucamanque.

En la Figura 38.a se observa la red hídrica realizada mediante restitución digital, la cual consta de 21 quebradas, valores asignados por el programa Arc View. Para el caso de la red hídrica de levantamiento en terreno, mostrada en Figura 38.b, se aprecian 8 quebradas, que corresponden a un muestreo del 53% del total de la longitud de la red hídrica, y a un 38.1% con respecto al número de quebradas indicadas en la fotointerpretación. Finalmente en Figura 38.c se visualiza la red hídrica arrojada por el MDE, mediante la clasificación de Strahler.

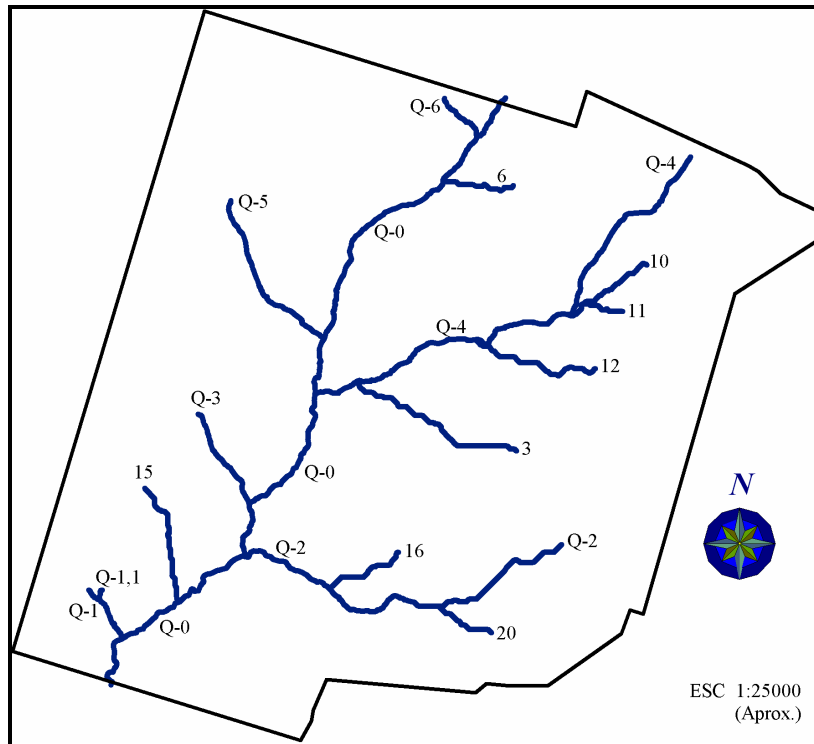
De acuerdo a lo anterior, y considerando que el muestreo abarcó el 53% del total de las quebradas detectadas por la fotointerpretación, fue necesario efectuar una nueva propuesta de la red hídrica, basada en contrastar los tres modelos mostrados en la Figura 38, conservando las quebradas cuya presencia coincidía en al menos dos de estos modelos. De esta forma, se verificó presencia en los

tres modelos para las quebradas N° 1, 2, 4, 5, 8, 13 y 18, así como también, se detectó presencia en dos de los modelos para las quebradas N° 14, 16, 20, 6, 10, 11, 12 y 15, señalando que para estas últimas, la pertinencia de ingreso al modelo fue ratificada constatando en terreno la existencia de las cinco ultimas quebradas indicadas anteriormente. Bajo esta premisa, no se incorporan en la restitución de la red hídrica las quebradas N° 7, 9, 14, 19 y 21, toda vez que estas solo se presentan en uno de los modelos, no existiendo detección de ellas en el levantamiento de terreno, por lo tanto, el modelado definitivo de la red hídrica del predio queda plasmado en la Figura 39.



**Figura 38.** Diferentes modelados de la red hídrica del predio Rucamanque.

De los diversos modelados realizados a la red hídrica, se verifica un alto acierto con respecto a la presencia de las quebradas, al igual que en la exactitud de estas, situación que no ocurre en la precisión de longitud. En el caso de las quebradas N° 4 y 13 el modelado del terreno muestra una longitud inferior que la exhibida por los otros dos modelos; de igual forma, para las quebradas N° 5 y 18, se advierte que el modelado de terreno muestra un largo intermedio entre la fotointerpretación y el modelo MDE, en este último caso sólo se evidencia presencia.



**Figura 39.** Modelo resultante para la red hídrica del predio Rucamanque

En el caso particular de la quebrada N°4 se optó por validar el largo de la fotointerpretación, a pesar que su evaluación en terreno arrojó una dimensión menor, por cuanto esta estaba relacionada con la toma de datos en el tramo que evidenciaba presencia de agua. Dicha actividad fue desarrollada durante el mes de marzo, vale decir al término de la época estival y por ende período de aguas bajas, destacando que la huella de la presencia de la quebrada continuaba y por ende se deduce que en períodos invernales existe presencia de agua en una mayor longitud.

Los tres modelados de la red hídrica en la quebrada N°2 tuvieron un alto acierto en presencia, precisión y exactitud. Sin embargo, cabe destacar que en la generalidad de los casos la longitud de las quebradas determinadas según fotointerpretación, es superior a la longitud obtenida en terreno. Así, el nuevo modelo de la red hídrica del predio Rucamanque queda constituido por las quebradas y sus respectivas longitudes que se indican en el Cuadro 27 adjunto.

**Cuadro 27.** Longitud de la red hídrica de la cuenca Chivilcán del Predio Rucamanque.

<b>Quebrada N°</b>	<b>Longitud (m)</b>
Q-O	2838,3
Q-1	221,1
Q-1,1	38,8
Q-2	1332,4
Q-3	374,1
Q-4	1772,8
Q-5	630,8
Q-6	190,7
15	453,6
16	298,2
20	220,5
12	486,0
10	353,7
11	144,3
6	267,0
3	658,6
<b>Total</b>	<b>10.280,9</b>

#### **4.5 Comparación y análisis de los modelo Levantamiento Topográfico, Fotointerpretación y MDT.**

Se efectuó una comparación entre los modelos realizados para modelar la red hídrica de Rucamanque, determinado que el modelado del levantamiento en terreno es la base correcta, todos los modelos se llevaron a grillas de 5x5 y de 10x10m.

Del cuadro 28 se puede determinar que la grilla de 5x5 m, correspondiente a la red hídrica del modelado de levantamiento en terreno, tiene un numero de 2.449 celdas de las cuales al ser interceptada con el modelado de la fotointerpretación tiene una coincidencia de 1.137 celdas, lo que corresponde a un 46,43%. En el caso de realizar la comparación con el MDE ellas se interceptan en 1.441 celdas, con un 58,84%, por lo tanto se puede concluir que es más exacto el modelado del levantamiento en terreno con el MDE. Para el caso de la grilla de 10x10 m la red

hídrica del modelado de levantamiento en terreno posee un número de 1.052 celdas; estas, al ser interceptadas con el modelado de fotointerpretación, tienen una coincidencia de 795 celdas lo que corresponde aun 75,57%, a su vez, al compararla con MDE tiene una coincidencia de 732 celdas, con un 69,58%, lo que denota que el levantamiento en terreno versus la fotointerpretación tienen mayor exactitud. En el caso de las grillas de 10x10 m, se esperaba un comportamiento como este ya que las celdas tienen una superficie de 100 m<sup>2</sup>, y por ende su capacidad de intercepción es mayor, toda vez que cuenta con una mayor superficie que probabilísticamente permite este hecho.

