



UNIVERSIDAD DE CHILE

Programa Interfacultades

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

**ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CRECIMIENTO URBANO
SOBRE ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN LA PROVINCIA DE CHACABUCO,
REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO, CHILE**

Tesis para optar al grado de Magíster en
Gestión y Planificación Ambiental

Pablo Norambuena Vega

Director de Tesis:

Hugo Romero Aravena

Santiago, CHILE

2009



UNIVERSIDAD DE CHILE
PROGRAMA INTERFACULTADES
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

**ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CRECIMIENTO URBANO
SOBRE ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN LA PROVINCIA DE CHACABUCO,
REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO, CHILE**

Pablo Norambuena Vega

Director de Tesis:

Prof. Hugo Romero Aravena

Presidenta Comisión:

Prof. Carmen Luz de la Maza Asquet

Profesores Informantes:

Jaime Hernández Palma

Cristián Henríquez Ruiz

Santiago, CHILE

2009

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
INTRODUCCIÓN	1
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1 Antecedentes sobre crecimiento urbano y su relación con cambios en el ciclo hidrológico	3
1.2 Implicancias ambientales del cambio en el balance hídrico en la Provincia de Chacabuco	8
1.3 Definición del problema	11
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	13
2.1 Objetivos.....	13
2.1.1 Objetivo general.....	13
2.1.2 Objetivos específicos	13
2.2 Hipótesis.....	13
2.2.1 Hipótesis general	13
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Caracterización de las superficies impermeables.....	15
3.2 Método de reconocimiento de las superficies impermeables	18
3.3 Impactos asociados a las superficies impermeables	21
3.3.1 Impermeabilidad y escurrimiento superficial	21
3.3.2 Impermeabilidad y forma de los cauces.....	23
3.3.3 Impermeabilidad y calidad de aguas.....	24
3.3.4 Impermeabilidad y calentamiento de cauces	26
3.3.5 Impermeabilidad y biodiversidad de cauces	28
3.3.6 Impermeabilidad e impacto en otros cuerpos de agua.....	29
3.3.7 Impactos económicos	32

3.4	Indicadores de impermeabilidad.....	33
3.5	Impacto de las superficies permeables.....	34
3.6	Efecto de las estrategias de mitigación	36
3.7	Modelos de simulación de cambio de coberturas.....	38
4	MATERIALES Y MÉTODO.....	39
4.1	Área de estudio	39
4.2	Materiales	39
4.3	Método.....	39
4.3.1	Pretratamiento de imágenes satelitales	39
4.3.2	Fotointerpretación y clasificación de usos del suelo	40
4.3.3	Modelo de simulación espacial	41
4.3.4	Evaluación y proyección del coeficiente de escorrentía superficial.	47
4.3.5	Métrica de paisajes y pérdida de suelos agrícolas.....	50
5	RESULTADOS	51
5.1	Área de estudio	51
5.2	Coberturas de suelos.....	51
5.3	Áreas impermeables.....	65
5.3.1	Áreas Totales Impermeables	65
5.3.2	Áreas Efectivas Impermeables	67
5.4	Pérdida de suelos.....	68
5.5	Simulaciones de uso del suelo	70
5.6	Proyección de pérdida de suelos.....	71
5.7	Proyección del balance hídrico	73
5.7.1	Escorrentía.....	73
5.7.2	Retención.....	80
5.8	Parches vegetales	81
5.8.1	Superficie total	81
5.8.2	Número de parches de vegetación natural	84
5.8.3	Tamaño promedio de parches de vegetación natural	86
5.8.4	Perímetro de parches de vegetación natural	87

5.8.5	Relación Perímetro / Superficie de parches de vegetación natural.	89
5.8.6	Interpretaciones de las variables de métrica de parches vegetales naturales	90
6	DISCUSIÓN.....	92
7	CONCLUSIONES	101
8	RECOMENDACIONES.....	104
9	LITERATURA CITADA	105
	ANEXO 1. Variables de las correcciones radiométricas de imágenes Landsat	119
	ANEXO 2. Plano Regulador Metropolitano de Santiago	120
	ANEXO 3. Grupos Hidrológicos de Suelos	122
	ANEXO 4. Isoyetas precipitación máxima en 24 horas.....	124
	ANEXO 5. Criterios para la clasificación de suelos en Grupos Hidrológicos .	126
	ANEXO 6. Matrices de cambio de coberturas del suelo	127
	ANEXO 7. Superficies de coberturas de suelos según cuencas.....	131
	ANEXO 8. Desagregación de Áreas Efectivas Impermeables (AEI).....	134
	ANEXO 9. Resultados de métrica de paisajes.....	138
	ANEXO 10. Valores de las variables de métrica de paisajes.....	141

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Relación del uso de suelo/cobertura de la tierra con el porcentaje de área total impermeable (ATI) y área impermeable efectiva (AIE) en la cuenca de Green Cove.....	18
Cuadro 2. Principales fuentes de contaminantes que causan deterioro en los ríos, lagos y estuarios (USEPA, 2000)	30
Cuadro 3. Tipología de usos y coberturas de suelo.....	45
Cuadro 4. Clasificación de rangos de cobertura vegetal.....	45
Cuadro 5. Ponderaciones de aptitud según cobertura o uso del suelo y factores para el uso urbano.....	46
Cuadro 6. Curvas número según tipo de cobertura del suelo.....	49
Cuadro 7. Cuencas hidrográficas en el área de estudio, cauces asociados y superficies.....	53
Cuadro 8. Superficies según cobertura del suelo, años 1989, 1998, 2003 y 2007	55
Cuadro 9. Cambio anual de superficies según cobertura del suelo, años 1989, 1998, 2003 y 2007	55
Cuadro 10. Proporción de superficie por categoría y tasa de cambio según cuenca en el periodo 1989 – 2007.....	66
Cuadro 11. Proporción Áreas Totales Impermeables (ATI) según cuenca en el periodo 1989 – 2007	67
Cuadro 12. Superficies según Clase de Capacidad de Uso ocupadas por Áreas Residenciales e Industriales en el periodo 1989 – 2007.....	68
Cuadro 13. Superficies según Grupo Hidrológico de suelos ocupadas por Áreas Residenciales e Industriales en el periodo 1989 – 2007.....	69
Cuadro 14. Superficies según Grupo Hidrológico de suelos ocupadas por Áreas Residenciales e Industriales en el periodo 1989 – 2007 desagregadas en ATI y AEI.....	69
Cuadro 15. Resultados de concordancia espacial para el año 2007	70
Cuadro 16. Distribución de superficies según cobertura y cuenca para los años	

2007, 2016 y 2025	76
Cuadro 17. Distribución de superficies de cultivos, áreas residenciales e industriales según cuenca para los años 2007, 2016 y 2025	77
Cuadro 18. Proporción de ATI según cuenca para los años 2016 y 2025	77
Cuadro 19. Superficie de suelos ocupados por ATI según Grupo Hidrológico para los años 2016 y 2025.....	78
Cuadro 20. Superficie de suelos de aptitud agrícola ocupadas por ATI según Clase de Capacidad de Uso en los periodos 2007 - 2016 y 2007 - 2025 ..	78
Cuadro 21. Proporción de suelos de aptitud agrícola ocupadas por ATI según Clase de Capacidad de Uso en los periodos 2007 - 2016 y 2007 - 2025 ..	79
Cuadro 22. Valores de las variables Escorrentía (Q) y Pérdidas (L), según cuenca para los años 2007, 2016 y 2025.	80
Cuadro 23. Superficies de vegetación natural según cuenca, año de clasificación y de simulación de uso del suelo.....	83
Cuadro 24. Suma de perímetro de parches de vegetación natural según tipo de cobertura vegetal y cuenca.....	88
Cuadro 25. Matriz de cambio de superficies años 1989 - 1998	128
Cuadro 26. Matriz de cambio de superficies años 1989 - 2003	128
Cuadro 27. Matriz de cambio de superficies años 1989 - 2007	129
Cuadro 28. Matriz de cambio de superficies años 1998 - 2003	129
Cuadro 29. Matriz de cambio de superficies años 1998 - 2007	130
Cuadro 30. Matriz de cambio de superficies años 2003 - 2007	130
Cuadro 31. Superficies de coberturas del suelo según cuenca, año 1989	132
Cuadro 32. Superficies de Uso y cobertura del suelo según cuenca, año 1998	132
Cuadro 33. Superficies de Uso y cobertura del suelo según cuenca, año 2003	133
Cuadro 34. Superficies de Uso y cobertura del suelo según cuenca, año 2007	133
Cuadro 35. Superficies de Áreas Efectivas Impermeables (AEI) según cuenca en el periodo 1989 – 2007	135

Cuadro 36. Superficie de Áreas Efectivas Impermeables (AEI) según proporción impermeable y cuenca en el periodo 1989 – 2007 para Áreas Residenciales	136
Cuadro 37. Superficies de Áreas Efectivas Impermeables (AEI) según proporción impermeable y cuenca en el periodo 1989 – 2007 para Áreas Industriales	137
Cuadro 38. Superficies de vegetación natural según cuenca, tipo de vegetación, año de clasificación y de simulación de coberturas del suelo.....	138
Cuadro 39. Número de fragmentos según tipo de cobertura de vegetación natural y cuenca	139
Cuadro 40. Tamaño promedio de parches de vegetación natural según categoría y cuenca.	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impactos de las cubiertas impermeables sobre el ciclo hidrológico...	22
Figura 2. Relación entre la degradación de un cauce y el porcentaje de impermeabilización de una cuenca (modificado de Arnold y Gibbons, 1994)	34
Figura 3. Cuencas hidrográficas en el área de estudio.....	54
Figura 4. Coberturas de uso de suelo. Año 1989.....	56
Figura 5. Coberturas de uso de suelo. Año 1998.....	57
Figura 6. Coberturas de uso de suelo. Año 2003.....	58
Figura 7. Coberturas de uso de suelo. Año 2007.....	59
Figura 8. Superficies según categorías, periodo 1989 - 2007.....	60
Figura 9. Áreas de Pérdida, Mantención y Ganancia de Superficies de Cultivos entre 1989 y 2007.....	61
Figura 10. Áreas de Expansión Urbana entre 1989 y 2007.....	62
Figura 11. Áreas de Expansión asociadas a Minería entre 1989 y 2007.....	63
Figura 12. Comparación de áreas de Bosque Esclerófilo y Vegetación densa entre 1989 y 2007.....	64
Figura 13. Coberturas de uso de suelo. Simulación año 2016.....	74
Figura 14. Coberturas de uso de suelo. Simulación año 2025.....	75
Figura 15. Plano Regulador Metropolitano de Santiago, Extensión Provincia de Chacabuco.....	121
Figura 16. Grupos Hidrológicos de Suelos.....	123
Figura 17. Isoyetas precipitación máxima en 24 horas.....	125

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en el desarrollo y análisis de un modelo de simulación de cambio de uso de suelo para la cuenca de los esteros Lampa y Colina, Comunas de Colina, Lampa, y Til Til, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana de Santiago. Sobre las clasificaciones de coberturas de suelos para los años 1989, 1998, 2003 y 2007, utilizando imágenes Landsat, se realizaron simulaciones para los años 2016 y 2025, considerando como factores de forzamiento y restricción lo establecido en el Plano Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) como áreas urbanizables, las clases de Capacidad de Uso de los suelos y su pendiente, y las tendencias de cambio observadas en el periodo. Sobre la base de los resultados, se modeló el crecimiento de las áreas impermeables producto de la urbanización y sus efectos sobre las variables escorrentía e infiltración.

Como impactos directos de la expansión urbana, se obtuvo en el área de estudio, un aumento de la escorrentía para precipitaciones máximas en 24 horas de 0,74% al año 2016 y de 1,90% al año 2025. En las cuencas de Colina Bajo y Lampa definidas en este estudio, se proyectan aumentos de las áreas urbanas de 5,61% y de 2,27% al año 2025, con aumentos de escorrentía de 2,43% y de 1,47% respectivamente. Esto se asocia a la elevada proporción de suelos del Grupo Hidrológico A (altas capacidades de infiltración) que serían ocupados por superficies urbanas. Complementariamente, la retención de agua al interior de las cuencas disminuye.

Adicionalmente se realizaron medidas de métrica de paisajes, determinando superficie, tamaño promedio, perímetro y otras relaciones sobre los parches de vegetación natural. Como resultado se obtiene una pérdida de áreas de vegetación de alta cobertura (Bosques y Vegetación Densa), en zonas de alta pluviometría, pérdidas que estarían asociadas al desarrollo de áreas urbanas.

SUMMARY

This research focuses on the development and analysis of a simulation model for a change in land use of the Lampa and Colina rivers watershed, Districts of Colina, Lampa, and Til Til, Chacabuco Province, Metropolitan Region of Santiago. Based on the land use classifications for the years 1989, 1998, 2003, and 2007, using Landsat images, simulations of land use were carried out for the years 2016 and 2025, taking into consideration that established in the Santiago Metropolitan Zoning Plan as forcible and restrictive factors, the Land Use capacities, and the observed trend of change, to predict the effects on the runoff and infiltration. This approach was applied to the hydrographic watersheds in the study area.

As direct impacts of urban expansion, the results of the projection obtained an increase of the run-off for maximum rainfall in 24 hours of 0.74% by the year 2016 and of 1.90% by the year 2025. In these watersheds, increases of 5.61% and of 2.27% are projected by the year 2025, with 2.43% and 1.47% increases of run-off, respectively. This is associated to the elevated proportion of land in the Hydrological Group A (high infiltration capacities) that would be occupied by urban surfaces. Complementarily, the water retention inside the watersheds decreases.

In addition metric measurements of landscapes were made, determining surface area, average size, perimeter, and other measurements of the patches of natural vegetation. As a result, a loss of high coverage vegetation areas is obtained (Woodland and Dense Vegetation), in zones of greater rainfall, associated to the development of urban areas.

INTRODUCCIÓN

Los efectos ambientales relacionados con el crecimiento urbano no planificado son mencionados por diversos autores. Entre ellos se mencionan la pérdida de suelos agrícolas y la alteración de la escorrentía superficial (Henríquez y Azócar, 2007; Romero y Vásquez, 2005), debido a que las superficies urbanas se consideran hidrológicamente activas cuando reemplazan áreas de infiltración y conducen la escorrentía directamente a las redes de drenaje natural.

Se han observado cuatro aspectos que permiten considerar la impermeabilización como un indicador de la calidad ambiental de una cuenca; existe una relación clara entre impermeabilización y cambios hidrológicos que degradan la calidad de las aguas; las superficies impermeables son una característica de la urbanización; las superficies impermeables evitan el procesamiento en el suelo de los contaminantes debido a que no permiten la percolación; y las superficies impermeables conducen directamente los contaminantes a las redes de drenaje y cuerpos de agua superficiales (Arnol y Gibbons, 1994).

En este contexto, surge la necesidad de investigar sobre la distribución y proyección de los usos del suelo que inciden en la impermeabilización.

Considerando que la ciudad de Santiago presenta un desarrollo urbano de formas extendidas y fragmentadas (Salazar, 2007), la regulación impuesta por los instrumentos de planificación territorial, específicamente el Plano Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), y contando con antecedentes que indican que la expansión urbana de la ciudad de Santiago se produce preferentemente sobre suelos de uso agrícola, se prevé un cambio importante en el balance hídrico de las cuencas del norte de la ciudad de Santiago. En consecuencia, el comportamiento de las cubiertas vegetales tiene relevancia en el ciclo hidrológico, a través de su incidencia en la conservación de suelos con

capacidades de infiltración y retención de agua (Brezonik y Stadelmann, 2007).

El propósito del presente trabajo es evaluar, en la Provincia de Chacabuco, el cambio de coberturas de suelos en el periodo 1989 – 2007, de tal forma de contar con antecedentes que permitan proyectar, a través de modelos de simulación, escenarios futuros de cambios y estimar los efectos en el balance hídrico en un enfoque que considere las cuencas hidrográficas. Dado que se prevén importantes expansiones de las áreas urbanas en la Provincia, la generación de antecedentes en estas áreas del conocimiento, puede aportar positivamente al análisis del territorio, contribuyendo a la gestión y planificación ambiental.

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes sobre crecimiento urbano y su relación con cambios en el ciclo hidrológico

La urbanización ha transformado los paisajes naturales alrededor del mundo, lo que inevitablemente ha producido efectos en la estructura, función y dinámica de los sistemas ecológicos en una amplia gama de escalas. En concreto, las transformaciones de la tierra asociadas a la expansión urbana pueden afectar significativamente la biodiversidad, flujos energéticos, ciclos biogeoquímicos y condiciones climáticas a escala local y regional (Silva y Pla, 2006; Luck y Wu, 2002; McDonnell *et al.*, 1997). En este contexto, efectos relacionados con el crecimiento urbano son mencionados por diversos autores, entre ellos la pérdida de suelos agrícolas, la alteración de la escorrentía superficial, y una acentuación de la segregación socioespacial (Henríquez y Azócar, 2007; Romero y Vásquez, 2005).

Esfuerzos crecientes se han realizado para entender los procesos, tendencias y causas del cambio de uso de la tierra y de sus consecuencias ecológicas. Identificar las causas primarias y estimar los procesos y tendencias del cambio de uso del suelo es crucial para el planeamiento, la utilización de los recursos regionales y la gestión del medio ambiente (Luo *et al.*, 2007; Romero y Vásquez, 2005). Uno de los aspectos relevantes en la expansión de la urbanización tiene relación con los espacios periurbanos, los cuales son considerados atractivos, competitivos y estratégicos para el futuro de las aglomeraciones urbanas (Salazar, 2007).

De acuerdo con datos del censo de 2002, Chile es uno de los países más urbanizados de Latino América, con un 86,7% de población urbana, en donde las áreas metropolitanas de Santiago, Valparaíso - Viña del Mar y Concepción concentran más del 50% de la población urbana nacional. (Henríquez *et al.*,

2006), concentrando la ciudad de Santiago, por sí sola el 43% de la población total del país (Romero y Vásquez, 2005).

Investigaciones de Romero *et al* (2007), indican que el crecimiento urbano observado para la ciudad de Santiago, presenta un tasa creciente de urbanización que llega a 1.750 ha/ año entre los años 1998 y 2004, duplicando su superficie desde el año 1975. Indican, que se advierte una disociación entre el crecimiento espacial de la ciudad y las tendencias demográficas, que señalan un crecimiento lento y escaso de la población, y estiman que las demandas de crecimiento espacial de bajas densidades se acentuarán sobre la base de un modelamiento predictivo que pronostica una superficie urbanizada de 90.000 ha aproximadamente hacia el año 2020. En este contexto, Salazar (2007) indica que el crecimiento de la ciudad de Santiago se asocia, más que a una explosión demográfica, a cambios en las movilidades residenciales internas y a la concepción de una planificación urbana vinculada a formas extendidas y fragmentadas.

Según Naranjo (2007), a partir de 1980 la periferia de la ciudad de Santiago ha cambiado su vocación, desde una función residencial a una multifuncional, que ha implicado pasar desde una gestión conducida por instrumentos formales de planificación a una desregulación casi total. Este cambio, habría sido catalizado, según plantea la autora, por la eliminación del límite urbano, dada la derogación del Decreto Supremo 420 y por la promulgación del Decreto Ley 3.516 sobre subdivisión de predios rústicos, que dieron lugar a una ciudad informal o extraoficial en torno a las áreas urbanas. El DS 420 del MINVU se relaciona con la Política Nacional de Desarrollo Urbano aprobada en 1979, que asume el suelo como un bien transable en el mercado, sin considerar sus aptitudes y limitaciones, y tanto los suelos urbanos como rurales con potencialidad urbana dejan de estar sujetos a planificación, regulándose por las condiciones del mercado. El Decreto Ley 3.516 sobre subdivisión de predios rústicos, en la práctica permite una suburbanización de baja densidad, ya que usualmente se

destinan los predios acogidos a este decreto a un uso residencial de baja densidad bajo la forma de “parcelas de agrado” (Naranjo, 2007). Esta falta de protección de los espacios rurales ha originado un crecimiento extraoficial de la ciudad de Santiago sobre suelos de uso agrícola (Castro, 2006).

Como factores de crecimiento urbano, Romero *et al* (2007) identificaron que la densidad de población es la variable que más contribuye a explicar las áreas de crecimiento de la ciudad de Santiago, mientras que otras variables como la distancia a ejes viales y distancia a centros urbanos aportan escasamente como factores de expansión en espacios periurbanos. Esto concuerda con los resultados de Reilly *et al* (2003) en una cuenca de New Jersey (EE.UU), quienes obtienen un buen nivel de predicción de urbanización, basándose en densidades de población en áreas con alto grado de urbanización, y mayores errores en áreas rurales con menor desarrollo.

La urbanización es una forma rápida de cambio de uso del suelo (Paul y Meyer, 2001), mayor que los procesos naturales de pedogénesis (Castro, 2007). De esta forma, con la expansión de las edificaciones y las redes viales se produce la pérdida de suelos con usos productivos y con funciones de regulación del balance de aguas en cuencas hidrológicas. Bormann *et al* (2007) indican los procesos del balance hídrico alterados por la urbanización: intercepción de precipitaciones por la vegetación, evapotranspiración, infiltración, generación de escurrimientos, percolación, y capilaridad. Castro (2007) utilizando el método de la curva número indica una disminución de la capacidad de infiltración de los suelos en las comunas de San Bernardo, Puente Alto, Quilicura y Huechuraba.

El método de la curva número considera implícitamente las relaciones entre uso del suelo y características de los suelos, como textura, estructura, pendiente, drenaje y condiciones limitantes del perfil (Bormann *et al*, 2007; Castro, 2007).

El incremento de las áreas impermeables, se relaciona con la disminución de la infiltración, el incremento del escurrimiento y la disminución del tiempo durante el cual ocurren los escurrimientos, contribuyendo al deterioro de la calidad de las aguas, la biodiversidad y estabilidad de los cauces (Brezonik y Stadelmann, 2007), de tal forma que ha sido reconocida la proporción de superficies impermeables como un indicador del estado de calidad o salud de las cuencas hidrográficas, calidad de aguas y estado general de los ecosistemas (Schueler, 1994). Desde el punto de vista de la hidrología, el cambio del balance entre superficies permeables e impermeables causa impactos significativos en la cantidad y calidad de los escurrimientos, entendidos como una degradación de los cauces y de las cuencas, en la medida que un incremento de la cantidad de escurrimiento supera la capacidad de los primeros para absorber sedimentos a la vez que aumenta la carga de contaminantes (Brabec *et al*, 2002). Estos autores añaden que la determinación de la tendencia de la impermeabilidad de la cuenca puede no ser la variable más importante, ya que la localización de las superficies impermeables puede tener impactos mucho más significativos en la calidad de las aguas que el aumento de las superficies impermeables. De esta forma, Arnold y Gibbons (1996) definen cuatro cualidades de la impermeabilización que permiten considerarla como un indicador de calidad ambiental:

- i. Las superficies impermeables no generan contaminación directamente. Sin embargo, una relación clara ha sido demostrada entre impermeabilización y degradación de la calidad de las aguas.
- ii. Las superficies impermeables son una característica de la urbanización.
- iii. Las superficies impermeables evitan el procesamiento en el suelo de los contaminantes debido a que no permiten la percolación.
- iv. Las superficies impermeables conducen directamente los contaminantes a las redes de drenaje y cuerpos de agua superficiales.

Romero, Vásquez y Souza (2005) investigando efectos asociados a patrones de crecimiento urbano en Valparaíso, demostraron que los cambios ambientales generados por el crecimiento del área urbana de la ciudad en el periodo 1989 - 2003, representan una disminución importante de la calidad del ambiente, particularmente en términos de reducción de sus funciones y servicios.

Moscoso (2007) estudiando cambios en los usos y coberturas de suelos y sus efectos sobre la escorrentía urbana en Valparaíso y Viña del Mar, indica que las tasas de impermeabilización y los coeficientes de escorrentía han aumentado significativamente en cuencas urbanizadas durante el periodo 1980-2005, debido a una ocupación de áreas preferentemente naturales, lo que implicó una disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de cabecera de las cuencas.

Cabe destacar la importancia de la caracterización de las superficies impermeables. Al respecto, se establece una diferencia entre Áreas Totales Impermeables (ATI) y Áreas Impermeables Efectivas (AIE). Las ATI corresponden al conjunto de superficies impermeabilizadas, mientras que las AIE consideran si la superficie impermeable está directamente conectada a las redes de drenaje naturales o artificiales y que descargan en un cuerpo de agua superficial. De esta forma, un sector residencial, podría estar rodeado de áreas permeables y no contribuir al aumento de la escorrentía (Schueler, 1994; Brabec *et al*, 2002). Las áreas impermeables no efectivas pueden infiltrar una porción de las precipitaciones, dependiendo del tipo de suelo, pendiente del terreno y de las características de la cobertura existente sobre el suelo (Brabec *et al*, 2002). En consecuencia, en una evaluación de las tendencias de impermeabilización la utilización de las ATI resulta en una sobreestimación de los volúmenes de escurrimiento y de los máximos de caudal, ya que se asume como superficie impermeable una superficie capaz de infiltrar, la que no se descuenta del análisis.

1.2 Implicancias ambientales del cambio en el balance hídrico en la Provincia de Chacabuco

La importancia de comprender la dinámica de los cambios de los parámetros que definen el balance hídrico en la Provincia de Chacabuco radica en que ello permitiría establecer una base de conocimiento para una posterior valoración y mitigación de los efectos negativos que produce el aumento de las superficies urbanizadas en el contexto de la protección de las cuencas hidrológicas, y servir de guía para los esfuerzos que se realicen en esta línea por diversos actores en el ámbito de la gestión del territorio.

Según indica Castro (2005), las comunas de Colina y Lampa, por tratarse de áreas periurbanas, corresponden a las zonas de mayor intensidad de urbanización, proceso que podría provocar efectos adversos. Sin embargo, en la actualidad serían poco significativas, aunque la tendencia de la expansión urbana de Santiago hacia esas áreas permite inferir que en los próximos años aumentará la ocupación urbana de mayor densidad, debido a la ampliación del Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) que incorporó la Provincia de Chacabuco, con la creación de las Zonas Urbanas de Desarrollo Condicionado (ZUDC), que permiten alternativas de densificación y crecimiento concretas y que posibilitan el cambio de uso de agrícola a urbano, con densidades que pueden variar desde 10 hasta 85 habitantes por hectáreas, lo que tendría una relación con un aumento de las superficies impermeables.

Según indican Schueler (1994) y Brabec *et al* (2002), la degradación de los cauces ocurre con valores relativamente bajos de impermeabilización, cercanos al 10% de la superficie de la cuenca, mientras que con valores de 30% la degradación comienza a ser severa.

Romero y Vásquez (2005) estudiando los efectos de la urbanización en cuatro cuencas del piedemonte de Santiago, encontraron que las tasas totales de impermeabilización en las cuencas de Pirque, Chicureo y Arrayán-Las Gualtatas, equivaldrían a aportes de 10% a la escorrentía superficial, 40% a la evapotranspiración, 25% a la infiltración superficial y 25% a la infiltración profunda y comparan estos valores con el caso de la cuenca de Macul-San Ramón, en que la urbanización habría significado que la escorrentía superficial aumentara a un 20%, la infiltración profunda y superficial disminuyera a un 21%, y la evapotranspiración se redujera a un 38%.

Sin embargo, no existen estimaciones o caracterizaciones de las tendencias de crecimiento de las áreas impermeables y su relación con las variables que definen el balance hídrico en las cuencas de la Provincia de Chacabuco, aún cuando existen evidencias de la influencia de las áreas impermeables sobre la calidad de los cauces, y considerando que la impermeabilización es una de las pocas variables que pueden ser cuantificadas, gestionadas y controladas en cada etapa de desarrollo que involucre la gestión del territorio (Schueler, 1994).

Numerosos autores se han referido a la relación entre crecimiento urbano y pérdida de condiciones de infiltración de los suelos, aumento de escorrentía superficial, cambios en la morfología de cauces, cambios en la calidad y temperatura de las aguas, cambios en la biodiversidad de los cauces y reducción de la recarga de acuíferos (Reilly, Maggio y Karp, 2003; Choi y Deal, 2007; Göbel, Dierkes, y Coldewey, 2006). Estos efectos sobre las condiciones de las cuencas hidrográficas indican que la planificación del uso del suelo es una herramienta que debe ser considerada para la mitigación de la contaminación del agua y la preservación de la calidad natural del recurso (Reilly, Maggio y Karp, 2003).

Sin embargo, para que esto sea efectivo, es necesario realizar una aproximación sistemática al conocimiento de la complejidad y la magnitud de

los sistemas socioeconómicos e hidrológicos, lo que puede realizarse a través de la adopción y aplicación de un modelo de simulación dinámico (Choi y Deal, 2007).

El objetivo de estos modelos es establecer relaciones funcionales entre un conjunto de variables debidamente espacializadas que, posteriormente, son usadas para estimar la localización de los cambios sobre el paisaje. Los valores de las variables y los casos reales de cambio de uso del suelo son observados a partir de datos históricos obtenidos desde imágenes satelitales o fotografías aéreas verificadas en terreno (Henríquez, Azócar y Aguayo, 2006). Estos modelos ayudan a predecir el comportamiento futuro y prever probables consecuencias de las transformaciones proyectadas, apoyando la planificación territorial local y la evaluación ambiental de proyectos, programas, planes y políticas (Henríquez y Azócar, 2007).

En el contexto de los efectos de la urbanización sobre las condiciones y características ambientales de las cuencas hidrológicas, de acuerdo a Romero y Vásquez (2005), si bien es posible establecer una relación significativa entre los porcentajes de áreas urbanizadas de las cuencas, las tasas de impermeabilización y el estado ambiental de los paisajes resultantes, no se trata de una relación de tipo lineal. Los efectos de la urbanización sobre la salud ambiental de las cuencas dependen del estado de avance y tipo de urbanización, así como del diseño de las áreas urbanizadas (usos del suelo, densidades y áreas verdes) y, especialmente, de la posición del área urbana en la cuenca y de los usos y coberturas de los suelos remanentes. Paul y Meyer (2001), indican que la disminución de la infiltración y el aumento de la escorrentía son los principales efectos de la impermeabilización por crecimiento urbano, en que un aumento de las superficies impermeables de 10 a 20%, 35 a 50% y 75 a 100%, implican aumentos en la escorrentía de 2, 3 y 4 veces respectivamente. En otro aspecto, aunque se reconoce el incremento de la erosión como resultado de la urbanización, los impactos de la extensión y la

distribución de los elementos impermeables no son bien conocidos (Pappas, Smith, Huang, Shuster y Bonta, 2008). Estos autores señalan que investigaciones utilizando diferentes métodos para la estimación de la escorrentía, han entregado resultados inconsistentes, atribuyendo la falta de precisión a la distribución espacial de las superficies impermeables, en que la distancia a la red hidráulica de cauces, canales o tributarios es importante en la predicción de los cambios asociados con la urbanización.

1.3 Definición del problema

En esta perspectiva, el uso de modelos predictivos para la generación de escenarios futuros de cambios de uso del suelo, ya sea en el contexto de la planificación territorial o en la evaluación de impacto ambiental, representa una oportunidad para anticipar, prevenir y mitigar dinámicas insostenibles de las actuales formas de expansión de algunas ciudades de rápido crecimiento horizontal (Henríquez y Azócar, 2007). Henríquez *et al* (2006) indican la utilidad de los modelos de cambio de uso en la exploración de probables mecanismos que fuerzan dichos cambios, la descripción y correlación de las variables sociales, económicas y espaciales, la proyección de sus potenciales impactos ambientales y socioeconómicos y la evaluación de la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso de la tierra.

Considerando los antecedentes señalados sobre las perspectivas de crecimiento urbano hacia el norte de la ciudad de Santiago, y dado que no existen antecedentes sobre los efectos que esta futura urbanización pueda generar en las variables que controlan el balance hídrico en la Provincia de Chacabuco, esta investigación se enfoca en el desarrollo y análisis de un modelo de simulación de cambio de cobertura de suelo para la cuenca de los esteros Lampa y Colina, que corresponde a las comunas de Colina, Lampa, y

Til-Til, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana de Santiago, que describa la interrelación de variables biofísicas y económicas como factores que inciden en el cambio de uso del suelo, de forma tal que permita pronosticar los efectos sobre el balance hídrico y evaluar algunos de los impactos ambientales asociados a estos efectos.

En este contexto, cabe destacar la importancia de generar aportes al conocimiento sobre la distribución y proyección de los cambios de uso del suelo que inciden en las variables que controlan el balance hídrico, de tal forma que permitan evitar la aparición o incremento de riesgos naturales y la pérdida de servicios ambientales asociados a las cuencas intervenidas producto de los procesos de urbanización. Entre ellos se pueden mencionar inundaciones, alteración del ciclo hidrológico, pérdida de calidad del agua, degradación de cursos de agua, destrucción y fragmentación de hábitats terrestres que llevan a la pérdida de biodiversidad, y cambios en la estética de cursos de agua y paisajes (Romero y Vásquez, 2005).

2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Estimar los cambios futuros de los usos de suelo y sus efectos sobre las variables que controlan el balance hídrico en la cuenca del norponiente de la ciudad de Santiago, de tal forma de contribuir a una gestión territorial que permita minimizar sus impactos ambientales.

2.1.2 Objetivos específicos

- i. Formular y aplicar un modelo predictivo de cambio de coberturas de suelos para la cuenca de los esteros Lampa y Colina, basado en el análisis de las tendencias espaciales y temporales observadas en el periodo 1989 – 2007.
- ii. Identificar y caracterizar los efectos asociados a las proyecciones del uso o cobertura del suelo sobre: la pérdida de suelos con capacidad de uso agrícola, pérdida de coberturas vegetales, y los cambios en los coeficientes que definen el balance hídrico.

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis general

Los cambios en las coberturas de suelos provocados por la expansión de la ciudad de Santiago, obedecen a una dinámica que puede explicarse y proyectarse en función de la observación de las modificaciones ocurridas en una serie temporal pasada, por lo tanto es posible proyectar y ubicar, futuras áreas de crecimiento urbano y cambios en las coberturas vegetales, que se

relacionan con alteraciones de las variables que controlan los coeficientes de escorrentía y retención de agua en el espacio geográfico de la cuenca en estudio.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterización de las superficies impermeables

El aumento en la urbanización tiene como resultado un aumento de las superficies impermeables, que son principalmente superficies construidas, techos, veredas, caminos y estacionamientos cubiertos por materiales impenetrables como el asfalto, concreto y piedra (Leopold, 1968; Carter, 1961). Estos materiales efectivamente sellan superficies, repelen el agua e impiden que las precipitaciones infiltren en los suelos. Las superficies cubiertas por estos tipos de materiales son hidrológicamente activas, entendiéndose por ello que generan escurrimiento superficial (Barnes *et al.*, 2001). Además los suelos urbanos también modifican su profundidad durante el proceso de la construcción. La compactación de los suelos y el retiro de la tierra vegetal pueden disminuir la capacidad de infiltración (Schueler y Holland, 2000). La resultante alteración a la tierra puede dar lugar a cambios dramáticos en la hidrología o la forma en que el agua es transportada y almacenada. Según Arnold y Gibbons (1994) esta interrupción del ciclo natural del agua realizada por las superficies impermeables conduce a una serie de cambios, entre ellos:

- i. aumento del volumen y la velocidad de la escorrentía
- ii. aumento de la frecuencia y gravedad de las inundaciones
- iii. Caudales máximos muchas veces mayor que en cuencas naturales
- iv. pérdida de capacidad de almacenamiento de la escorrentía natural por la vegetación, los humedales y el suelo
- v. reducción de la recarga de aguas subterráneas, y
- vi. disminución del caudal base como contribución a la recarga de aguas subterráneas.

De acuerdo con Schueler (1994) las superficies impermeables son 100% hidrológicamente activas, y altos porcentajes de estas superficies se presentan

dentro de áreas urbanizadas que contienen usos de suelo comercial, industrial, transporte, y zonas residenciales de media y alta densidad. Otras superficies impermeables hidrológicamente activas incluyen suelos compactados, suelos con altos contenidos de arcilla, suelos congelados, suelos saturados, y suelos con niveles freáticos cercanos a la superficie. En los últimos tres tipos, la impermeabilidad y la actividad hidrológica es usualmente estacional o temporal, en contraste con las áreas urbanas, las cuales son permanentemente impermeables e hidrológicamente activas.