**Cuadro 28** Comparación de fotointerpretación y MDT de la red hídrica de Rucamanque, versus levantamiento topográfico.

Modelo	Numero de celdas del RASTER		Numero de Intercepciones		Porcentaje (%)
	5 m	10 m	5	10	
Levantamiento Topográfico / Fotointerpretación	2449		1137		46,43
		1052		795	75,57
Levantamiento Topográfico / MDE	2449		1441		58,84
		1052		732	69,58

#### 4.6 Caracterización geomorfología de la cuenca hidrográfica.

Para realizar el estudio morfométrico de la cuenca, se empleó una delimitación artificial restringida a los límites del predio, por cuanto la toma de datos se realizó sólo dentro de los límites prediales.

Según la clasificación realizada por Way (1978), citado por MOPT (1992), la cuenca hidrográfica es una cuenca dendrítica, caracterizándose por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos, como se puede apreciar en la Figura 14. Su presencia indica suelos homogéneos y se presenta en zonas de rocas sedimentarias blandas, tobas volcánicas, depósitos glaciales y antiguas llanuras costeras.

**Cuadro 29** Valores de los Parámetros Hidrológicos y Morfométricos de la Microcuenca

<b>Caracterización morfométrica de la cuenca</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Área de la cuenca	377,87	Ha
Longitud cauce principal	2,838	Km
Longitud de la cuenca	2,523	Km
Pendiente media de la cuenca	35,08	%
Pendiente media del cauce	7,2	%
Perímetro	8,59	Km
Índice de Gravelius	1,2	-
Altitud mediana	380	M
Altitud media	383,51	M
Densidad de drenaje	3,5	km/km <sup>2</sup>

Del cuadro anterior se observa que el índice de Gravelius es 1,2, valor que indicaría que esta cuenca posee una forma redondeada. Sin embargo, desde una apreciación visual la cuenca natural Pichitemuco tiene forma oblonga.

Asimismo, del Cuadro 29 se desprende que la cuenca de Rucamanque abarca una superficie de 377,87 ha (3,78 km<sup>2</sup>), un perímetro de 8,59 Km. y su densidad de drenaje asciende a 3,5 km/km<sup>2</sup>. Según Guerra y González (2002) la densidad de drenaje es un parámetro revelador del régimen y de la morfología de la cuenca, toda vez que relaciona la longitud de los cursos de agua con el área total; de esta manera, altos valores reflejan un fuerte escurrimiento, en consecuencia, su magnitud está indirectamente relacionada con la infiltración, con la erodabilidad del suelo y obviamente con la litología y la cobertura vegetal. En otras palabras, puede afirmarse que terrenos permeables se caracterizan por baja densidad de drenaje. Los mismos autores señalan que la pendiente media del cauce es un indicador de la energía cinética que puede esperarse de las cuencas fluviales; para Rucamanque, este parámetro se estimó en 7,2%, correspondiente a un valor alto, que puede indicar la existencia de una capacidad de transporte considerable de la corriente de agua que fluye por el cauce.

La pendiente media de una cuenca es uno de los principales parámetros que caracteriza el relieve de la misma y permite hacer comparaciones entre cuencas (MOPT, 1992); este concepto trata de ser representativo de las infinitas pendientes que pueden existir dentro de una cuenca y está estrechamente relacionado con los fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie, guardando obviamente una relación importante, aunque compleja, con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo, vegetación adyacente y la contribución del agua subterránea al caudal de la escorrentía.

Para el caso de Rucamanque, la pendiente media de la cuenca asciende a 34,7 % y evidentemente favorece la escorrentía; sin embargo, hay que resaltar la cobertura vegetal boscosa que cubre la cuenca, cubierta que favorece la infiltración, debido principalmente a la intercepción de la lluvia y la disminución en la velocidad del agua de escorrentía, todo esto en interacción con el suelo. Sin embargo, la pendiente media estimada de la cuenca, aunque útil para realizar comparaciones, implica representar toda la cuenca con un sólo valor de pendiente, una situación que para algunos autores se aleja de la realidad (FAO, 1996). Por esta razón, en la actualidad se prefiere trabajar con modelos de elevación digital del terreno, pieza clave en la delimitación de las unidades de paisaje (Felicísimo, 1994).

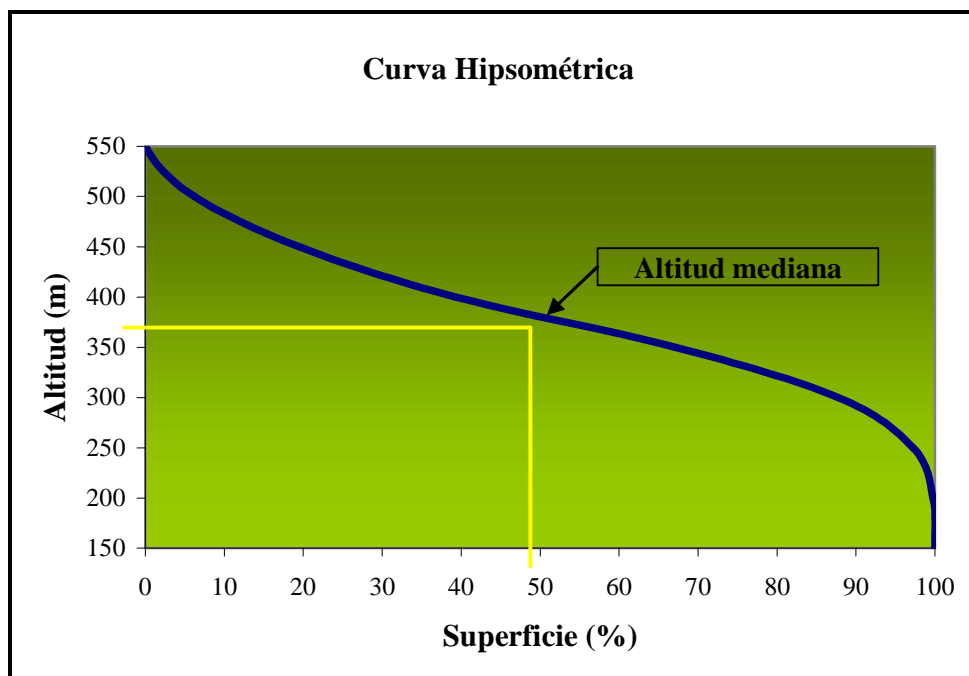
Concordante con lo anterior, Guerra y González (2002) señalan que el retrato más preciso sobre la elevación de una cuenca se logra a través la curva hipsométrica, que es simplemente una distribución del área de acuerdo con la elevación, es decir, una representación bidimensional que grafica en el eje vertical la elevación y en el eje horizontal el porcentaje del área sobre cada curva de nivel en términos del área total.

La hipsometría progresiva en la cuenca de la quebrada principal se muestra en el Cuadro 30 y su representación gráfica en la Figura 40, donde se observa la distribución de áreas en función de la altitud y se puede calcular las altitudes centrales de la cuenca, que para el caso de Rucamanque corresponde a los siguientes valores: altitud media es 383,51 m; altitud mediana es 380 m. Como la altitud media es mayor que la mediana, la distribución de áreas con respecto a la altitud se

considera asimétricamente positiva (Senciales, 2000), es decir, la superficie de la cuenca con altitudes superiores a la media es menor que la superficie con altitudes inferiores a dicho valor medio.