Los escurrimientos rápidos y la escasez de vegetación reducen los montos de agua disponibles para evapotranspiración. Según Rogers (1994), los cambios de uso de la tierra tienen cuatro impactos directos sobre el ciclo hidrológico y la calidad de las aguas: pueden causar inundaciones, sequías, y cambios en los regímenes de ríos y aguas subterráneas lo que puede afectar la calidad de las aguas. Adicionalmente a estos impactos directos, se producen impactos indirectos sobre el clima y el subsecuente impacto de esta alteración sobre las aguas.

Las superficies impermeables pueden clasificarse según Schueler (1994) en dos componentes principales, las techumbres, que incluyen casas, edificios, industrias y los sistemas de transporte que se componen de caminos, carreteras y estacionamientos. En general, el componente asociado a transporte, según estos autores excede al componente asociado a techumbres, con una relación de 63 a 70% del total de las superficies impermeables, lo que resaltaría la importancia de las áreas suburbanas, en donde es común una mayor presencia de automóviles. En Chile, según el INE, el número de automóviles aumentó de 300.000 en el año 1970 a 2.200.000 en el año 2005. La tasa de motorización creció desde 0,39 a 0,75 vehículos por habitante en la Región Metropolitana, con lo cual el porcentaje de hogares sin automóvil descendió desde 70,2% a 56,5% en el mismo lapso, situación que generó una demanda creciente por infraestructura en que las vías y carreteras y, en

especial, las autopistas se han ido afirmando como los ejes que guían la expansión urbana, acentuando una morfología metropolitana de tipo tentacular.

Un aspecto relevante dentro de las características de las superficies impermeables es si éstas están o no conectadas o aportan directamente las aguas de escorrentía a cauces naturales. Esta diferencia se ha estandarizado bajo los conceptos de Áreas Totales Impermeables (ATI) y Áreas Impermeables Efectivas (AIE). Las ATI, incluyen a las AIE y superficies impermeables no efectivas, o superficies impermeables que drenan hacia sectores permeables. Las áreas impermeables no efectivas pueden infiltrar todo o una parte de la precipitación de tormenta, dependiendo del tipo de suelo, pendiente del terreno, y características de la cobertura del suelo (Brabec *et al*, 2002). Esto último ocurre principalmente en las áreas residenciales, en donde los patios y antejardines actúan como áreas de infiltración de los escurrimientos desde techos y otras áreas impermeables.

Generalmente las ATI son estimadas basándose en el tipo de uso del suelo (cada uso de suelo tiene asociado un porcentaje de superficie impermeable), en que las valoraciones para cada uso de suelo, se ponderan en proporción a la superficie que ocupan en la cuenca, para de esta forma determinar el porcentaje total de área impermeable de la cuenca. El cálculo de las AIE generalmente se hace basado en porcentajes de las ATI (Brabec *et al*, 2002). Este método fue utilizado en la cuenca de Green Cove (Thurston Regional Planning, 2003), donde los investigadores obtuvieron el porcentaje de ATI y AIE para cada uso de suelo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Relación del uso de suelo/cobertura de la tierra con el porcentaje de área total impermeable (ATI) y área impermeable efectiva (AIE) en la cuenca de Green Cove

Uso de suelo / Descripción de la cobertura	Área impermeable total (ATI)	Área impermeable efectiva (AIE)
Comercial	90%	85%
Industrial	60%	48%
Residencial de múltiples familias	60%	48%
Alta densidad residencial		
suburbana	50%	35%
Residencial suburbana	40%	26%
Moderada densidad residencial	20%	10%
Baja densidad residencial	10%	4%
Suelos descubiertos	0%	0%
Praderas	0%	0%
Bosques	0%	0%

Fuente: Modificado de Thurston Regional Planning, 2003

3.2 Método de reconocimiento de las superficies impermeables

Existen varias opciones de reconocimiento de las superficies impermeables, sin embargo, Stocker (1998) señala que se necesitan métodos fiables para delimitarlas. Para esto existen varios métodos en función del nivel de precisión requerido. Las herramientas para medir las superficies impermeables son similares a las utilizadas para medir la cobertura del uso de suelo tradicional. Los métodos pueden incluir una o más de las siguientes técnicas:

- i. Medición óptica y los sistemas de posicionamiento global (GPS): este método implica la medición en terreno de todas las superficies impermeables y es la técnica más exacta; sin embargo, como lo señalan Sleavin *et al*, (1999) requiere de un trabajo extenso en las que se

requiere mucho tiempo y personal para registrar la localización geográfica de caminos, edificios, estacionamientos, etc. Por esta razón es considerada poco rentable económicamente, especialmente al medir grandes superficies.

- ii. Interpretación fotográfica: este método utiliza la fotointerpretación para estimar las superficies impermeables, y es considerado por algunos investigadores como uno de los métodos más exactos (Draper y Rao, 1986; Harris y Rantz 1964; Sauer *et al*, 1983). Sin embargo, sus costos son altos, y se requiere bastante tiempo y experiencia en la interpretación. Sleavin (1999) recomienda este método para superficies pequeñas.
- iii. Mapas detallados: se utilizan mapas detallados para estimar las superficies impermeables. Este método ha sido utilizado por algunos investigadores (Southard, 1987; Spencer y Alexander, 1978); en este caso, la precisión de la estimación de las superficies impermeables es un proceso altamente dependiente de la información representada y la escala en la cual se exhibe.
- iv. Detección remota satelital: Un cuarto método para estimar superficies impermeables es la clasificación de datos basados en la detección remota satelital. En general el proceso exige la colección de la radiación electromagnética reflejada por la superficie de la tierra a los sensores de un satélite. Dependiendo del satélite existen diferencias en: el número de bandas, ancho de bandas individuales, y de la resolución espacial que los sensores en los satélites puedan detectar y recoger. Una vez que se obtienen los datos basados en los satélites, pueden ser rectificadas procesados y georeferenciados para el análisis en un ambiente digital. El objetivo de la clasificación de la imagen digital es sustituir un proceso subjetivo visual del análisis por una técnica más objetiva, más

cuantitativa para automatizar la identificación de características en una imagen. Este procedimiento implica normalmente el análisis de datos multiespectrales de la imagen y el uso de las reglas basadas en estadísticas para determinar la característica de identidad de cada píxel en una imagen. El proceso finaliza con la clasificación de todos los píxeles de la imagen digital en uno o más tipos de uso de suelo, tipo de cobertura del suelo o temas (Lillesand y Kiefer 1994). Toll (1984) evaluó el potencial de clasificación de la imagen Landsat MSS y los datos de TM para discriminar entre diversos tipos de la cobertura de la tierra. Observó que niveles más altos de exactitud fueron alcanzados usando los datos de Landsat TM que usando los datos más antiguos de Landsat MSS para clasificar ciertos tipos de cobertura urbana de la tierra. Estos resultados reflejan que en el pasado la carencia de interés para clasificar características urbanas era debido a la gruesa resolución espacial (79-82 metros) de Landsat MSS y también a la relativa novedad de la técnica de clasificación de imágenes digitales. Sin embargo, con la resolución espacial mejorada de Landsat TM (30 metros), se generó un nuevo interés para estudiar la cobertura de tierras urbanas. Respecto a esto Plunk *et al*, (1990) utilizaron la resolución espacial más alta de Landsat TM para clasificar las superficies impermeables de un área urbana. Sus resultados indicaron un nivel de exactitud de 85,1% para clasificar superficies impermeables. Aunque ambos estudios divulgaron las exactitudes mejoradas para clasificar ciertos tipos de cobertura urbana, los autores indicaron que las superficies impermeables totales a menudo fueron subestimadas debido a la complejidad y la heterogeneidad espacial de muchas cubiertas de tierras urbanas.

3.3 Impactos asociados a las superficies impermeables

3.3.1 Impermeabilidad y escurrimiento superficial

Dado que los usos del suelo cambian en una cuenca hidrológica debido al desarrollo residencial, comercial, industrial y de transporte, los ciclos hidrológicos locales son alterados sustancialmente. Cambios drásticos en el tiempo de concentración y en los volúmenes de las lluvias que se distribuyen a los cauces naturales, han sido descritos y caracterizados en zonas que han sido urbanizadas.

Mientras aumenta la impermeabilidad de una cuenca, se observan cambios en los niveles de los cauces entre tormentas, en la altura de los niveles freáticos y en las tasas y volúmenes de erosión fluvial. Adicionalmente, el reemplazo de la vegetación por superficies impermeables reduce el promedio anual de evapotranspiración de la cuenca. En este punto, se reportan disminuciones de evapotranspiración en un 19%, 38% y 59% al reemplazar bosques por 25%, 50% y 75% de superficies impermeables respectivamente (Barnes *et al*, 2001).

Una característica notable de las superficies impermeables es la producción de escurrimiento con montos muy bajos de precipitación, dado que además de ser impermeables estas superficies tienen una escasa capacidad de retención de agua. Esto lleva a que las tasas de evaporación sean menores que en áreas con vegetación. A su vez, la reducción de la infiltración, produce grandes volúmenes de escurrimiento superficial, y un máximo de descarga más rápido hacia la red de cauces, que aumentan en promedio de 2,5 veces si aumenta la cobertura impermeable de 0 a 100% en áreas sin servicio de colectores de aguas lluvias (Barnes *et al*, 2001). Este autor, señala que el cambio en el escurrimiento, en el punto máximo de tormenta es aún mayor, con un aumento de hasta 8 veces entre sitios con un 100% de impermeabilidad y áreas drenadas. Lo anterior es corroborado por el Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG, 1998), que señala que las superficies

impermeables alteran fundamentalmente la hidrología de las cuencas urbanas porque aumentan la escorrentía y reducen la cantidad de precipitación que infiltra en el suelo (Figura 1).

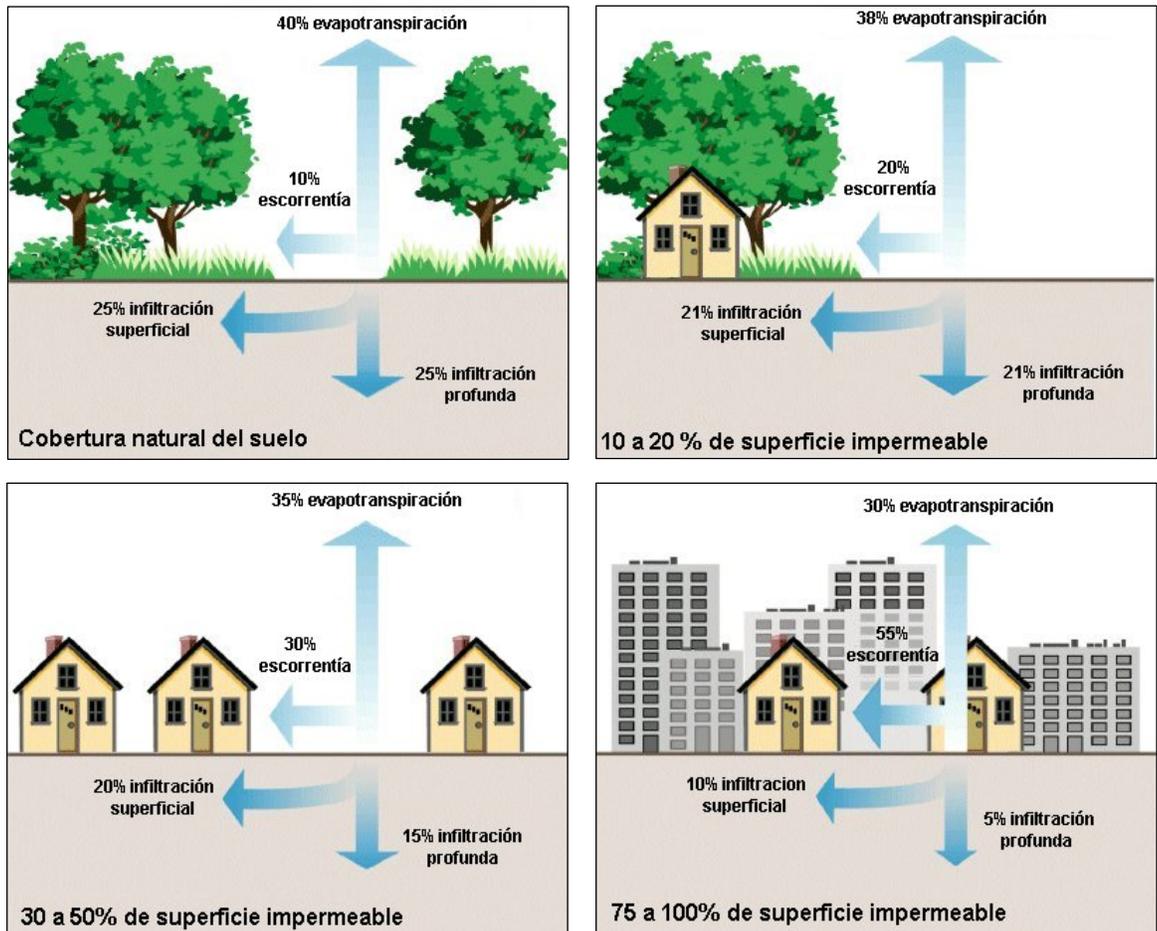


Figura 1. Impactos de las cubiertas impermeables sobre el ciclo hidrológico (modificado de FISRWG, 1998)

De esta forma, las tormentas pueden comenzar a causar inundaciones debido al aumento de la escorrentía superficial. En general las inundaciones son cada vez más frecuentes debido a la expansión de las superficies impermeables. Además, las superficies impermeables y las redes de drenaje artificiales colaboran en la reducción del tiempo de demora, o el tiempo transcurrido entre el centro de gravedad de la lluvia y el centro de gravedad de la escorrentía o el caudal máximo. Las superficies pavimentadas, a su vez dada su poca

rugosidad presentan menor resistencia por fricción que las superficies con cubierta vegetal.

Según Capiella *et al*, (2005) la gestión de los bosques urbanos puede mitigar algunos de los efectos negativos generados por el aumento de las superficies impermeables en las cuencas urbanas. Estos autores señalan que la cubierta forestal tiene los siguientes beneficios en la cuenca:

- i. Los árboles interceptan la lluvia con sus copas reduciendo el monto de lluvia que alcanza el suelo. Una porción de esta lluvia interceptada se evapora desde la superficie del árbol, siendo este efecto mayor en eventos de baja precipitación.
- ii. Los árboles toman el agua del suelo a través de sus raíces, esto aumenta el potencial de almacenaje de agua en el suelo y aumenta la cantidad de tiempo antes de que la precipitación sature el suelo y se convierta en escorrentía superficial.
- iii. Los árboles promueven la infiltración atenuando la escorrentía y aumentando el drenaje del suelo debido a la creación de macroporos por las raíces del árbol. La adición de la materia orgánica también aumenta el almacenaje del agua en el suelo, reduciendo la escorrentía.
- iv. La reducida salida de escorrentía en las tierras forestadas reduce la frecuencia y el volumen de las inundaciones.

3.3.2 Impermeabilidad y forma de los cauces

Los impactos asociados con el desarrollo y las superficies impermeables suelen ir mucho más allá de inundaciones. El mayor volumen y la mayor intensidad de la escorrentía conducen a un aumento de la erosión desde los sitios

urbanizados hacia las zonas bajas de los cauces. Debido a que la forma de un cauce evoluciona con el tiempo en respuesta al flujo que transporta y las cargas de sedimentos que recibe, el desarrollo generado por el escurrimiento de sedimentos causa importantes cambios en la forma de éste. Para facilitar el aumento del flujo, los cauces urbanos, tienden a ser más profundos y rectos que los ubicados en zonas boscosas (Barnes *et al*, 2001). Esto es corroborado por estudios del Centre for Watershet Protection (CWP) (2003) que señalan que en respuesta a la alteración de la hidrología urbana, los cauces tienden a ser más anchos y/o profundos.

El desarrollo de la cuenca tiene una fuerte influencia en la magnitud y la frecuencia de inundación en los cauces urbanos, estos varían su forma en respuesta a los mayores flujos de esorrentía recibidos. Los valores máximos de descarga son indicadores de uso frecuente para definir el riesgo de inundación. Varios autores indican que los máximos de descarga en zonas urbanas son varias veces mayores que en zonas rurales, lo que significa un mayor riesgo de inundación (Doll *et al*, 2000; Leopold, 1994).

Por otra parte, mientras las superficies impermeables aumentan en una cuenca, se espera menos infiltración, lo que puede potencialmente disminuir el flujo base de los cauces durante períodos secos. Algunos autores señalan que existe una relación inversa entre el aumento de las superficies impermeables en una cuenca y el flujo base de los cauces (Klein, 1979; Spinello y Simmons, 1992).

3.3.3 Impermeabilidad y calidad de aguas

La urbanización de las cuencas hidrográficas plantea una amenaza para la calidad del agua por fuentes puntuales y difusas (no puntuales) de contaminación.

Las fuentes puntuales son lugares donde contaminantes específicos se descargan directamente en lagos, ríos, estuarios, y las aguas costeras mediante tuberías y otros conductos. Estas fuentes incluyen fábricas, plantas de energía, y depuradoras de aguas residuales.

Según Momparler y Doménech (2008) las actividades humanas generan, tanto en la atmósfera como en la superficie de las cuencas urbanas, una amplia gama de contaminantes: sedimentos, materia orgánica, nutrientes, hidrocarburos, elementos patógenos (bacterias y virus), metales, y pesticidas, entre otros. El origen de esta contaminación corresponde a zonas amplias y de difícil acotación, por lo que se habla de contaminación difusa.

Durante los eventos de precipitación, la contaminación acumulada en la superficie durante el tiempo seco es lavada y arrastrada hacia la red de colectores, y si la red es única, a lo anterior hay que añadir el efecto del lavado de los sedimentos que durante el tiempo seco se han ido depositando en la red como consecuencia del tránsito de las aguas residuales. En consecuencia el impacto en el medio receptor de tales escorrentías genera graves problemas. Por lo tanto el aumento de la escorrentía sirve para el transporte directo de estos contaminantes en los cursos de agua por la creación de fuentes de contaminación no puntuales, o de escorrentía contaminada. El escurrimiento contaminado es ampliamente reconocido por los científicos y los reguladores del medio ambiente como la mayor amenaza para la calidad del agua, debido a que los cauces son usualmente el primer cuerpo de agua que recibe la escorrentía proveniente de las zonas urbanas. El impacto que los agentes contaminadores de la escorrentía ejercen en la calidad del agua depende de muchos factores, incluyendo la concentración, la carga anual del agente contaminador y de la categoría del agente contaminador (CWP, 2003). Los principales contaminantes de interés son patógenos (microorganismos que causan enfermedades), nutrientes, contaminantes tóxicos, sedimentos y los desechos. Los sedimentos son también una de las principales fuentes no

puntuales de contaminante, tanto por sus efectos en la ecología acuática y por el hecho de que muchos de los otros contaminantes tienden a adherirse a las partículas generadas por erosión (Arnold y Gibbons, 1994)

Los agentes contaminadores de la escorrentía que tienen impacto en la calidad del agua pueden también influenciar directamente las actividades humanas. Los agentes contaminadores de mayor preocupación son los asociados con la salud pública, tales como bacterias y patógenos. Estos agentes contaminadores pueden afectar la disponibilidad del agua potable y limitar actividades recreacionales típicas, tales como natación, pesca y canotaje (CWP, 2003).

Para mitigar parte de los efectos negativos de las superficies impermeables sobre la calidad del agua Capiella *et al*, (2005) señalan que los árboles mejoran la calidad del suelo y del agua a través de la absorción de los nutrientes del suelo (sobre todo Nitrógeno), la filtración del sedimento y de agentes contaminadores y de la eliminación de los agentes contaminadores encontrados comúnmente en la escorrentía y suelos urbanos. En un cierto plazo, los árboles también aumentan la cantidad de materia orgánica en el suelo que tiene la propiedad de atrapar muchos agentes contaminadores.

3.3.4 Impermeabilidad y calentamiento de cauces

Mientras las áreas urbanas se desarrollan, ocurren cambios en el paisaje. Los edificios, los caminos y otra infraestructura reemplazan la tierra abierta y la vegetación. Las superficies que eran permeables y húmedas se convierten en impermeables y secas. Esto conduce a la formación de las islas de calor urbano, fenómeno por el cual las regiones urbanas experimentan temperaturas más altas que sus alrededores rurales.

Entre los factores de influencia de mayor importancia en la generación de islas de calor se encuentran la geometría urbana, la influencia del calor

antropogénico y las propiedades térmicas de los materiales de construcción (Correa *et al*, 2003).

La superficie de las islas de calor urbano degradan la calidad del agua, principalmente por la contaminación termal. Las superficies como pavimentos y techos alcanzan temperaturas más altas que la temperatura del aire, estas superficies transfieren parte del calor a la lluvia, que es transportada por la escorrentía hacia los cauces urbanos (Roa *et al*, 2003).

Por otra parte la temperatura del agua en la cabecera de los cauces es influenciada fuertemente por la temperatura del aire local. Las medidas en terreno de un estudio demostraron que la escorrentía de áreas urbanas estaba sobre 11° a 17°C más caliente que la escorrentía de un área rural próxima en días de verano, en que las temperaturas del pavimento a mediodía estaban entre 11° a 19°C por sobre la temperatura del aire (Galli, 1990).

El escurrimiento en las superficies impermeables puede contener elevadas cantidades de materia orgánica como: animales domésticos, pájaros, desechos animales, desechos vegetales y basura orgánica. Los desechos orgánicos en el agua son descompuestos por bacterias aeróbicas, que utilizan el Oxígeno libre. Cuando una excesiva cantidad de materiales orgánicos está presente en el agua, las demandas de Oxígeno de las bacterias aeróbicas pueden bajar o agotar los niveles de Oxígeno disuelto, motivo por el cual pueden matar o desplazar a peces y otros organismos dependientes del Oxígeno. Uno de los parámetros de contaminación orgánica ampliamente utilizados es la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) que es la cantidad de oxígeno disuelto en el agua necesario para descomponer la materia orgánica mediante la acción de microorganismos aerobios presentes en el agua. Otro parámetro ampliamente utilizado es la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Este parámetro se define como la cantidad de Oxígeno necesario, o equivalente, para oxidar

químicamente la materia orgánica susceptible de oxidación existente en el agua. Sin embargo, cuando el Oxígeno disminuye, la descomposición es completada por bacterias anaeróbicas, que destruyen la materia orgánica en ausencia de Oxígeno libre. El resultado de la descomposición anaerobia es la producción y liberación de gases nocivos y compuestos que emanan malos olores del agua (Berry y Horton, 1974; Dzurik, 1990; Vesilind, *et al*, 1990).

El agotamiento del Oxígeno es particularmente problemático durante el verano y comienzos del otoño cuando la actividad bacteriana es alta, la materia orgánica está en gran parte disponible, y las temperaturas del agua son altas. Aguas más calientes aumentan la acción bacteriana y bajan los niveles disueltos del Oxígeno puesto que el Oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en agua fría. También, el agua de escorrentía que se calienta a través del contacto con las superficies impermeables puede causar un choque termal a los organismos que habitan los cuerpos de agua que reciben estas aguas. Temperaturas del agua más altas levantan los metabolismos de mamíferos acuáticos y marinos y disminuyen la eficacia del uso del Oxígeno. Los aumentos de la temperatura pueden afectar negativamente los comportamientos y los éxitos reproductivos de mamíferos acuáticos y marinos, reducir la tolerancia de los peces a otros tipos de estrés y agentes contaminadores ambientales, y favorecer el crecimiento de algunos tipos de algas y de patógenos no deseables (Black, 1977; Dunne y Leopold 1978).

3.3.5 Impermeabilidad y biodiversidad de cauces

Alberti y Marzluff (2004) indican que el desarrollo urbano fragmenta, aísla y degrada hábitats naturales, simplifica y homogeneiza la composición de especies, interrumpe sistemas hidrológicos y modifica los flujos de energía y ciclos biogeoquímicos. La fragmentación de los hábitats crea pequeños parches aislados, reduce el área total de hábitat y la conectividad entre parches mientras se incrementa el hábitat de borde (Forman, 1995).

Bajo este escenario se observa que el patrón espacial de los usos de la tierra refleja los procesos urbanos subyacentes e influencia la ecología de los ambientes urbanos (Zhang *et al*, 2004). Frente a estos cambios la conservación de los cauces es de vital importancia ya que la vegetación ribereña proporciona múltiples ventajas para la vida. Según Galli (1990) los búferes ribereños son mitigantes clave del aumento de la temperatura. Además los árboles proporcionan la litera de hojas, las grandes ramas y troncos caídos, que crean hábitat para peces, macroinvertebrados, anfibios, y reptiles. La litera de hojas es también fuente de energía importante de los cauces, siendo la base del alimento en las redes de las comunidades acuáticas. En un bosque maduro típico de 0,4 ha caerán entre 2 y 3 toneladas de hojas, de ramas finas, y de ramas gruesas cada otoño (Envirocast, 2003). Cuando el viento sopla las hojas hacia un cauce, estas forman “paquetes” que son gradualmente degradados por hongos y bacterias, dependiendo de la temperatura y la velocidad del cauce. El área de hongos es la fuente principal de alimentos para insectos, que alternadamente son fuente de alimento para pequeños peces y otros tipos de vida acuática (Envirocast, 2003).

En cuencas urbanas, gran parte de las entradas de materia orgánica a los cauces es realizada en áreas altas de la cuenca, donde las hojas caen sobre áreas en las que después serán transportadas por la escorrentía. Por lo tanto, los bosques ubicados en la parte alta de la cuenca pueden ser tan importantes como los bosques ribereños, en el ingreso de materia orgánica al cauce (Capiella *et al*, 2005).

3.3.6 Impermeabilidad e impacto en otros cuerpos de agua

Todas las actividades que se realizan para el uso de la tierra dentro de una cuenca hidrográfica afectan la calidad del agua en los cuerpos de agua. Tanto las fuentes dispersas como puntuales de contaminación en una cuenca hidrográfica, contribuyen con nutrientes, bacterias y contaminantes químicos

(González, 2007).

Según los informes de United State Environmental Protection Agency (USEPA) (2000) en Estados Unidos la fuente más significativa de deterioro de la calidad del agua en ríos, lagos, arroyos, estanques y embalses es la agricultura (Cuadro 2).

Estos autores indican que la sedimentación es la principal causa del deterioro de la calidad de agua de ríos y esteros y el tercer factor que causa deterioro a lagos, lagunas y embalses. Además, nueve estados en EE.UU. señalan a la silvicultura como fuente principal de deterioro a ríos y esteros.

Cuadro 2. Principales fuentes de contaminantes que causan deterioro en los ríos, lagos y estuarios (USEPA, 2000)

	Ríos y esteros	Lagos, lagunas y embalses	Estuarios
Contaminante	Sedimentación	Nutrientes	Patógenos (bacterias)
	Patógenos (bacterias)	Metales	Enriquecimiento orgánico
	Nutrientes	Sedimentación	Baja disolución de Oxígeno Metales
Fuente	Agricultura	Agricultura	Fuentes de puntos municipales
	Hidromodificación	Hidromodificación	Escorrentía/ Alcantarillas
	Escorrentía/Alcantarillas	Escorrentía/Alcantarillas	Depositación atmosférica

Taylor (1993) examinó el efecto del desarrollo urbano de una cuenca sobre 19 humedales de agua dulce en Washington y concluyó que la escorrentía

adicional contribuyó a grandes fluctuaciones anuales del nivel del agua. Este aumento en las fluctuaciones del nivel del agua comenzó a ocurrir constantemente cuando las cuencas en su parte superior excedían las superficies impermeables del 10 a 15%. Cuando las fluctuaciones del nivel del agua superaron los 20 cm, la riqueza de plantas y la comunidad de anfibios cayó agudamente.

Los efectos de la escorrentía superficial sobre los lagos, en comparación con los cauces, tienen al menos tres diferencias (Water Environment Federation, 1998):

- i. Los lagos, por causa de su volumen, responden principalmente a la masa de elementos y el volumen de flujo, en vez de una concentración de elementos o del flujo máximo. El tiempo de respuesta es del orden de días o semanas, mientras que un cauce responde en horas o días.
- ii. Después de desperdicios visibles y daños, el enriquecimiento de nutrientes y el consiguiente aumento en la productividad primaria es el signo más visible de la urbanización.
- iii. Los lagos son una red de depósitos del ambiente, como tal, actúan como sumideros de materiales sedimentados y tardan más tiempo para recuperarse de la contaminación que los cauces.

En algunos casos la carga de nutrientes que transporta la mayor escorrentía superficial provocada por las superficies impermeables produce en cuerpos de agua como lagos, lagunas, estuarios, marismas u otros similares un enriquecimiento rápido y excesivo de nutrientes llevándolos a un proceso de hipereutroficación que caracteriza un medio enfermo y contaminado. Contrariamente a la eutroficación, la evolución del fenómeno de hipereutroficación es rápido y sensible a escala humana, pudiendo verificarse

en semanas, meses o años. El efecto de la hipereutroficación es importante en el desarrollo de vegetación acuática y en particular en la proliferación de algas. Esta fuerte producción vegetal tiene tendencia a disminuir la transparencia del agua, modificar las condiciones de la fotosíntesis, dar un aspecto poco estético y desagradable al tacto y volver poco apto al medio para actividades como la pesca o el agua potable (Torres, 2004).

3.3.7 Impactos económicos

La urbanización y el mayor porcentaje de superficies impermeables que posee respecto de lugares rurales, trae como resultado costos asociados a la infraestructura de la ciudad para mantener el funcionamiento correcto de los servicios en áreas que han cambiado la configuración inicial de uso de suelos y que han perdido gradualmente la cobertura vegetal. Un estudio de American Forests (1999) basado en el análisis de imágenes satelitales señala que en la ciudad de Baltimore-Washington entre 1973 y 1997 la cobertura de bosques urbanos disminuyó de un 51% a un 37%. Esto provocó un aumento del 19% en la escorrentía superficial. El costo en obras para controlar el aumento de la escorrentía es cercano a los 1,08 billones de dólares. Además la copa de los árboles perdidos habría atrapado aproximadamente 4.220 toneladas de agentes contaminantes en la atmósfera, esto está evaluado en un costo aproximado de 24 millones de dólares por año.

También existen costos asociados a pérdidas de infraestructura perteneciente a la población. Debido a que la escorrentía en zonas urbanizadas posee un mayor volumen hay más probabilidades de inundaciones, en consecuencia es común que se registren daños a viviendas, automóviles, terrenos, etc. El cálculo del daño económico a bienes pertenecientes a una persona es mas complejo, porque además del daño material existe una pérdida de valor emocional. Por lo tanto, el cálculo del daño es subjetivo.

3.4 Indicadores de impermeabilidad

Al evaluar el impacto directo de la urbanización en los cauces, los investigadores se han enfocado principalmente en indicadores hidrológicos, físicos y biológicos para definir la calidad del cauce urbano. En los últimos años, las superficies impermeables han emergido como un indicador dominante para explicar y a veces para predecir cómo la calidad de los cauces cambia seriamente en respuesta a diversos niveles de desarrollo de la cuenca. En Estados Unidos el Centro para la Protección de las Cuencas (CWP) ha integrado estos resultados de investigación en un modelo general de planificación de la cuenca, conocido como el Modelo de Superficies Impermeables (MSI). El MSI predice que la mayoría de los indicadores de calidad de los cauces declinan cuando la superficie impermeable de la cuenca excede del 10% (Figura 2). Si el porcentaje de superficies impermeables aumenta, la degradación, en consecuencia, tiende a aumentar. Si la superficie impermeable supera el 25%, se espera una degradación severa. El resultado final es un sistema que cambia de forma negativa (CWP, 2003).

La cobertura del bosque es claramente el principal rival de las superficies impermeables como predictor útil de la calidad de los cauces en una cuenca urbana, por lo menos para las regiones húmedas. En algunas regiones la cobertura del bosque es simplemente el recíproco de la superficie impermeable (CWP, 2003). Booth (1991) sugiere que un cauce en buen estado puede ser mantenido solamente cuando la superficie impermeabilizada se limita a menos del 10% y por lo menos el 65% de la cobertura forestal se conserva dentro de la subcuenca. Esto implica que para mantener un cauce en buen estado hay que reducir al mínimo las superficies impermeables y maximizar la preservación de la cobertura de bosque nativo de la cuenca.

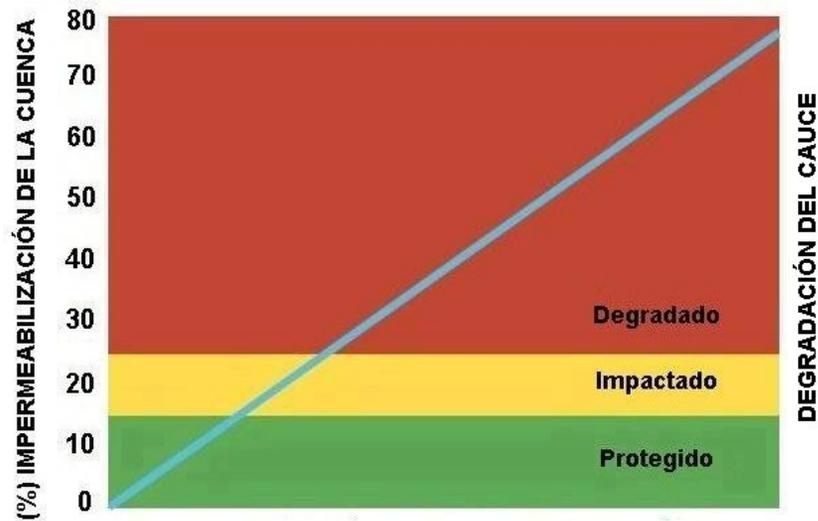


Figura 2. Relación entre la degradación de un cauce y el porcentaje de impermeabilización de una cuenca (modificado de Arnold y Gibbons, 1994)

Otros indicadores están orientados a medir directamente la calidad de las aguas que son afectadas por el escurrimiento proveniente de las superficies impermeables. Es posible caracterizar el grado trófico de los lagos u otros cuerpos de agua a partir de observaciones cualitativas. Otra manera es realizando una estimación cuantitativa del nivel trófico, esta puede realizarse considerando indicadores de calidad de las aguas como los contenidos de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo), las concentraciones de oxígeno disuelto y de clorofila, y la transparencia de las aguas (Torres, 2004).

3.5 Impacto de las superficies permeables

Las superficies permeables permiten infiltrar el agua de lluvia en el suelo, convirtiéndose en aguas subterráneas naturales que mantienen los cauces de una cuenca. Además ayudan con la filtración de contaminantes y reducen la erosión de las cuencas al disminuir la escorrentía superficial y a la vez las inundaciones.

Ross y Diíla (1993) compararon la escorrentía en seis diferentes superficies permeables. Los resultados mostraron grandes diferencias en las características de escorrentía. Los paisajes con abundancia de restos de materiales orgánicos en la superficie no presentaron escorrentía, mientras que caminos con grava y suelos desnudos actúan similares a una superficie impermeable, aunque éstos normalmente no son incluidos en los cálculos. Esta diferencia en las características de escorrentía para distintas superficies permeables es crítica para la planificación del uso de la tierra, porque varían en su capacidad para absorber o evacuar la lluvia. Incluso aquellas áreas que normalmente se consideran completamente permeables como praderas de césped y campos, no absorben la cantidad de precipitación absorbida por un sitio con bosques maduros (Brabec, 2002).

Los sitios con bosque maduro en el sistema hidrológico son de gran importancia. Varios estudios han mostrado que sitios con bosque en una cuenca son vitales para mitigar los impactos de otros usos de la tierra, sobre los hábitats de cauces y parámetros de calidad del agua (Richards *et al.* 1996; Steedman 1988; Osbome y Kovacic, 1993).

Por otra parte, numerosos estudios han documentado la degradación en la calidad del agua, hábitat y sistemas biológicos cuando aumenta el porcentaje de tierras agrícolas dentro de la cuenca (Richards *et al.* 1996; Roth *et al.* 1996; Sponseller *et al.* 2001; Wang *et al.* 1997). En general los problemas con la calidad del agua provienen de cinco categorías relacionadas a las fuentes de contaminación agrícola difusa: sedimentos, nutrientes, desperdicios animales, pesticidas y sales (Terrel y Perfetti, 1991).