**Cuadro 30** Hipsometría en la cuenca principal del predio Rucamanque.

Clase hipsométrica	Superficie entre curvas de nivel (ha)	% acumulado
600 - 550	0,22	0,05
550 - 500	26,73	6,17
500 - 450	58,48	19,56
450 - 400	86,34	39,33
400 - 350	121,37	67,13
350 - 300	89,97	87,73
300 - 250	41,56	97,25
250 - 200	10,96	99,76
200 - 150	1,03	100

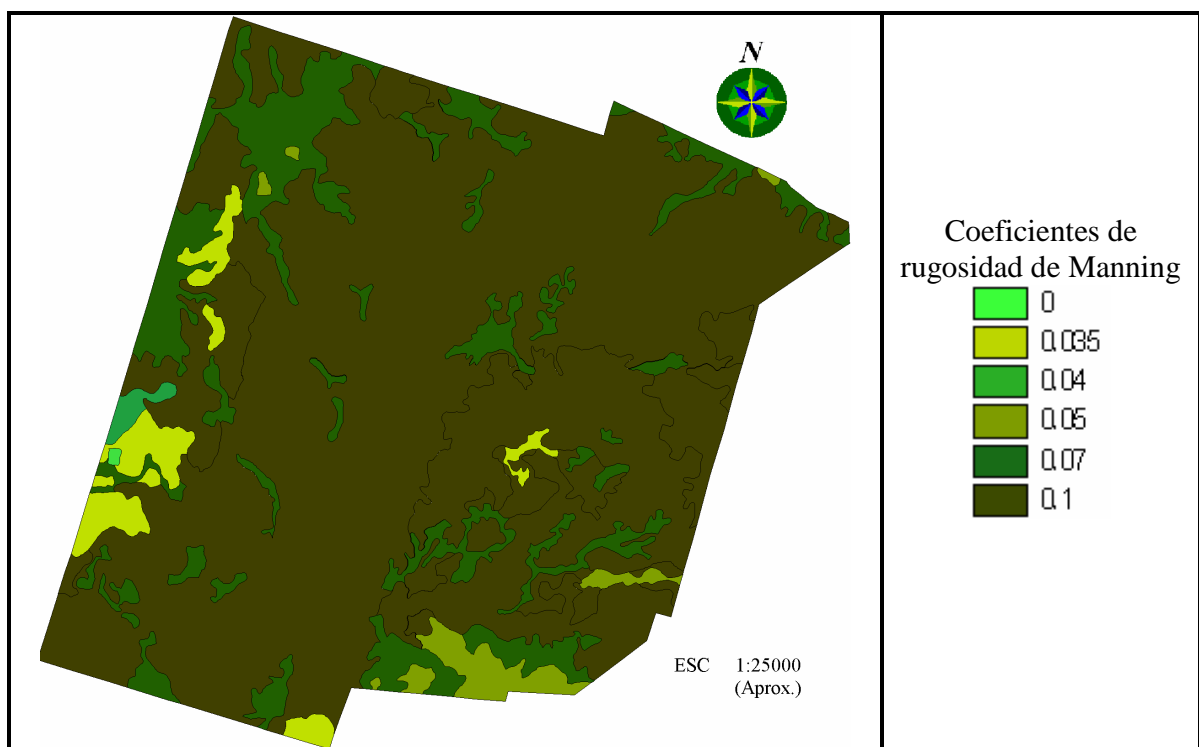


**Figura 40.** Curva hipsométrica de la quebrada principal del predio de Rucamanque.



#### 4.7 Cálculo de caudal.

Para el cálculo de velocidad de escorrentía del predio Rucamanque se asignaron los coeficientes de rugosidad de Manning de acuerdo al Cuadro N° 6, cuyo resumen se aprecia en la leyenda de la Figura N° 41, adoptando para la estimación de velocidad el coeficiente correspondiente a una superficie compuesta por árboles densos.



**Figura 41.** Coeficientes de rugosidad en predio Rucamanque.

Se realizó el cálculo para la estimación de caudales, determinando caudales parciales para tramos entre dos puntos consecutivos; con tales datos se confeccionó el caudal acumulado para una escorrentía que nace en el punto mas alto de la quebrada principal. En la Figura 42 se observan los cuartiles de agrupación de los distintos caudales parciales detectados durante el desarrollo de la quebrada, empleando para estos efectos el perfil longitudinal de la quebrada, con escala vertical ampliada 10 veces con respecto a la escala horizontal, a fin de destacar sus diferencias.

De igual forma, en la Figura 43 se muestra la agrupación de caudales parciales conforme a su perfil longitudinal, dichos caudales simbolizan el aporte de cada tramo en la obtención del caudal total de la quebrada, apreciando el comportamiento del caudal acumulado durante el desarrollo de la quebrada principal en sentido de la pendiente, el cual fue calculado hasta el límite predial, alcanzando un valor final de 6.613 l/seg., equivalente a 6,6 m<sup>3</sup>/seg, acumulados en la desembocadura de la quebrada en el límite predial.

Dicho caudal fue verificado mediante el empleo de la ecuación definida por el Método Racional para cálculo de caudales de cuencas pequeñas, en conjunto con las ecuaciones 3.27, 3.28 y 3.29, utilizando las tablas de intensidad y coeficientes de escorrentía indicadas en el acápite 3.702 según MOP (2002) que, para Temuco, indica un valor de precipitación para un período de retorno de 10 años y una hora de duración equivalente a 16,74 mm y un coeficiente de escorrentía para la cuenca ascendente a 0,38.

Cabe destacar que la Fórmula 3.28, propuesta por Bell (1969), corroborada en Chile por Espíldora (1971), mencionados en MOP (2002), permite estimar la precipitación para duraciones entre 5 minutos y 2 horas, asociadas a períodos de retorno comprendidos entre 2 y 100 años.

Mediante el método antes indicado y efectuando evaluaciones para distintos períodos de retorno se obtuvieron los valores que se indican el Cuadro 31.