3.6 Efecto de las estrategias de mitigación

Las buenas prácticas de manejo (BMP) y las áreas de protección ribereñas frecuentemente se utilizan para mitigar el impacto de las superficies impermeables

Las buenas prácticas de manejo en general, incluyen controles de ingeniería, procedimientos operacionales y prácticas para reducir la escorrentía, los derrames y filtraciones, la disposición de desperdicios y el drenaje de materiales crudos como el cemento. Se recomienda adoptar prácticas que protejan el agua de lluvia para que no se contamine al formar escorrentía y evitar que los desperdicios lleguen a integrarse en los cuerpos de agua (Stormwater Pollution Prevention, 2002). Estas buenas prácticas de manejo se dividen en dos categorías (González, 2009):

a) Estructurales: construcciones que constituyen instalaciones permanentes, tales como:

- cobertura vegetal
- canales de desagüe protegidos
- puntos de descarga con filtros de piedra
- barreras vegetales
- estanques de sedimentación
- conservación de áreas naturales y permeables
- empedrado

Según Brabec (2009) los estanques de sedimentación son una práctica frecuente en Estados Unidos; sin embargo, no hay claridad en los efectos de mitigación y en algunos casos los sedimentos atrapados generan contaminación de las aguas subterráneas, debido a la falta de mantención y al diseño.

b) De operación (no estructurales): prácticas de trabajo diario para proteger las aguas de escorrentía.

Las zonas de protección ribereñas son comúnmente aceptadas como una forma no estructural de BMP. Sin embargo, como aplicación es bastante sencilla y por lo general requiere el mantenimiento de las características del sitio existentes en el lugar (Booth, 1991). Los búferes ribereños son mitigantes clave del aumento de la temperatura (Galli, 1990) y de la pérdida de material leñoso y materia orgánica que entra en la cadena alimentaria acuática (Booth y Jackson, 1997).

Se debe considerar que el tamaño real del área ribereña, necesaria para proteger la integridad ecológica del cauce es difícil de establecer (Schueler, 1995). En la mayoría de los casos, el ancho mínimo de la superficie depende del recurso o la utilización beneficiosa de interés y la calidad de la vegetación ribereña existente (Castelle *et al*, 1994). Según May *et al* (1997) en cauces urbanos las áreas de protección suelen degradarse en mayor medida por la acción antrópica. Estos autores observaron que en una cuenca con un 40% de ATI, más del 40% de las áreas de protección ribereñas se encontraba en condiciones no funcionales. En este sentido Naiman (1992), señala que la conectividad o continuidad longitudinal del buffer es tan importante como el ancho, siendo los cruces de caminos los principales elementos de degradación que provocan discontinuidad.

Por otra parte Conway y Lathrop, (2005) sostienen que los escenarios de cambio de uso de suelos y los modelos de simulación son una herramienta cada vez más valiosa para examinar los futuros paisajes e investigar los procesos de cambio y sus configuraciones potenciales, antes que se concreten cambios permanentes en el paisaje, convirtiéndose en una herramienta de planificación que permitiría corregir o evitar alteraciones extremas del ciclo

hidrológico de las cuencas.

3.7 Modelos de simulación de cambio de coberturas

Los modelos, según indican Henríquez y Azócar (2007), pueden ser estáticos, si representan un componente o proceso de la realidad o dinámicos si consideran cambios en una serie temporal. Los autores señalan que existen dos aproximaciones en el uso de modelos dinámicos predictivos, según se basen en regresiones o en transición espacial. Los modelos de regresión establecen relaciones entre variables predictivas y probabilidades de cambio de las coberturas o usos del suelo, mientras que los modelos basados en transición espacial, incorporan técnicas basadas en el método de Cadenas de Markov y autómatas celulares, en donde se asume que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de cambio de la entidad sujeto.

De acuerdo con Han *et al* (2009), los modelos de crecimiento urbano pueden dividirse en dos categorías: los modelos de abajo – arriba y los de arriba – abajo. Los primeros, más la incorporación de los autómatas celulares, permiten evaluar escenarios futuros de cambio, enfocándose en los cambios espacio temporales, más que en los factores socioeconómicos que fuerzan dichos cambios. Por el contrario, los modelos de arriba – abajo, son utilizados en la investigación de los factores socioeconómicos como factores de cambio y son utilizados en la simulación de sistemas complejos, en forma de prueba y error para la determinación de relaciones entre variables y escenarios de cambio.

Sin duda, los modelos de simulación de cambios de coberturas y de crecimiento urbano pueden aportar significativamente en la gestión territorial, no sólo para entender los impactos ambientales asociados, sino que también, para proveer un soporte para la implementación de una estrategia de desarrollo urbano sustentable.

4 MATERIALES Y MÉTODO

4.1 Área de estudio

El estudio se limita a la cuenca hidrográfica del estero Lampa, cuyos tributarios son los esteros Caleu, Rungue, Tiltil, Polpaico, Peldehue y Chacabuco con sus tributarios Santa Margarita, El Cobre y Quilapilún; y parte de la cuenca del estero Colina. Administrativamente corresponde a las Comunas de Colina, Lampa y Tiltil, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana de Santiago.

4.2 Materiales

Para estas cuencas se utilizaron:

- i. Imágenes satelitales LANDSAT ENHANCED THEMATIC MAPPER PLUS (ETM+) de fecha 4 de febrero de 2003 y TEMATIC MAPPER (TM) del 17 de marzo de 1989, 29 de enero de 1998 y 23 de febrero de 2007.
- ii. Curvas de nivel con equidistancia de 50 metros (OTAS, 2000).
- iii. Cartas IGM escala 1:25.000 y 1:50.000.

4.3 Método

4.3.1 Pretratamiento de imágenes satelitales

Se realizaron correcciones radiométricas de las imágenes satelitales, considerando factores de iluminación, y aquellos relacionados con las condiciones de la atmósfera, utilizando el método propuesto por Chávez (1996). Los valores de las variables necesarias para realizar la corrección se presentan en el Anexo 1. Posteriormente se aplicó un filtro de caja adaptativa con una matriz de 3 x 3 píxeles. Complementariamente se realizaron correcciones topográficas utilizando el método propuesto por Riaño *et al* (2003).

4.3.2 Fotointerpretación y clasificación de usos del suelo

Se interpretaron las imágenes Landsat según la clasificación de cobertura en 19 categorías (Cuadro 3). Las coberturas relacionadas con la vegetación y la impermeabilización se reconocieron mediante la aplicación de una Clasificación Supervisada de Subpíxel en el software IDRISI Andes, estableciendo sitios de entrenamiento. Se utilizaron tres componentes principales: vegetación, no vegetación e impermeable sobre la base de la firma espectral de cada elemento.

La firma espectral se extrajo mediante el módulo MAKESIG procesando los sitios de entrenamiento para todas las bandas de cada imagen satelital. De esta forma, se utilizó el clasificador blando del módulo UNMIX, y posteriormente se realizó una reclasificación de las imágenes obtenidas con este procedimiento, definiendo los rangos de asignación de cobertura de suelo utilizando el módulo RECLASS. En este paso se incluyó la reclasificación de píxeles en función del porcentaje de cobertura vegetal tomando como referencia la clasificación empleada en el Catastro de Bosque Nativo realizado por la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF, 1999).

De esta forma se definieron tres rangos de porcentajes de cobertura vegetal, considerando las clasificaciones de CONAF y el análisis de los histogramas de frecuencia de cada imagen obtenida con UNMIX, considerando la media y las desviaciones estándar (Cuadro 4).

Los rangos son diferentes para cada año, ya que fueron definidos sobre la base de características específicas de cada imagen luego de un análisis estadístico. Así, el histograma de frecuencias fue dividido en cuatro sectores, de acuerdo a la media, a la media más una desviación estándar y la media menos una desviación estándar. Luego estos rangos se modificaron teniendo como referencia los criterios de CONAF. Este método considera las posibles

diferencias entre cada imagen (correcciones, características climáticas de los años de captura, etc.).

4.3.3 Modelo de simulación espacial

Sobre la base de los patrones de crecimiento urbano se desarrolló un Modelo de Simulación Simultánea de Cambio de Cobertura de Suelo, orientado principalmente a proyectar la distribución de las coberturas futuras. Dicho modelo se realizó en el SIG IDRISI ANDES en tres fases generales:

- i. Determinación de las probabilidades de transición de las distintas coberturas de suelo para simular la situación a un año x , sobre la base del período $x-1$, mediante el método de Cadenas de Markov.
- ii. Desarrollo de una evaluación multi criterio (EMC), de acuerdo al método propuesto por Barredo (1996) y Eastman (2003), con el objeto de determinar un mapa de aptitud para cada categoría de uso de suelo, definiendo criterios que determinan la mayor o menor aptitud que tiene cada píxel para un uso de suelo definido (desde un valor 0 con nula aptitud, a un valor 255 con máxima aptitud). En el Cuadro 5 se presentan las ponderaciones de aptitud según cobertura o uso del suelo, en donde se consideraron factores para el uso urbano tales como proximidad a las rutas principales, Capacidad de Uso del Suelo con mayor valor para las Clases I a IV, pendiente límite de 15% para la urbanización, con suelos planos de 1 a 3% de pendiente como los más propensos a urbanizarse, y forzamiento según el Plano Regulador Metropolitano de Santiago (MINVU, 2006) (Anexo 2). Se utilizaron restricciones geográficas (máscaras) de carácter booleanas (valor 0 o 1), limitando el análisis a un área geográfica particular, tales como las áreas ya urbanizadas y cuerpos de agua.

- iii. Combinación de los planos de referencia, matriz de transición de Markov y EMC de cada uso de suelo con el método de Autómatas Celulares (Eastman, 2003) para simular el uso o cobertura futuro de la tierra en las cuencas en estudio para los años 2016 y 2025.

Es importante destacar que el método utilizado se basa fundamentalmente en el modelo desarrollado por Henríquez *et al.* (2006), en el período 1978-1998 en las ciudades de Chillán y Los Ángeles.

Para el cálculo de cadenas de Markov se utilizó el Modulo MARKOV del programa IDRISI ANDES, que simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes (Paegelow *et al.*, 2003). Se establece que la probabilidad de que ocurra un suceso en una prueba dependerá de qué ocurra en todas las anteriores. Este método compara los usos de dos tiempos, t_1 y t_2 y proyecta proporcionalmente al tiempo t_3 de acuerdo con lo señalado con Eastman (2006), en que el error proporcional debe ser igual a un valor 0,15. Así también este modulo configura dos matrices:

- i. Matriz de probabilidades de transición: expresa la probabilidad que tiene un píxel de cambiar o permanecer en alguna clase en el mismo periodo de tiempo.
- ii. Matriz de áreas de transición: expresa el total de áreas (en celdas) que esperan cambiar en el próximo periodo de tiempo. Esta última es la utilizada en el Modulo CA_MARKOV del programa IDRISI ANDES.

Además entrega una serie de mapas de probabilidad condicional, con valores de 0 a 1 para cada una de las categorías en el tiempo t_3 , como proyección desde el tiempo t_1 .

Las imágenes de Aptitud son el resultado de una Evaluación Multicriterio (EMC). Para cada cobertura la imagen presenta:

- i. Restricciones o limitantes: Es un criterio que restringe la disponibilidad de algunas alternativas según la actividad evaluada; con este tipo de criterio se excluyen varias categorías de la capa analizada para la evaluación, generando una capa binaria (0 ó 1) en la cual un código representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro, la no disponibilidad para la actividad (Rivera, 2001).

- ii. Forzamientos o Factores: Es un criterio que realza o detracta la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, siendo medido en una escala continua (Rivera, 2001).

Para la creación de las imágenes de aptitud que permitieron apoyar la decisión de distribución espacial en conjunto con los Autómatas Celulares, se utilizó el comando Decision Wizard de IDRISI ANDES. Se desarrolló una EMC para cada cobertura, con sus respectivas restricciones, forzamientos o factores. Las restricciones se presentaron en imagen Raster con formato Byte en Binario, siendo 0 toda área que se encuentra excluida o restringida y 1 las áreas que se encuentran incluidas en una determinada cobertura. Los forzamientos o factores, en imagen Raster se estandarizaron en formato Byte de 0 a 255, siendo 0 nula aptitud y 255 máxima aptitud.

Para la creación de los forzamientos o factores se utilizaron varios criterios dependiendo del escenario a simular, los cuales se estandarizaron a valores entre 0 – 255 de acuerdo con lo propuesto por Eastman (2006). De esta forma se obtuvo una imagen Raster que contiene las ganancias de superficie en hectáreas sobre otras coberturas durante el periodo, las que fueron estandarizadas linealmente con el comando Fuzzy de IDRISI ANDES (Eastman, 2006).

Posteriormente, al utilizar el método Promedio Ponderado Ordenado (OWA), el cual toma en cuenta el riesgo asociado a la decisión y el grado de intercambio relacionado con las variables del análisis (Eastman, 2006), se obtuvieron tres escenarios; sin toma de riesgo, con toma de riesgo y simulación con compensación de riesgo.

Los pesos ponderados utilizados son los obtenidos mediante el comando WEITGH de IDRISI ANDES (columna Ponderaciones del Cuadro 5) el cual realiza una EMC según lo señalado por Eastman (2006).

En la fase final de la simulación se utilizó el módulo CA_MARKOV de IDRISI ANDES que integra una imagen inicial, la cual es la base para proyectar, la tabla de áreas de transición creada anteriormente con el modulo MARKOV, y las imágenes de aptitud creadas a través del módulo Decision Wizard.

Realizado este proceso se validaron las tres simulaciones obtenidas para el año 2007, comparando cada escenario de riesgo con la clasificación realizada para este año sobre la imagen Landsat a través del índice Kappa. El estudio se desarrolló con la simulación de mayor valor Kappa.

Cuadro 3. Tipología de usos y coberturas de suelo.

1	Cultivos
2	Cuerpos de Agua
3	Minería
4	Tranque de Relave
5	Forestal
6	Espacios Abiertos
7	Vegetación Dispersa
8	Vegetación Densa
9	Bosque Esclerófilo
10	Áreas Residenciales
10.1	Residencial con 0% - 10% de área Impermeabilizada
10.2	Residencial con 10% - 30% de área Impermeabilizada
10.3	Residencial con 30% - 45% de área Impermeabilizada
10.4	Residencial con 45% - 100% de área Impermeabilizada
11	Áreas Industriales
11.1	Industrial con 0% - 10% de área Impermeabilizada
11.2	Industrial con 10% - 30% de área Impermeabilizada
11.3	Industrial con 30% - 45% de área Impermeabilizada
11.4	Industrial con 45% - 100% de área Impermeabilizada

Fuente: elaboración propia sobre la base de CONAF (1999)

Cuadro 4. Clasificación de rangos de cobertura vegetal

Rango	Año 2007	Año 2003	Año 1998	Año 1989
	----- (%) -----			
Baja Cobertura Vegetal				
Espacios Abiertos	0 – 48	0 – 48	0 – 55	0 – 54
Media Cobertura Vegetal				
Vegetación Dispersa	48 – 74	48 – 72	55 – 71	54 – 80
Alta Cobertura Vegetal				
Vegetación Densa	74 – 100	72 – 100	71 – 100	80 – 100

Fuente: elaboración propia

Cuadro 5. Ponderaciones de aptitud según cobertura o uso del suelo y factores para el uso urbano

Uso/Cobertura	Factores Forzamientos	Definiciones de Factores	Ponderaciones
Cultivos	Aptitud según usos	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	0,3333
	Fondo de Valle	imagen que relaciona el contacto y proximidad de esta unidad morfológica con la cobertura en cuestión, entre mas dentro o cerca mayor probabilidad y viceversa	0,6667
Cursos y Cuerpos de Agua	Aptitud según usos	imagen que muestra usos y coberturas en las que este uso o cobertura si puede sustituir	1,0
Minería	Aptitud según usos	imagen que muestra usos y coberturas en las que este uso o cobertura si puede sustituir	1,0
Tranques de Relave	Tranques de Relave existentes	imagen que fuerza el crecimiento sólo tranques de relave existentes al año 2007	1,0
Plantaciones Eucalipto	Plantaciones de Eucalipto existentes	imagen que fuerza el crecimiento sólo en las áreas existentes al año 2007	1,0
Espacios Abiertos	Aptitud según usos	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	1,0
Vegetación Dispersa	Aptitud según usos	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	1,0
Vegetación Densa	Aptitud según usos	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	1,0
Bosque Esclerófilo	Aptitud según usos	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	0,3333
Residencial	Aptitud según usos y coberturas	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	0,1655
	Distancia Red Vial	imagen que influencia el crecimiento a las áreas cercanas a la red vial existente en el área	0,4224
	Forzamiento según PRMS	imagen que influencia pero no restringe el crecimiento de este uso en las áreas planificadas según el PRMS	0,3507
	Forzamiento según capacidad de uso del suelo y pendiente	Imagen donde la capacidad de uso, de I a IV tienen más valor, combinado con la pendiente, de hasta 15% como limite de la urbanización. Generalmente los suelos planos de 1 a 3% de pendiente son los mas propensos a urbanizarse	0,0614
Industrial	Aptitud según usos y coberturas	imagen que muestra usos en las que este si puede sustituir, se crea ya sea con las probabilidades de cambio o las hectáreas ganadas estandarizadas	0,1692
	Distancia Red Vial	imagen que influencia el crecimiento a las áreas cercanas a la red vial existente en el área	0,3874
	Forzamiento según PRMS	imagen que influencia pero no restringe el crecimiento de este uso en las áreas planificadas según el PRMS	0,4434

Fuente: elaboración propia sobre la base del desarrollo de la evaluación multicriterio

4.3.4 Evaluación y proyección del coeficiente de escorrentía superficial

Para determinar la escorrentía superficial se utilizó el modelo desarrollado por el Soil Conservation Service (USCS) (Chow, 1994), que se basa en la teoría sobre el destino de las precipitaciones en función de los resultados de estudios empíricos de varias cuencas pequeñas en Estados Unidos. El Grupo hidrológico del suelo, el cual depende del tipo de drenaje del suelo, se obtuvo de la clasificación de los estudios agrológicos de CIREN (2005) (Anexo 3). El monto de precipitaciones máximas en 24 horas se obtuvo del atlas Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días (MOP, DGA, 1991), en este caso se utilizaron las Isoyetas de precipitación máxima en 24 horas (Anexo 4). Los criterios para clasificar los suelos en grupos hidrológicos se presentan en el Anexo 5.

La ecuación que estima el escurrimiento queda descrita por (Chow, 1994):

$$Q=2,54 (CN (P/2,54+2)-200)^2 / CN (CN (P/2,54-8)+800) \quad \text{ec. (1)}$$

En que:

Q : escurrimiento (cm).