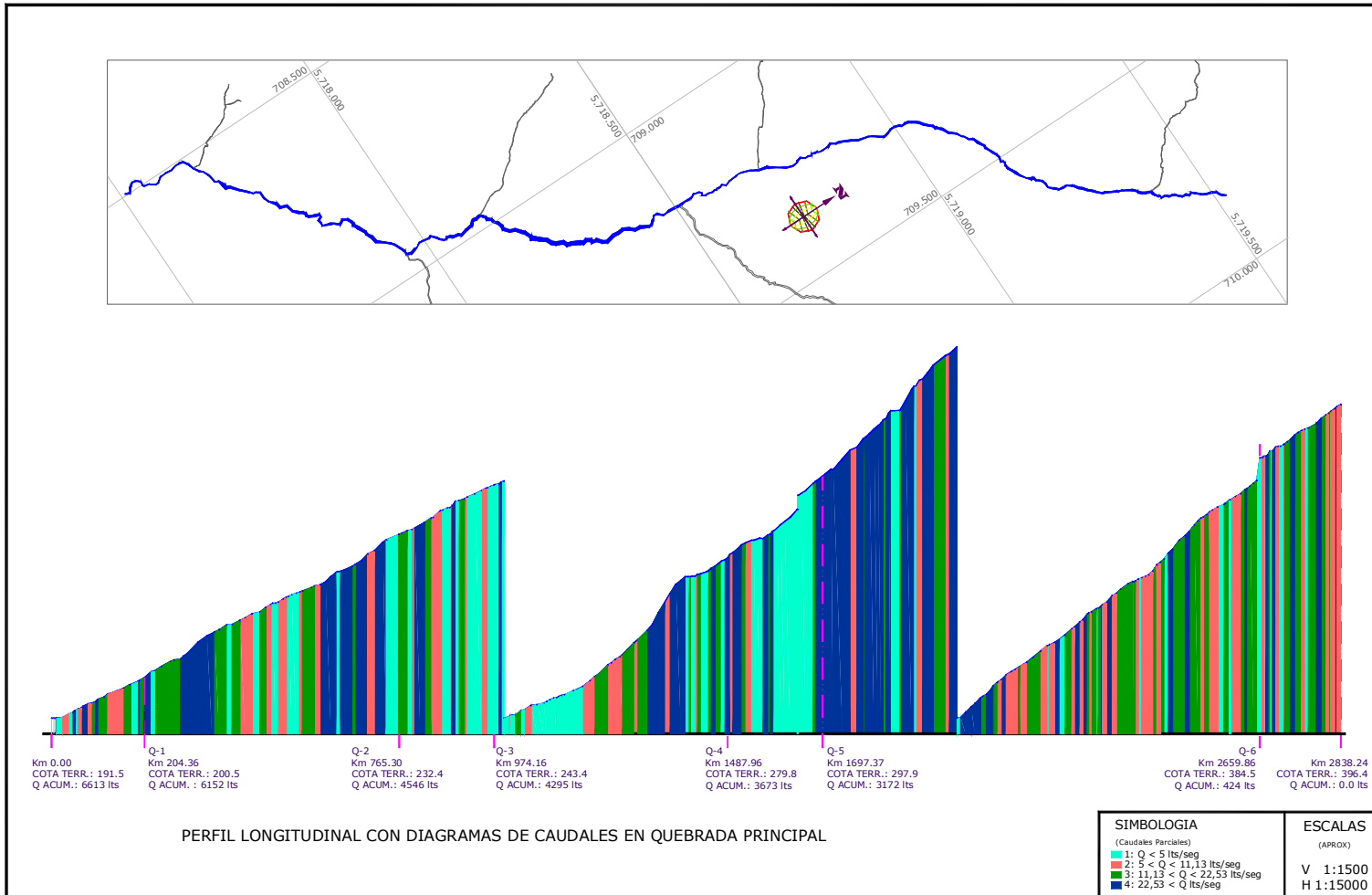
**Cuadro 31** Comportamiento del caudal en función del periodo de retorno.

<b>T</b> (Años)	<b>T<sub>c</sub></b> (minutos)	<b>P<sub>t</sub><sup>T</sup></b> (mm)	<b>I<sub>t</sub><sup>T</sup></b> (mm)	<b>Q</b> (m <sup>3</sup> /s)
15	19,64	11,32	34,57	13,8
10	19,64	10,45	31,93	12,7
2	19,64	7,02	21,45	8,6
1*	19,64	5,54	16,94	6,8

\*Sólo informativo, por cuanto no es aplicable la formula para T<2

A pesar de utilizar una fórmula que supone que el escurrimiento máximo proveniente de una tormenta es proporcional a la lluvia caída, supuesto que se cumple en forma más rigurosa en cuencas mayoritariamente impermeables o en la medida que la magnitud de la lluvia crece y el área aportante se satura, de los resultados anteriores se desprende que estos entregan valores confiables por cuanto se entiende que para la pluviometría invernal de esta zona, con incesantes lluvias, la saturación del suelo se incrementara paulatinamente hasta un punto tal en que la infiltración tienda a cero, y por lo tanto, para una escorrentía en la fase de redes fluviales (Chow *et al*, 1994), la mayor parte de la lluvia caída desembocará en las quebradas, aumentando progresivamente el caudal de salida, estimándose probable que este bordee los valores obtenidos por cálculos.

Tal y como se indicó anteriormente, las Figuras 42 y 43 se construyeron a partir del perfil longitudinal de terreno complementado con los aportes de caudales parciales agrupados en cuartiles, recibidos por la quebrada principal, dichos aportes fueron obtenidos de los resultados generados del análisis de acumulación de flujo, mostrado en la Figura 31. De esta forma se pretende proporcionar una visión global de los aportes por sectores a la formación del caudal acumulado, información que puede ser empleada como base para futuros estudios realizados en el ámbito hidrológico.



**Figura 42** Perfil longitudinal de la quebrada principal con diagramas de caudales parciales y planta de ubicación.

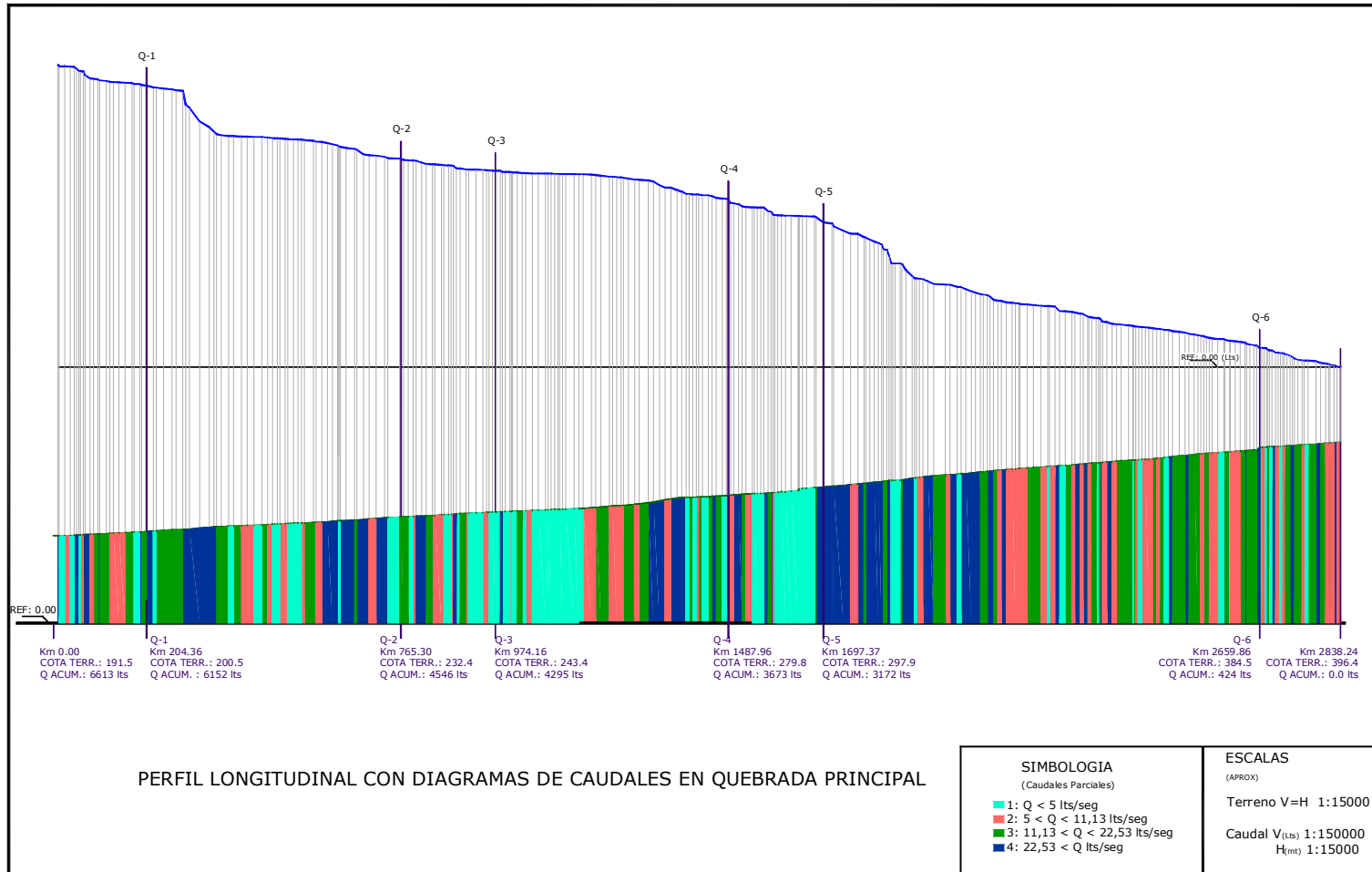


Figura 43 perfil longitudinal de la quebrada principal, con diagramas de caudal parcial y acumulado.