P : valor de las precipitaciones (cm), corresponde al escurrimiento potencial.

CN : valor de la curva número según uso del suelo y grupo hidrológico de suelo (Cuadro 6).

Luego, se establecieron las siguientes relaciones para la estimación de los escurrimientos en el área de estudio:

$$Q \text{ total (m}^3\text{)} = Q \text{ (cm)} \times 100 \times \text{superficie de la cuenca (ha)} \quad \text{ec. (2)}$$

La ecuación 2 expresa el volumen total de escurrimiento de la cuenca para un monto de precipitación. El caudal máximo instantáneo se obtiene según la ecuación:

$$\mathbf{Q \text{ máx. Inst. (m}^3\text{/s) = Q total (m}^3\text{) / 86.400} \quad \mathbf{ec. (3)}$$

Dado que la base de calculo corresponde a las precipitaciones en 24 horas, o en 86.400 segundos.

Expresado en L/s:

$$\mathbf{Q \text{ máx. Inst. (L/s) = Q máx. Inst. (m}^3\text{/s) x 1.000} \quad \mathbf{ec. (4)}$$

Para la evaluación del balance hídrico se considera que, del total de las precipitaciones (variable P), una parte escurre (Q) y otra parte es retenida al interior de la cuenca (P-Q) (Chow, 1994). De la fracción retenida, una parte infiltra y otra es evapotranspirada por la vegetación, de modo que:

$$\mathbf{L = P-Q} \quad \mathbf{ec. (5)}$$

$$\mathbf{L = E + I=P-Q} \quad \mathbf{ec. (6)}$$

En donde:

E= evapotranspiración

I= infiltración

Los valores de las curvas número (CN), se obtuvieron tomando como referencia los valores de las tablas publicadas por el NRCS (2009), en el software WIN TR-55. Para las áreas urbanas se tomó el promedio del valor de CN según la proporción impermeable y tipo de suelo. Los valores para cada tipología de clasificación de cobertura se presentan en el Cuadro 6. Estos se obtuvieron considerando la tipología más similar entre la clasificación utilizada en este estudio (Cuadro 4) y las clasificaciones estándares propuestas por el método (NRCS, 2009).

Cuadro 6. Curvas número según tipo de cobertura del suelo

Uso del suelo	Grupo Hidrológico de Suelos			
	A	B	C	D
Residencial				
0 - 10%	46	65	77	82
10 - 30%	57	72	81	86
30 - 45%	61	75	83	87
45 - 100%	77	85	90	92
Promedio	59,9	75,09	83,57	87,08
Industrial				
0 - 10%	46	65	77	82
10 - 30%	57	72	81	86
30 - 45%	61	75	83	87
45 - 100%	77	85	90	92
Promedio	59,6	68,5	83,97	87,08
Bosque Esclerófilo	30	55	70	77
Cultivos	67	78	85	89
Espacios Abiertos	63	77	85	88
Vegetación Dispersa	55	72	81	86
Vegetación Densa	32	58	72	79
Forestal	-	-	-	-
Minería	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia a partir de NRCS (2009).

4.3.5 Métrica de paisajes y pérdida de suelos agrícolas

A partir de las clasificaciones de uso del suelo para las imágenes de referencia y las situaciones proyectadas, se obtuvieron las medidas de superficies, perímetros, tamaño, y número de parches de vegetación natural según cuenca y tipo de cobertura considerando las tipologías de Bosque Esclerófilo, Espacios Abiertos, Vegetación Dispersa y Vegetación Densa, según la metodología descrita por Romero y Vásquez (2005). El conjunto de coberturas se estandarizó a un polígono mínimo de 1 ha, mediante la función Eliminate del software Arcgis 9.2, para formatos vectoriales. Esta función elimina los polígonos de superficies menores incorporándolos al polígono vecino.

Por otra parte, se cuantificó la pérdida de suelos con potencial agrícola definidos por la cartografía de Capacidad de Uso de los Suelos del Estudio Agrológico de la Región Metropolitana (CIREN, 2005).

5 RESULTADOS

5.1 Área de estudio

El estudio se limita a la cuenca hidrográfica del estero Lampa, cuyos tributarios son los esteros Caleu, Rungue, Tilttil, Polpaico, Peldehue y Chacabuco con sus tributarios Santa Margarita, El Cobre y Quilapilún; y parte de la cuenca del estero Colina. Administrativamente corresponde a las Comunas de Colina, Lampa y Tilttil, Provincia de Chacabuco. Debido a que no se contaba con información en los sectores cordilleranos, una parte de esta zona se excluyó como área de estudio. De esta forma, de las 201.408 ha de la Provincia de Chacabuco, el área de estudio incluye 179.903 ha, lo que corresponde a un 89,3%, para las clasificaciones de 1989, 1998, 2003 y 2007. En el caso de los análisis de simulaciones de uso del suelo, balance hídrico y métrica de paisajes, el área de estudio se limitó a 177.259,5 ha.

Se dividió el área de estudio en 9 cuencas hidrográficas. Las superficies según cuencas y cauces asociados se presentan en el Cuadro 7. En la Figura 3 se presenta la distribución espacial de las cuencas y esteros asociados.

5.2 Coberturas de suelos

Las superficies obtenidas como resultado de las clasificaciones realizadas sobre las imágenes Landsat de los años 1989, 1998, 2003 y 2007 se presentan en el Cuadro 8 y en las Figuras 4 a 7. Las tendencias de cambio se indican en el Cuadro 9 y se grafican en la Figura 8. En las Figuras 9 a 12 se presentan las superficies de avance de coberturas Industrial, Residencial y asociados a actividades de Minería para el periodo en estudio, así como las superficies de cambio de coberturas vegetales (Bosque Esclerófilo, Espacios abiertos, Vegetación Dispersa y Vegetación Densa).

De estas clasificaciones se hace evidente que las Áreas Industriales aumentaron su superficie de 119 ha en el año 1989 a 1.632 ha al año 2007, con incrementos de 49 ha/año durante el periodo 1989 – 1998, 83 ha/año entre 1998 – 2003, y de 165 ha/año entre 2003 y 2007. Las superficies de Área Residenciales aumentaron de 1.135 ha en 1989 a 1.898 ha al año 2007, con incrementos de 28, 38 y 80 ha/año durante los periodos 1989-1998, 1998-2003 y 2003-2007, respectivamente.

Para la categoría Bosque Esclerófilo se estimó en 1989 una superficie de 8.149 ha, aumentando a 10.473 ha en 1998, prácticamente manteniendo su superficie en 2003 con 10.498 ha, y disminuyendo a 7.511 ha en el año 2007. La superficie de Cultivos, muestra una clara disminución. Se estimaron 30.808 ha cultivadas en el año 1989, las que disminuyeron a 19.296 ha en 1998, luego a 14.378 ha en 2003, sin embargo han mostrado un aumento hacia el año 2007. Las tasas de cambio anual son de -1.279 ha, -983 ha, y 139 ha, durante los periodos 1989 – 1998, 1998 – 2003 y 2003 – 2007, respectivamente.

En la categoría espacios abiertos se produce una tendencia errática. En el año 1989 se estimaron 30.063 ha, las que disminuyeron a 5.749 ha al año 1998, aumentaron a 11.591 ha al año 2003, presentando 10.575 ha en 2007. Este comportamiento se asocia a cambios por variaciones interanuales de la vegetación, los que podrían estar vinculados a años hidrológicos secos y húmedos determinados por los fenómenos del Niño y La Niña. En el caso de Vegetación Dispersa, al año 1989 se estimaron 95.324 ha, posteriormente al año 1998, 137.467 ha, al año 2003 135.019 ha, y al año 2007 136.369 ha. Más adelante, al analizar las superficies de cambio entre categorías por periodos se discuten estas diferencias.

La categoría Forestal está asociada a la disipación de aguas claras efluentes desde los tranques de relaves Ovejería y Las Tórtolas. La operación de estos proyectos se evidencia a partir de 1998 con 218 ha de plantaciones forestales,

las que aumentan a 404 ha en 2003 y a 838 ha en 2007. A su vez, la categoría Tranques de Relaves, ocupa 404 ha en 1998, 1.272 ha en 2003 y 1.498 ha en 2007. Las superficies clasificadas como Minería, indican 409 ha en 1989, 603 ha en 1998, 698 ha en 2003 y 680 ha en 2007.

La superficie de Vegetación Densa, indica que el año 1989 existían 12.462 ha, las que disminuyen a 2.123 ha en 1998, y a 1.555 ha en 2003, aumentando a 2.069 ha en 2007. Se observa que durante el periodo 1989 – 1998, las mayores superficies están asociadas a la pérdida de Cultivos y Vegetación Densa, en que 11.704 ha y 9.574 ha se clasificaron como Vegetación dispersa en 1998 respectivamente (Anexo 6).

Cuadro 7. Cuencas hidrográficas en el área de estudio, cauces asociados y superficies

Cuenca	Cauce Principal	Cauces Tributarios	Superficie Cuenca (ha)	Superficie en Área de Estudio (ha)
Estero Til-Til	Estero Til-Til	Estero Rungue	32.495	32.495
		Estero Caleu		
		Estero El Asiento		
Estero Lampa	Estero Lampa	Estero Chacabuco	42.497	42.497
		Estero Til-Til		
		Estero Polpaico		
Estero Chacabuco	Estero Chacabuco	Estero Santa Margarita	63.829	57.494
		Estero El Cobre		
		Estero Quilapilún		
		Estero Peldehue		
Estero Colina Bajo	Estero Colina Bajo		40.658	40.658
Estero Colina Alto	Estero Colina Alto		21.930	5.234
Río Mapocho	Río Mapocho			1.525
Total			201.408	179.903

Fuente: elaboración propia sobre la base de OTAS (2000).

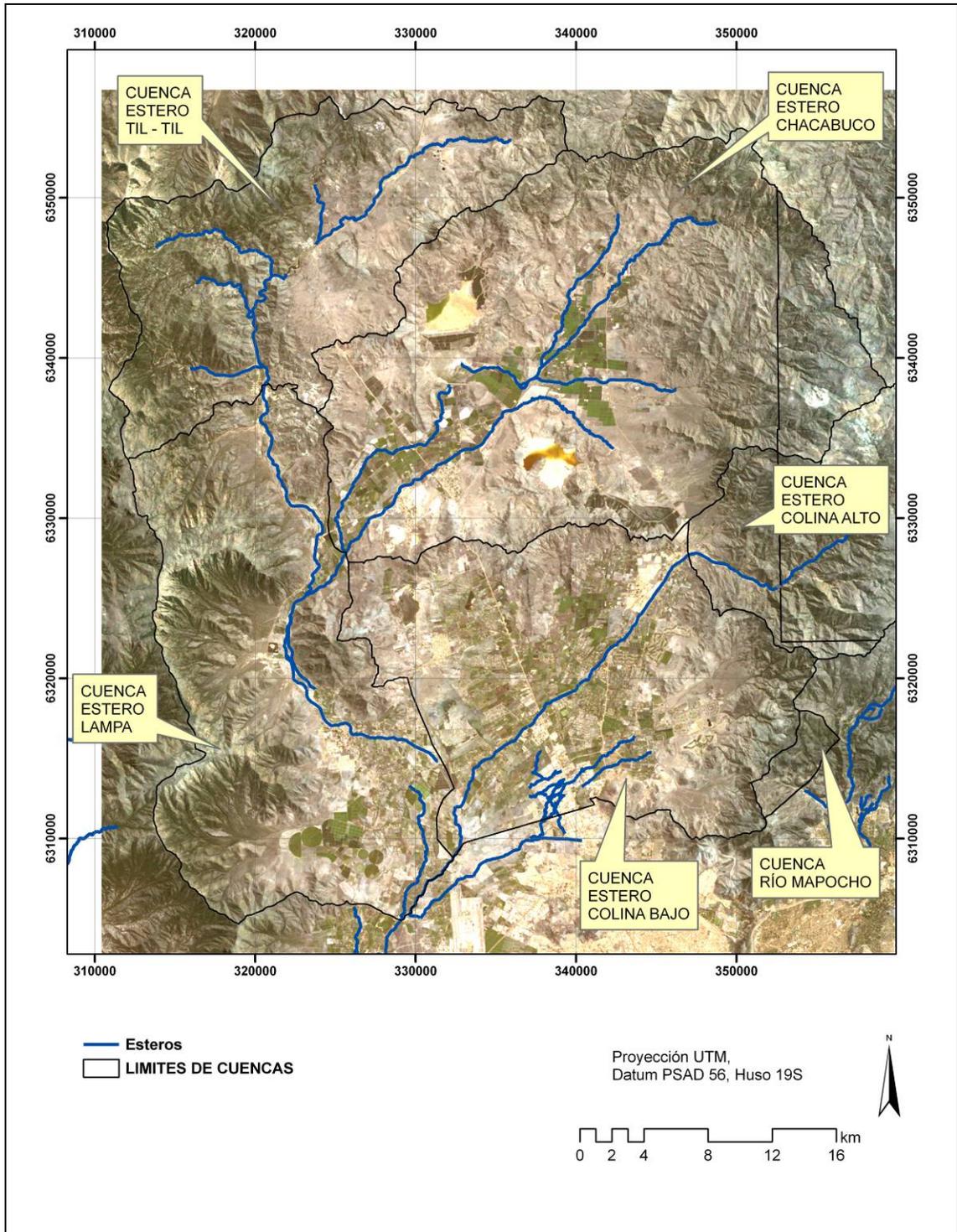


Figura 3. Cuencas hidrográficas en el área de estudio

Cuadro 8. Superficies según cobertura del suelo, años 1989, 1998, 2003 y 2007

Uso o cobertura	Superficie según fecha (ha)			
	17/03/89	29/01/98	04/02/03	23/02/07
Área Industrial	119	557	973	1.632
Área Residencial	1.135	1.389	1.579	1.898
Bosque Esclerófilo	8.149	10.473	10.498	7.511
Cultivos	30.808	19.296	14.378	14.935
Cursos y Cuerpos de Agua	1.869	1.869	1.869	1.832
Espacios Abiertos	30.063	5.749	11.591	10.575
Forestal		218	404	838
Minería	409	603	698	680
Tranque Relave		404	1.272	1.498
Vegetación Densa	12.462	2.123	1.555	2.069
Vegetación Dispersa	95.324	137.467	135.019	136.369
Total general	180.338	180.148	179.838	179.838

Cuadro 9. Cambio anual de superficies según cobertura del suelo, años 1989, 1998, 2003 y 2007

Uso o cobertura	Superficie anual de cambio (ha/año)		
	Periodo 1989 - 1998	Periodo 1998 - 2003	Periodo 2003 - 2007
Área Industrial	49	83	165
Área Residencial	28	38	80
Bosque Esclerófilo	258	5	-747
Cultivos	-1.279	-983	139
Cursos y Cuerpos de Agua	0	0	-9
Espacios Abiertos	-2.702	1.168	-254
Forestal	24	37	108
Minería	22	19	-4
Tranque Relave	45	174	57
Vegetación Densa	-1.149	-113	128
Vegetación Dispersa	4.683	-490	338