## 5 CONCLUSIONES.

A raíz de las actividades realizadas con motivo del presente estudio se concluye que los modelos de curvas de nivel de 25 y 10m del predio Rucamanque presentan diferencias en el emplazamiento de las curvas, situación que se detectó principalmente en partes de la red hidrográfica al superponerlos con el modelo fotogramétrico y cartográfico.

Al comparar los modelados de levantamiento en terreno, fotointerpretación y MDE de la red hídrica se concluye que la representación más estricta de la sinuosidad de hidrografía se obtiene con la toma de datos mediante un levantamiento de terreno que posteriormente genere una base de datos que den origen a perfiles longitudinales.

El modelo digital de elevación fue parcialmente corregido con la incorporación de la red hídrica, líneas estructurales y puntos de control que permiten utilizarlo como base para realizar futuros estudios en el sector.

El método stream burning, basado en un levantamiento de terreno, constituye el mejor procedimiento para incrementar la exactitud de la red de drenaje y por ende la exactitud del MDE, por cuanto los MDE sin este mejoramiento, acusan terrazas regulares en los perfiles longitudinales que representan los cauces.

De los análisis efectuados a las estructuras vectoriales TIN se concluye que la precisión se incrementa con el acercamiento en cota de las curvas de nivel, por cuanto la cantidad de áreas planas mostrada por el TIN-10 es considerablemente menor que la mostrada por el TIN-25.

A pesar que la estructura TIN es la mas adecuada para construir un MDE, por su capacidad de representar un relieve complejo con precisión, esta se encuentra afectada por los problemas típicos de estructuras vectoriales y a la ausencia de un desarrollo suficiente de algoritmos de

análisis; por tales razones, lo mas recomendable es crear un MDE basado en un modelo TIN y posteriormente generar un MDE matricial mediante procesos de interpolación.

Del análisis efectuado a las dos estructuras matriciales RASTER, empleadas en el presente estudio, se concluye que el tamaño de la celda posee una importancia gravitante, por cuanto a menor tamaño es posible representar mejor la topografía del terreno.

Del análisis estadístico se concluye que el error cuadrático medio (ECM) del MDE es aceptable por cuanto todos sus valores promedios son inferiores a un 10% y la diferencia agregada (DA) se encuentra dentro del rango admisible, sin embargo para el análisis de perfiles, la generalidad de los valores de DA son negativos, por lo que el MDE se encuentra sobreestimado.

Para la generación de redes hídricas mediante el programa Hydrotools es crucial corregir las áreas de depresiones internas, como también las áreas planas que cortan el flujo de agua y conllevan a cálculos hidrológicos con resultados erróneos.

De los resultados obtenidos en le presente estudio se determinó que el centroide del predio posee coordenadas 38°39'32" Sur y 72°35'50" Oeste, en tanto la plaza principal de la ciudad de Temuco esta ubicada en las coordenadas 38°44'26" Sur y 72°35'25", vale decir existe una diferencia de solo 25 segundos hacia el Este con respecto al predio; por otra parte, el centroide de la ciudad se emplaza en las coordenadas 38°44'25" Sur y 72°36'06" Oeste, generando una diferencia de 16 segundos hacia el Oeste. Por lo anterior, se concluye que, en mayor propiedad y contrario a la antigua creencia, el predio se ubica al Norte de Temuco y no al Nor-noroeste de la ciudad.

La superficie del predio asciende a 436,6 ha asimismo, de la curva hipsométrica se concluye que su altitud mediana asciende a 380 msnm, con una cota máxima registrada de 556,3 msnm y una cota mínima de 191,5 msnm.

La mayor concentración de superficie predial de Rucamanque se encuentra en el rango de 300 a 400 msnm involucrando un 68% del total del predio, con una altitud media de 383,5 msnm y con pendientes de terreno variables de 0% a poco más de 100%, concentrando en el segmento 15-45% un total de 233.2 ha equivalentes al 53.4% de la superficie total del predio.

Con el objeto de realizar futuros estudios en el predio, es recomendable materializar, con instrumental topográfico, puntos de control o hitos que permitan generar una red de apoyo de mayor precisión.



## 6 RESUMEN

Una cuenca integra procesos y patrones de los ecosistemas, en donde las plantas y los animales ocupan una diversidad de hábitat generado por variaciones de tipos de suelo, geomorfología y clima en un gradiente altitudinal. En este estudio se planteó como objetivo general la obtención de un modelo hidrológico confiable para la cuenca emplazada en el predio Rucamanque, de propiedad de la Universidad de la Frontera, por cuanto, antes de la ejecución de esta tesis sólo se contaba con cartografía aproximada e inexacta de la representación del emplazamiento y presencia de las quebradas que conforman la red hídrica.

A fin de obtener los resultados que permitieran generar la modelación hidrológica, se realizó una estimación de la localización y longitud de las quebradas que componen la red hídrica, aplicando un muestreo de lista a priori y determinando así, estadísticamente, las quebradas a inventariar en terreno mediante un levantamiento topográfico, controlando de paso líneas estructurales y puntos notables que permitieron amarrar la poligonal de la red hídrica, y su correspondiente compensación de cotas y coordenadas UTM para ser integrado a un Modelo Digital de Elevación (MDE). Mediante el empleo del programa ERDAS se entregaron coordenadas UTM a los puntos destacados y a las líneas estructurales registradas en el levantamiento de terreno.

Posteriormente, mediante una estructura vectorial, formada por una red de triángulos irregulares, se construyeron dos modelos digitales de elevación a partir de curvas de nivel cada 25 y 10 m (TIN-25 y TIN-10), efectuando un análisis comparativo de superficies agregadas según los factores topográficos de exposición, pendiente y altitud de los dos modelos. En función de la mayor cantidad de cotas y menor presencia de áreas planas y por ende mayor exactitud de representación del relieve del terreno, se seleccionó el TIN-10 para generar dos estructuras matriciales RASTER, con tamaños de cuadrículas de 5x5 y de 10x10 metros. En estas, se analizaron nuevamente los mismos factores topográficos, determinando la estructura matricial de mayor similitud con el TIN-10, optándose por la grilla de 5x5m.

A las curvas de nivel y grilla seleccionadas, se les agregó un tercer factor de análisis para generar dos MDE, al primero se le incorpora el levantamiento de terreno de la red hídrica, mediante el método stream burning, obteniendo un MDE mejorado y comparativamente se realiza un MDE denominado sin mejora, por no contar con la incorporación de esta red. A ambos modelos se les aplicaron las funciones de corrección de la herramienta HYDROTOOLS de ARCVIEW, dando como resultado que el MDE mejorado tiene una mayor exactitud, por cuanto se eliminaron en su mayor parte las áreas planas que inducen a errores. Finalmente, se aplicaron las funciones hidrológicas al modelo mejorado, para obtener la modelación hídrica del predio Rucamanque, y a su vez con el MDE mejorado se efectuó un análisis geomorfológico del predio en cuestión. Realizando además, perfiles longitudinales de cada una de las quebradas inventariadas, por cuanto la generación de estos es imprescindible para solucionar el problema de la intervisibilidad, pendiente y desarrollo del cauce.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el área de la cuenca asciende a 377,87 ha, con una pendiente media de 35,08%, una longitud del cauce principal de 2,84 km con una pendiente media de 7,2%. Esta cuenca es caracterizada con un índice de compacidad de 1,2 y una densidad de drenaje de 3,5 km/km. Adicionalmente, se desprende que la superficie total del predio asciende a 436,6 ha. Asimismo, de la curva hipsométrica se concluye que su altitud mediana alcanza los 380 msnm, con una cota máxima registrada de 556,3 msnm y una cota mínima de 191,5 msnm. La mayor concentración de superficie predial de Rucamanque se encuentra en el rango de 300 a 400 msnm, involucrando un 68% del total del predio, con una altitud media de 383,5 msnm y con pendientes de terreno variables de 0% a poco más de 100%.

El método stream burning constituye el mejor procedimiento para incrementar la exactitud de la red de drenaje y por ende también la exactitud del MDE, por cuanto, los MDE sin este mejoramiento acusan terrazas regulares en los perfiles longitudinales que representan los cauces. De lo anterior, se puede inferir que se ha obtenido un modelado hidrológico del predio Rucamanque con un MDE mejorado y a su vez una caracterización geomorfológica, generando de esta forma una línea base para ser empleada tanto en el área hidrológica como también para otros estudios del predio en cuestión.

## 7 SUMMARY

A watershed integrates processes and patterns of the ecosystems, where the plants and the animals occupy a habitat diversity generated by variations of soil types, geomorphology and climate in a gradient. In this study the obtaining of a reliable hydrological model for the watershed located in the Rucamanque area, of property of the University of the Frontera was settled, whereas, before the execution of this thesis only had approximate and inexact cartography of the representation of the location and presence of the stream network.

In order to obtain the results that allowed generate the modeling hydrological, it was carried out an estimate of the localization and longitude of the stream network, applying a list *a priori* sampling and determining this way, statistically, the stream network to inventory in land by means of a topographical rising, controlling structural lines and remarkable points that allowed to tie the polygonal of the hydrology network, and their corresponding compensation of bench marks and coordinated UTM to be integrated a Digital Model of Elevation (DEM). Through of the employment of the program ERDAS coordinated surrendered UTM to the outstanding points and the structural lines registered in the topographical rising, were given.

Later on, by means of a vectorial structure, formed by a net of irregular triangles, were built two digital models of elevation starting from curved of level each 25 and 10 m (TIN-25 and TIN-10), making a comparative analysis of added surfaces according to the topographical factors of aspect, slope and spot of the two models. In function of the biggest quantity in bench marks and smaller presence of plane areas and therefore bigger accuracy of representation of the relief of the land, the TIN-10 was selected to generate two structures matrix RASTER, with sizes of you grid of 5x5 and of 10x10 meters. These, were analyzed the same topographical factors again, determining the structure matrix of more similarity with the TIN-10, being opted for it grid of 5x5m.

To the level curves and its grid selected, were added a third analysis factor to generate two DEM, to the first one it is incorporated the rising topographical of the hydrology network, by means of the method stream burning, obtaining an improved DEM and comparatively a DEM is carried out denominated without improvement, for not having the incorporation of this net. To both models they were applied the functions of correction of the HYDROTOOLS of ARCVIEW, giving as a result that the improved DEM has a bigger accuracy, whereas were eliminated in its biggest part the plane areas that induce to errors. Finally, the hydrological functions were applied to the improved pattern, to obtain the modeling hydrology of the property Rucamanque, and also with the improved DEM an analysis geomorphology of the property was made in question. Also carrying out, profile longitudinal of each one of the inventoried stream network, since the generation of these it is indispensable to solve the problem of the intervisibilidad, slope and development of the stream.

According to the obtained results, the area of the watershed ascends at 377,87 ha. there is, with a half slope of 35,08%, a longitude of the main stream of 2,84 km with a half slope of 7,2%. This watershed is characterized with an index of compactness of 1,2 and a density of drainage of 3,5 Km/Km. Additionally, it comes off that the total surface of the property ascends at 436,6 ha. Also, the hypsometric curve concludes that their medium slop reaches the 380 msnm, with a registered maximum bench mark of 556,3 msnm and a minimum bench mark of 191,5 msnm. The biggest concentration in terrain surface of Rucamanque is in the range from 300 to 400 msnm, involving 68% of the total of the property, with a half altitude of 383,5 msnm and with variable land slopes of 0% not much more than 100%.

The method stream burning constitutes the best procedure to increase the accuracy of the drainage net and therefore also the accuracy of the DEM, therefore, the DEM without this improvement accuses regular terraces in the longitudinal profiles that represent the streams. Of the above, it is conclude that a modeling hydrological one has been obtained of the property Rucamanque with an improved DEM and also a characterization geomorphology, generating this way a line bases used in the hydrological area as well as for other studies of the property in question.

## 8 LITERATURA CITADA

- Ayala, J.** 2001. Simulación y modelamiento de los recursos hídricos de la Cuenca del Río Khenko Mayu. Universidad La Paz. Cochabamba, Bolivia. 76 Pág.
- Chávarri, E.,** 2004. Modelos Matemáticos en Hidrología, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 15 Pag.
- Chow, V., Maidment, D, Mays, L.** 1994. Hidrología Aplicada. Editorial McGraw-Hill Interamericana S. A. Primera edición. Santa fé de Bogota, Colombia. 583 Pág.
- Clarke, R.T.,** 1984. Mathematical models in hydrology, Food and agriculture organization of the United Nations, Roma, Italy. 281 Pág.
- Cox, F.** 1985. Validación de un Modelo Fustal para Pino Radiata. En: Simposio sobre Investigación de *Pinus radiata* en Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Tomo II, pp. 119-133. Valdivia, Chile.
- FAO.**1996. Planificación y ordenación de cuencas hidrológicas con ayuda de computadores. Roma. 94 Pág.
- Felicísimo, A. M.** 1994. Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones. Oviedo, España. 222 Pág.
- Fleming, G.,** 1979. Deterministic models in hydrology, Food and agriculture organization of the United Nations, Roma Italy. 79 Pág.
- Freund, J.,Walpole, R.,**1990.Estadística matemática con aplicaciones. Cuarta edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. Juarez, Mexico. 622 Pág.
- Guerra, F. y González, J.** 2002. Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, estado táchira, Venezuela. Geoenseñanza. Vol.7-2002. p.88-108.
- Hernández, O., Cobos, C. Ortiz, A. Méndez, J.** 2003. Valoración Económica del servicio Ambiental de Regulación Hídrica del Lado Sur De La Reserva De Las Biosfera Sierra De Las Minas, Guatemala. Fipa-AID. Guatemala. 13 Pág.
- Higuera, C.** 1994. Funciones de Volumen y Ahusamiento para Roble y Hualo. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 93 p.
- Husch, B.; Miller, C. Y Beers, T.** 1972. Forest Mensuration. The Ronald Press Company. Segunda Edición. New York, USA. 409 p.