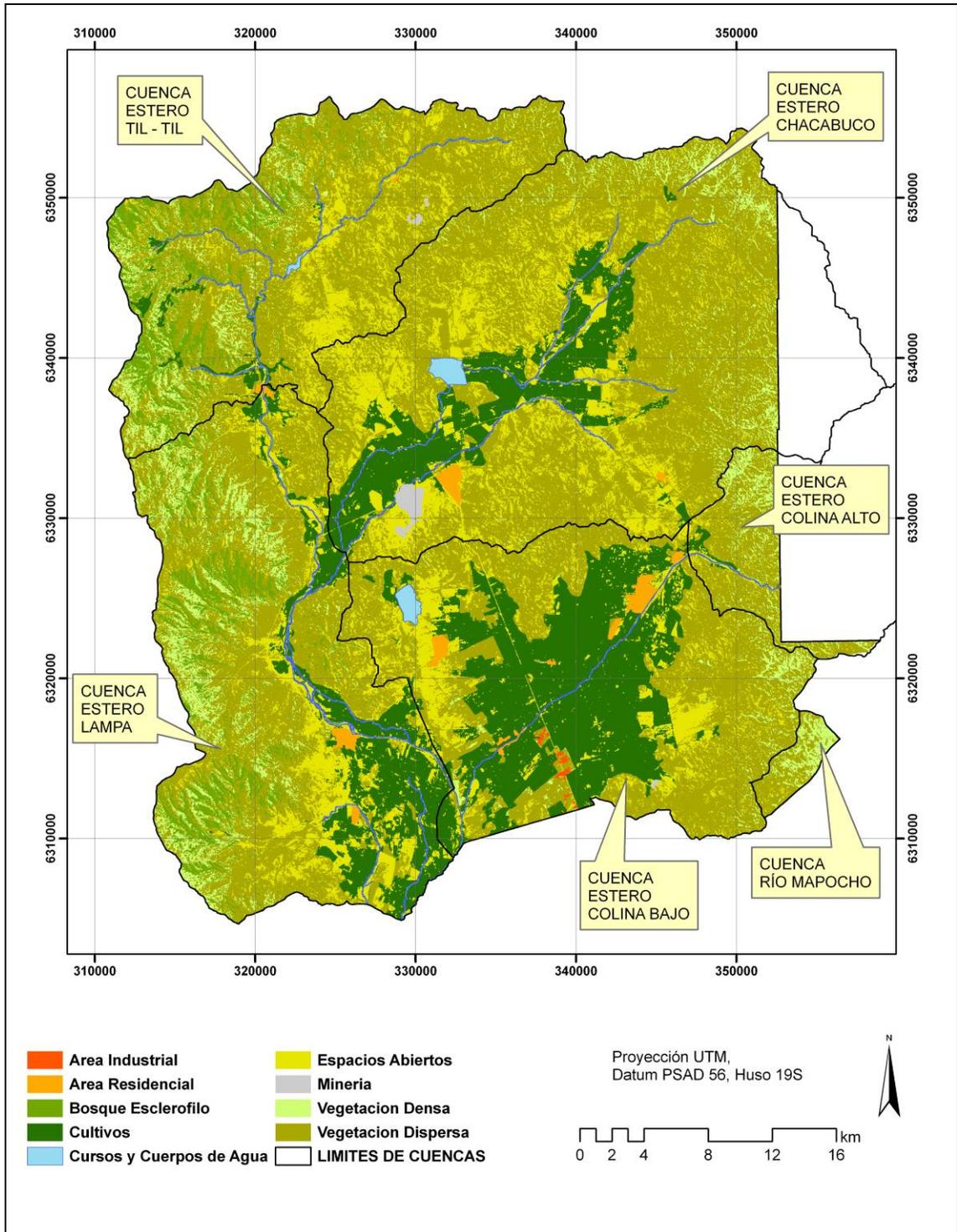


Figura 4. Coberturas de uso de suelo. Año 1989

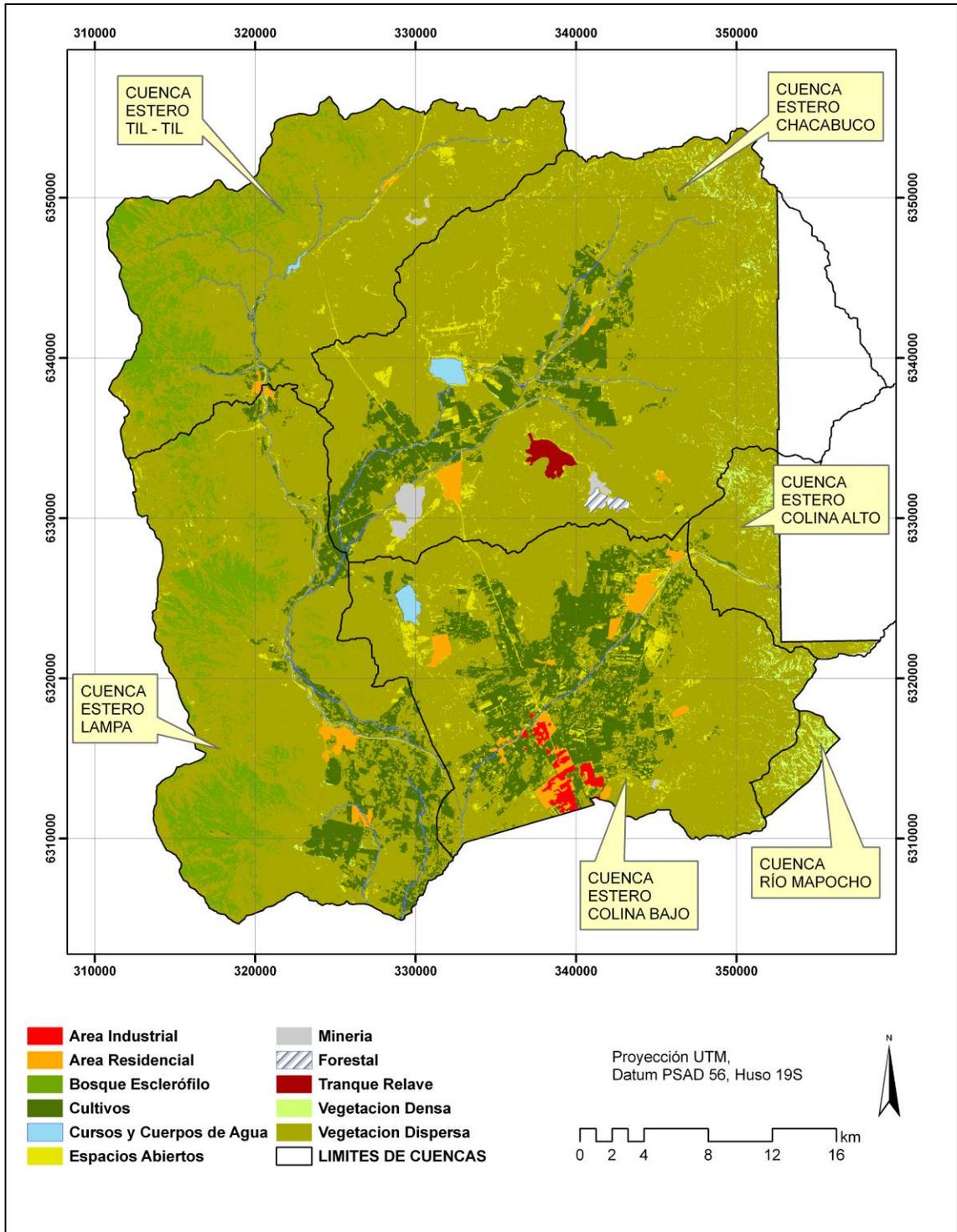


Figura 5. Coberturas de uso de suelo. Año 1998

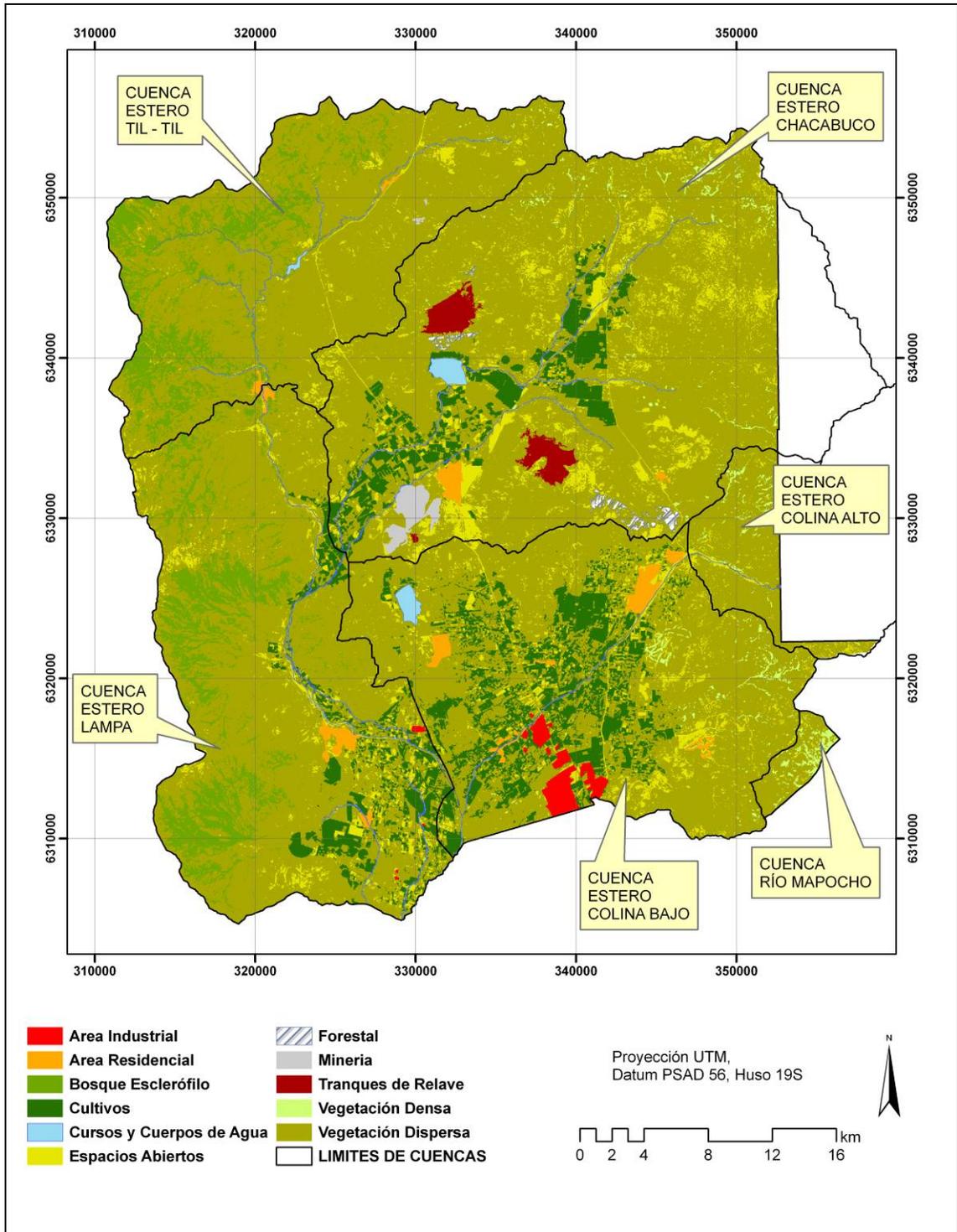


Figura 6. Coberturas de uso de suelo. Año 2003

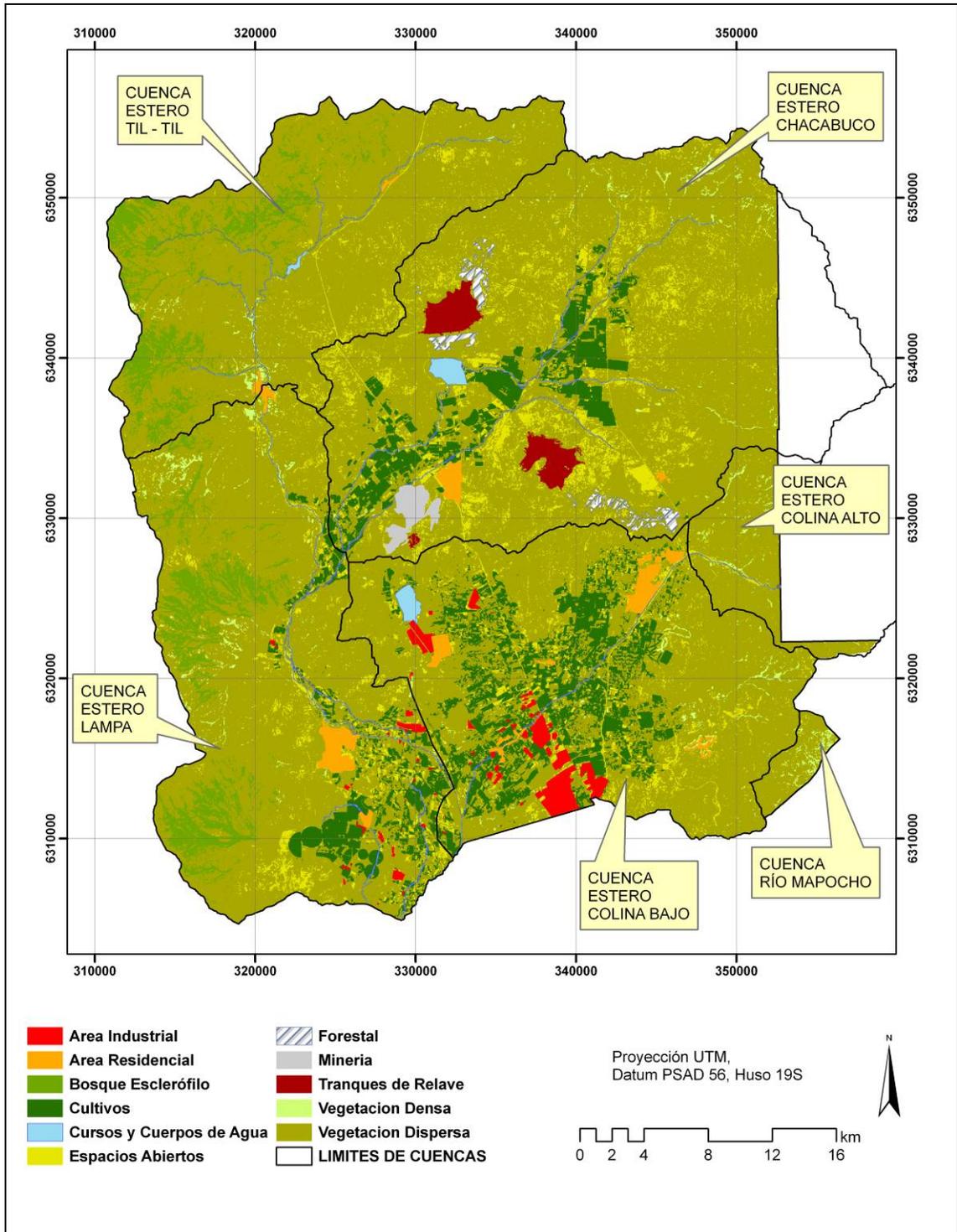


Figura 7. Coberturas de uso de suelo. Año 2007

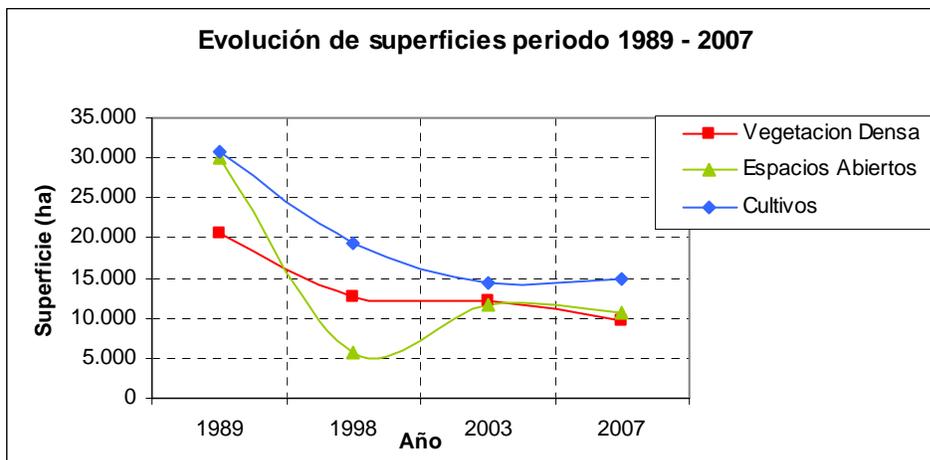
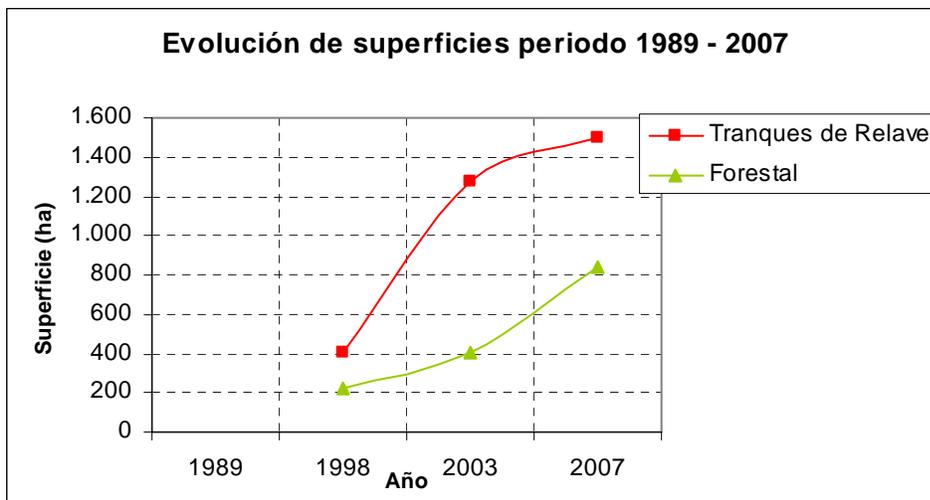
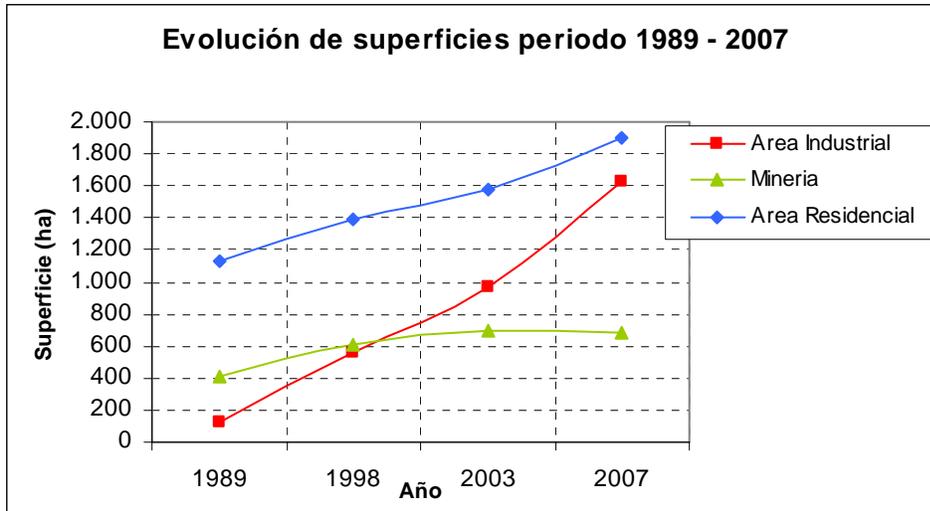


Figura 8. Superficies según categorías, periodo 1989 - 2007

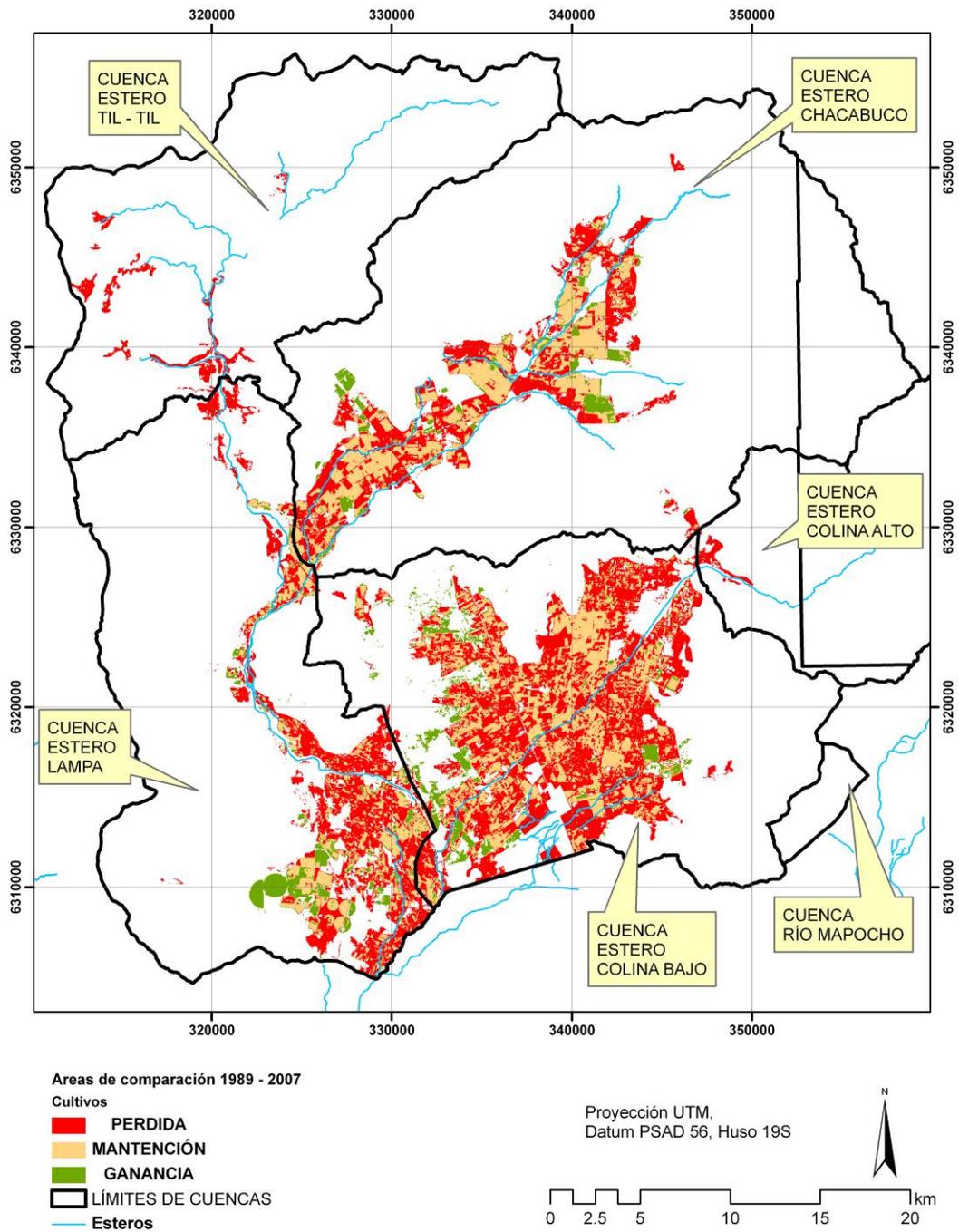


Figura 9. Áreas de Pérdida, Mantenimiento y Ganancia de Superficies de Cultivos entre 1989 y 2007