- INFORA.** 1996. Ajuste y prueba de Modelos Fustales y de Volumen para Pino Oregon y Pino Ponderosa en la Provincia de Coyhaique. INFORA Estudios - Instituto Forestal. 13 p.
- Jara, M.** 2001. Delimitación del área de influencia biofísica del predio Rucamanque (IX Región de La Araucanía). Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de La Frontera. Temuco, Chile. 99 pag.
- Joly, F.** 1988. La Cartografía. Colección ¿Qué se?. Nueva Serie. Ediciones Oikos-tau S.A. Barcelona, España. 133 Pág.
- Kenny, F. y Matthews B.** 2005. A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers & Geosciences* 31 (2005) 768–779.
- Lacroix, M., Martz, L., Kite, G., Garbrecht, J.** 2001. Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model. *Environmental Modelling & Software* 17 (2002) 127–136.
- Magofke, J.** 1985. Rucamanque: Un relicto de Bosque Nativo en Temuco, Chile. *Revista Frontera. Chile.* 4:65-72.
- Maldonado, O., Palacios, O., Oporeza, J., Springall, R., Fernández D.** 2001. Empleo del Modelo Swrb para generar alternativas de Manejo en La Cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia. (Guatemala).* 35 (3):335-345.
- Mena, C.; Berrios, H.; Gajardo, E.; Ormazabal, M.** 2003. Aplicación de la fotointerpretación y su integración a los sistemas de información geográfica en el ámbito forestal. Precordillera Andina de la Región del Maule, Chile. En *Teledetección y Desarrollo Regional*. Pérez U, R.; Martínez C, P, 2003. X Congreso Nacional de Teledetección., Primera edición Cáceres, España. 209-212 Pág.
- Miller, S., Guertin, P., Goodrich, D.** 1996. Investigating stream channel morphology using a Geographic Information System. *ESRI International User Conferences.*
- MOP. 1992. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).** Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Serie monografías. 809 Pag.
- MOP. 1983.** Ministerio de Obras Publicas. Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras. Volumen 2. Santiago, Chile.
- MOP. 2001.** Ministerio de Obras Publicas, Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras. Volumen 2. Santiago, Chile.
- MOP. 2002.** Ministerio de Obras Publicas, Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras. Volumen 3. Santiago, Chile.

- Muñoz E.** 1998. Sistema de simulación hidrológica para el cálculo de la avenida de proyecto. Convenio LHUMSS – PROMIC. Serie Estudios Hidrológicos, Publicación n° 17 p. Cochabamba, Bolivia.
- Murray, R.** 1993. Estadística. Segunda edición, McGraw-Hill. Madrid, España. 556 Pág.
- Navarro, R.** 1995. Ecuaciones de Volumen con Diámetros en Altura. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 29 p.
- Ortiz, O.** 2004. Hidrored, Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía.(Perú).1(2-7).
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M.**1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. In: Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, o.28, p. 323-344.
- Pedraza, J.** 1996. Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones. Rueda. Madrid, España. 414 p.
- Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F.; Real, P.** 1997. Mensura Forestal. IICA. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Costa Rica. 586 p.
- Ramírez, C; San Martín, J.; Hauenstein, E. y Contreras, D.**1989. Estudio Fitosociológico de la vegetación de Rucamanque, (Cautín, Chile). Estudio Botánica 8:91-115
- Riddell, R. y Hidalgo, P.** 2001. Fundamentos de Ingeniería Estructural para estudiantes de Arquitectura. Primera edición, Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.564 p.
- Ruiz, M.** 1998. Manual de Geodesia y Topografía. Segunda edición. Proyecto Sur de ediciones, S.L. Granada. España. 553 Pag.
- Salas, C.** 2001. Caracterización básica del Relicto de Biodiversidad Rucamanque. Revista Bosque Nativo. Valdivia, Chile. 29:3-9.
- Saunders, W.** 1999. Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis. ESRI User Conference July 24-30, 1999 San Diego, California
- Sánchez, M., Pardo J., Porres de la Haza, M., Palomar, J.** 2003 Determinación automática de laderas a partir de un modelo digital de elevaciones Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría Universidad Politécnica de Valencia. 12 Pág.
- Schäuble H.,** 2003. Hydrotools 1.0 for ArcView 3.x - Hydrological analyses with single-flow und multiple-flow algorithms. Institute of Applied Geosciences, Technical University of Darmstadt, GERMANY.

- Scheel, C.** 1998. Modelación de la dinámica de ecosistemas. Edición Trillas, México. 276 Pág.
- Senciales, J.** 1998. El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. *Norba*, , pp. 183.
- Strahler, A.N.** 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V.T. (Ed.): Handbook of applied hydrology. 4-39/4-76.
- Tarboton, D. y Ames, D.** 2001. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. Presentado en congreso the World Water and Environmental Resources. 10 Pág.
- Morad, M. y Triviño, A.** 2001. Sistema de información geográfica y modelaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. Boletín de la A.G.E. N° 31-2001, Pág. 23-46.
- Wengen, K.** 1984. Forestry Handbook. Wiley-intersciencia. Second edition. Washington, Estados Unidos. 1335 Pág.



## 9 ANEXOS

**Anexo 1:** Tabla de Rangos de Exposición.

<b>Exposición</b>		<b>Rango (°)</b>
<b>Orientación</b>	<b>Sigla</b>	
Áreas Planas	A. Planas	0
Norte	N	337,5 - 22,5
Noreste	NE	22,5 - 67,5
Este	E	67,5 - 112,5
Sureste	SE	112,5 - 157,5
Sur	S	157,5 - 202,5
Suroeste	SO	202,5 - 247,5
Oeste	O	247,5 - 292,5
Noroeste	NO	292,5 - 337,5

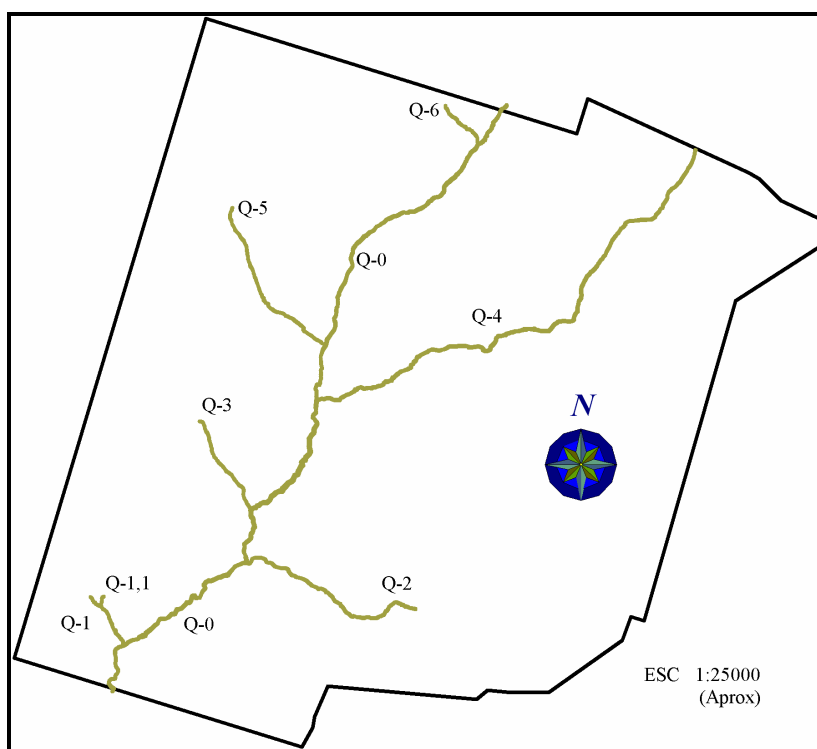
**Anexo 2:** Tabla de Rangos de Altitud.

<b>Rango de Altitud (m)</b>
150 - 200
200 - 250
250 - 300
300 - 350
350 - 400
400 - 450
450 - 500
500 - 550
550 - 600

**Anexo 3:** Tabla de Rangos de Pendiente.

<b>Rango de Pendiente (%)</b>
0
0 - 15
15 - 30
30 - 45
45 - 60
60 - 100
100+

**Anexo 4:** Levantamiento de quebradas y numeración dada en terreno



**Anexo 5** Tabla que presenta el resumen de atributos por cuenca.

<b>Id</b>	<b>Cuenca Nº</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Perímetro (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Factor de Forma</b>	<b>Altitud (m)</b>
3	1	265.175	2.610	620,7	1,43	515,5
8	2	222.125	2.800	455,3	1,68	450,9
9	3	144.800	2.250	564,5	1,67	520,3
10	4	318.575	3.670	860,6	1,83	505,8
11	5	108.500	2.050	480,1	1,76	454,9
12	6	342.200	3.570	743,1	1,72	401,5
14	7	126.400	2.190	564,6	1,74	383,6
15	8	119.750	1.930	558,5	1,57	484,9
18	9	171.350	2.490	468,8	1,70	415,2
20	10	131.200	2.130	371,0	1,66	361,9
21	11	177.875	2.990	706,4	2,00	436,8
22	12	10.825	1.160	107,3	3,14	323,7
23	13	48.150	1.970	125,0	2,53	327,1
24	14	232.350	3.060	942,7	1,79	399,9
25	15	104.950	2.030	311,9	1,77	331,7
27	16	192.775	2.530	742,2	1,62	342,5
29	17	81.600	1.530	92,0	1,51	336,1
31	18	51.425	1.990	161,0	2,47	300,3
33	19	165.125	2.420	675,6	1,68	315,3
36	20	39.575	1.830	161,3	2,59	275,9
37	21	167.600	2.700	420,6	1,86	280,3
38	22	74.325	1.760	340,5	1,82	296,6
39	23	212.625	2.680	806,4	1,64	415,2
40	24	148.025	2.200	625,3	1,61	349,8
42	25	163.275	2.370	466,8	1,65	336,0
44	26	111.650	1.890	520,9	1,60	391,5
46	27	107.475	1.710	421,4	1,47	301,5
47	28	22.525	1.340	103,3	2,52	248,3
48	29	248.375	2.840	483,5	1,61	255,2
52	30	296.475	3.480	682,3	1,80	280,7
56	31	39.625	1.330	273,7	1,88	201,1

## 10 GLOSARIO

### **Archivo shape** (shapefile de arcview)

Un formato de almacenamiento de vector de datos para almacenar la localización, forma y atributos de elementos geográficos. Un archivo shape esta almacenado en una carpeta y contiene una sola clase de elementos.

### **Artefacto**

Concavidades en todas direcciones.

### **Atributo**

Una característica de un elemento de un mapa. Los atributos de un río incluyen su nombre, longitud, profundidad promedio, etc.

### **Capa (layer)**

Una colección de elementos geográficos similares – tales como ríos, lagos, países o ciudades – de un lugar o área particular para ser desplegado sobre un mapa. Una capa referencia datos geográficos almacenados en una fuente de datos, como por ejemplo una cubierta, y define como se debe desplegar.

### **Celda**

Una unidad discretamente uniforme – como un metro cuadrado o milla cuadrada – que representa una porción de la tierra en un raster. Una celda tiene un valor que corresponde al elemento o característica en ese sitio, como por ejemplo, tipo de suelo, distrito censal o altitud.

### **Clase de elementos**

1. Una clasificación que describe la forma de los elementos geográficos y mantiene sus datos en una cubierta. Las clases de elementos de las cubiertas para representar los elementos geográficos

incluyen puntos, arcos, nodos, sistema-ruta, ruta, sección, polígono y región. Uno o más elementos de coberturas son utilizados para modelar elementos geográficos: por ejemplo, arcos y nodos pueden ser utilizados para modelar elementos lineales tales como líneas centrales de calles. Los clases de elementos tic, anotaciones, enlaces y límites entregan datos de soporte para manejo y visualización de datos de cubiertas.

2. La representación conceptual de un elemento geográfico. Cuando se refiere a elementos geográficos, las clases de elementos incluyen punto, línea, área y superficie. En una base de datos geográfica, una clase de objeto que almacena elementos y tiene un campo de tipo de geometría en una base de datos geográfica.

### **Cubierta**

Un formato de almacenamiento de datos vectoriales para almacenar localización, forma y atributos de elementos geográficos. La cubierta es uno de los formatos de almacenamiento vectorial primarios para ArcInfo. Las cubiertas son almacenadas en un espacio de trabajo ArcInfo.

### **Elemento**

Una representación de un objeto del mundo real en un layer (capa) sobre un mapa.

### **Fuente de datos**

Cualquier dato geográfico como una cubierta, archivo shape de Arcview, raster o base de datos geográfica.

### **Georeferencia**

El proceso de definir como los datos raster están situados en coordenadas de mapa. Los datos raster georeferenciados permiten que sean visualizados, consultados y analizados con otros datos geográficos.

**Grilla (grid)**

Una representación del mundo en un arreglo de igual tamaño de celdas cuadradas ordenadas en filas y columnas. Cada celda de la grilla esta referenciada mediante su localización geográfica x,y. Ver raster.

**Imagen**

Representa elementos geográficos mediante división del mundo en celdas llamadas cuadrados discretos. Los ejemplos incluyen fotografías aéreas y satelitales, documentos escaneados y fotografías confeccionadas. Ver raster.

**MDE**

Un Modelo Digital de elevación es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

**MDT**

Un Modelo Digital del Terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Son, por lo tanto, modelos simbólicos ya que las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto real tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. La denominación MDT es la genérica para todos los modelos digitales.

**No Data**

Igual que valor nulo, pero especificado para raster.

**Raster**

Representa cualquier fuente de datos que utiliza una estructura de grilla para almacenar información geográfica. Ver grilla e imagen.

**Sistema de Coordenadas**

Un método para especificar la localización de elementos del mundo real sobre la superficie de la tierra.

**Tabla de atributos**

Información sobre elementos en un mapa, almacenado en filas y columnas. Cada fila está relacionada a un elemento individual; cada columna contiene los valores para una característica específica.

**TIN**

Red irregular triangulada (*triangulated irregular network*). Una estructura de datos que representa una superficie continua a través de una serie de puntos espaciados irregularmente con valores que describen la superficie en esos puntos (por ejemplo, altitud). Desde esos puntos, una red de triángulos enlazados forma la superficie.

**Valor nulo**

Ausencia de un valor. Un elemento geográfico para el cual no hay asociada información del atributo.