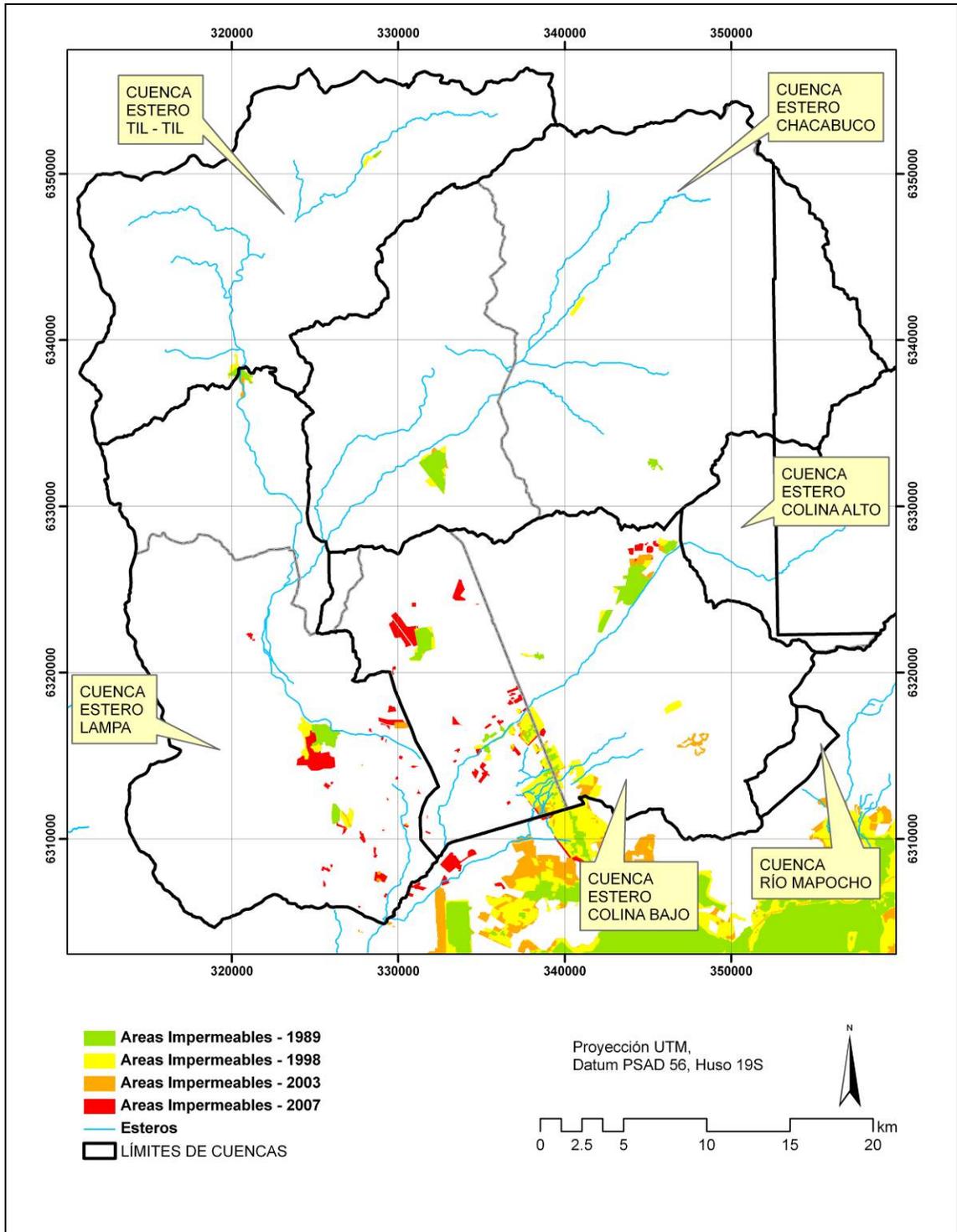


Figura 10. Áreas de Expansión Urbana entre 1989 y 2007

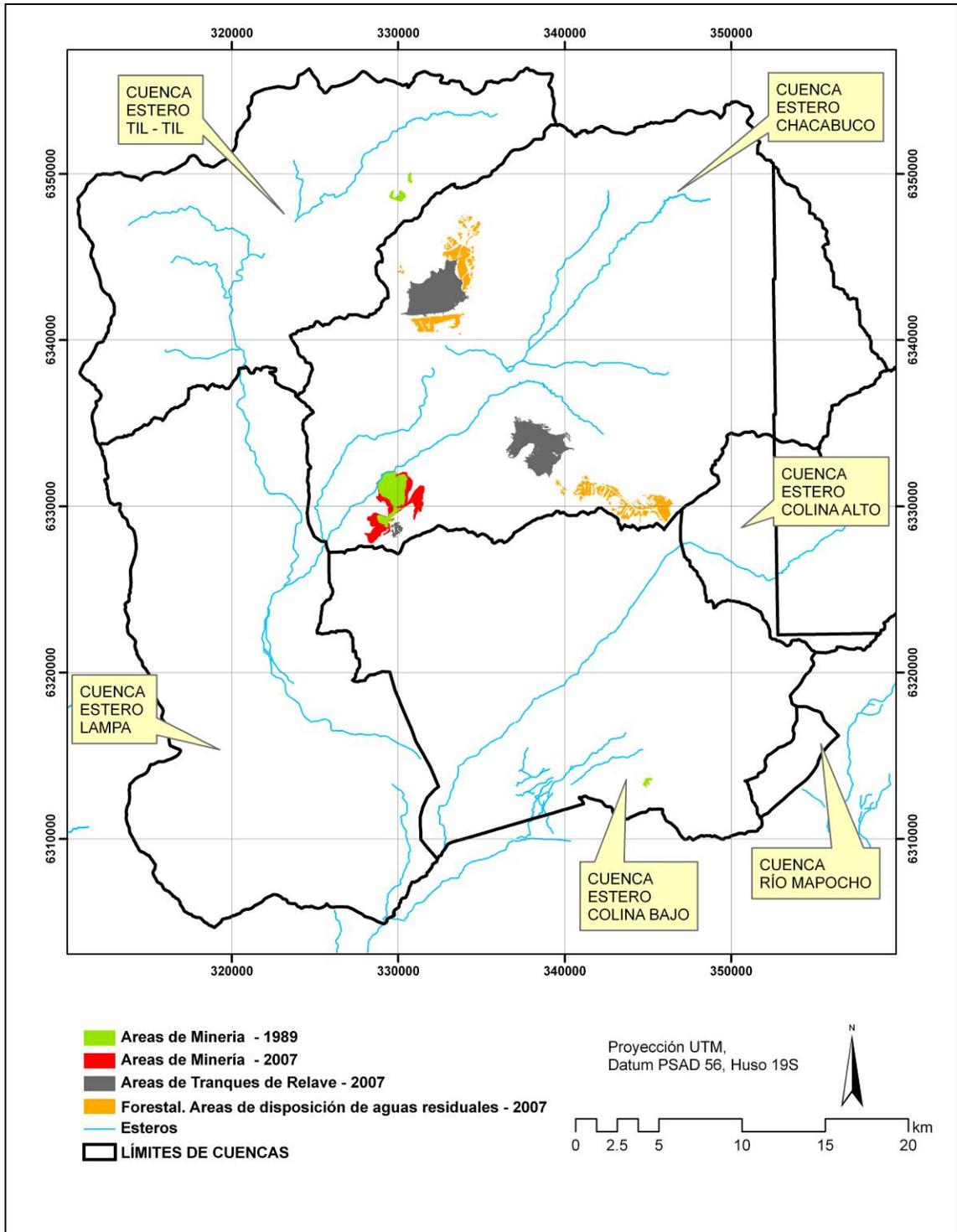


Figura 11. Áreas de Expansión asociadas a Minería entre 1989 y 2007

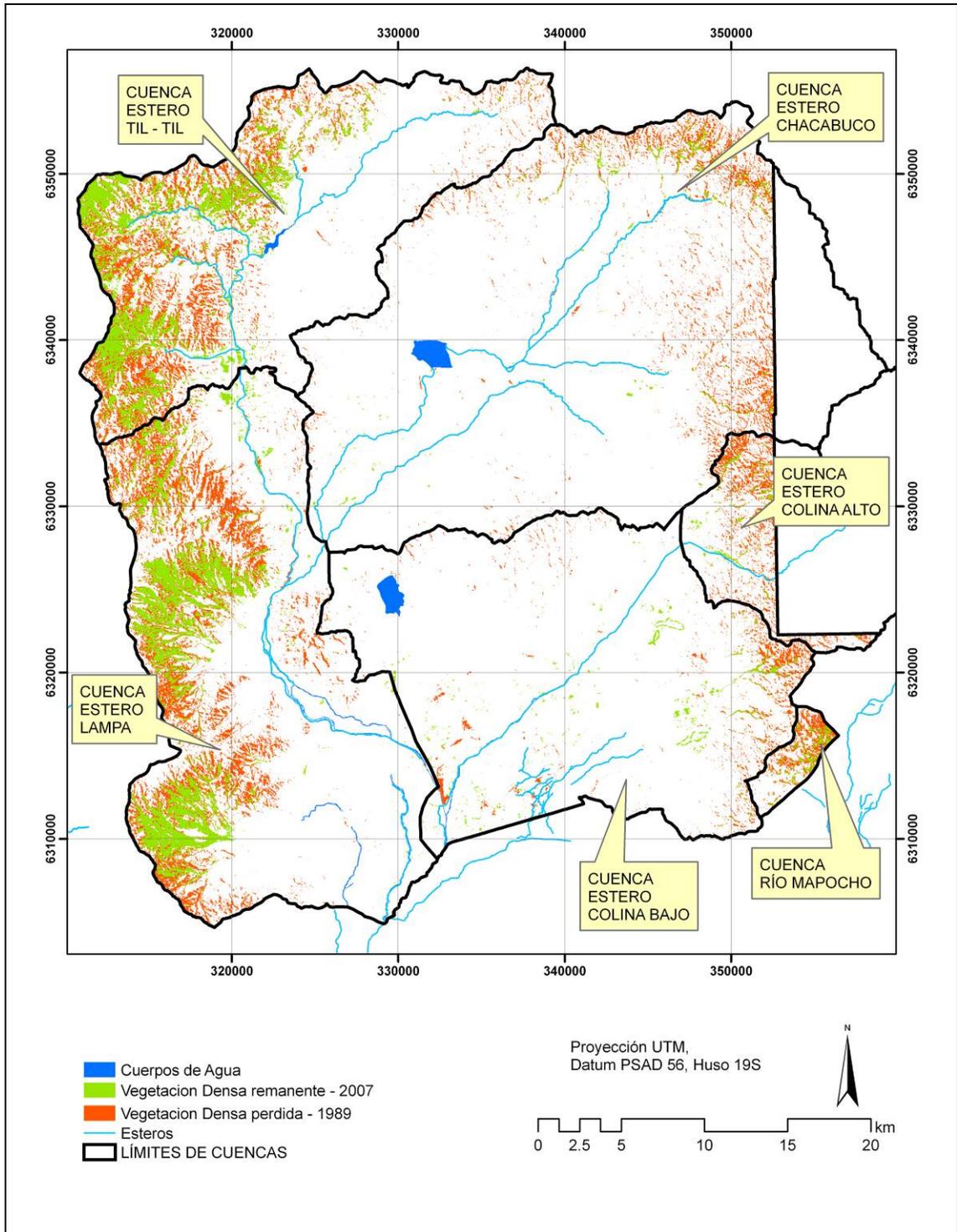


Figura 12. Comparación de áreas de Bosque Esclerófilo y Vegetación densa entre 1989 y 2007

En los periodos 1998 – 2003 y 2003 – 2007 los mayores cambios están asociados a la pérdida de superficies de Cultivos con 7.931 y 4.563 ha que cambian a la categoría Vegetación Dispersa.

En general, se observa que las coberturas con mayores superficies corresponden a las categorías Vegetación Dispersa, Cultivos y Espacios Abiertos en la mayor parte de las cuencas en el área de estudio. Por otra parte, las cuencas con mayores superficies de la categoría Cultivos son las de los esteros Colina Bajo, Chacabuco y Lampa (Anexo 7).

Según esto, en el Cuadro 10 se presentan las tendencias de cambio de superficies según cuenca en el periodo 1989 – 2007, para los usos Cultivos, Áreas Residenciales y Áreas Industriales. La disminución de la superficie de Cultivos en el periodo 1989 – 2007 es de 19,52% en la cuenca del Estero Colina Bajo, de 8,09% en la cuenca del estero Lampa, y de 6,16% en la cuenca del estero Chacabuco.

5.3 Áreas impermeables

Sobre la base de la consideración de la superficie clasificada como urbana, que incluye Áreas Residenciales e Industriales, se establece que éstas constituyen las Áreas Totales Impermeables (ATI). Restando la proporción de cubierta vegetal al interior de las ATI, se determinan las Áreas Efectivas Impermeables (AEI), en rangos de 0-10%, 10-30%, 30-45% y 45-100%, de tal forma que la suma de las AEI en los diferentes rangos es igual a los valores de ATI.

5.3.1 Áreas Totales Impermeables

En cuanto a las superficies de Áreas Residenciales, la cuenca que presenta el mayor aumento en el periodo 1989 - 2007 es la del estero Lampa con un

0,92%, en menores proporciones la del estero Colina Bajo con un 0,66%, Til-Til con un 0,14% y Chacabuco con un 0,10% (Cuadro 20).

Las Áreas Industriales presentan el mayor aumento en la cuenca del Estero Colina Bajo con un 3,16% de incremento en la superficie. En la cuenca del Estero Lampa presentan una variación de 0,54% (Cuadro 10).

De esta forma, en el Cuadro 11 se presenta la evolución de las ATI. Se observa que, la cuenca del Estero Colina Bajo es la que presenta las mayores proporciones de ATI con valores de 1,77% en 1989 y 5,59% al año 2007. La cuenca del Estero Lampa, aumentó sus ATI desde 0,57% en 1989 a 2,04% en 2007.

Cuadro 10. Proporción de superficie por categoría y tasa de cambio según cuenca en el periodo 1989 – 2007

Cuenca	Cobertura	1989	2007	Diferencia
Colina bajo	Cultivos	37,56%	18,04%	-19,52%
Lampa	Cultivos	15,38%	7,28%	-8,09%
Chacabuco	Cultivos	13,99%	7,84%	-6,16%
Colina Alto	Cultivos	3,11%	0,03%	-3,08%
Til Til	Cultivos	2,15%	0,00%	-2,15%
Chacabuco	Área Residencial	0,44%	0,55%	0,10%
Til Til	Área Residencial	0,10%	0,24%	0,14%
Lampa	Área Industrial	0,00%	0,54%	0,54%
Colina bajo	Área Residencial	1,48%	2,15%	0,66%
Lampa	Área Residencial	0,57%	1,49%	0,92%
Colina bajo	Área Industrial	0,29%	3,45%	3,16%

La cuenca del Estero Chacabuco muestra un leve incremento de las ATI que va desde un 0,44% en 1989 a 0,55% en 2007. La cuenca con la menor proporción de ATI es la del Estero Til Til, con valores de 0,10% en 1989, que incrementan a 0,24% en 2007. Las otras cuencas en el área de estudio no presentan ATI. Un

aspecto relevante es que ninguna cuenca sobrepasa el 10% de ATI al año 2007.

Cuadro 11. Proporción Áreas Totales Impermeables (ATI) según cuenca en el periodo 1989 – 2007

Año	Áreas Totales de Impermeabilización (ATI) (%)						Total general
	Estero Chacabuco	Estero Colina Alto	Estero Colina Bajo	Estero Lampa	Estero Til-Til	Río Mapocho	
1989	0,44%	0,00%	1,77%	0,57%	0,10%	0,00%	0,70%
1998	0,59%	0,00%	4,33%	0,95%	0,23%	0,00%	1,43%
2003	0,55%	0,00%	4,27%	1,00%	0,24%	0,00%	1,42%
2007	0,55%	0,00%	5,59%	2,04%	0,24%	0,00%	1,96%

5.3.2 Áreas Efectivas Impermeables

Al desagregar estas ATI en rangos de proporción de superficie impermeable y por actividad Residencial o Industrial (Anexo 8), se observa que la mayor parte de las áreas presentan más de 30% de impermeabilización, con un aumento notable de este tipo de superficies en el periodo 1989 – 2007.

Las Áreas Residenciales (Anexo 8) muestran una tendencia general a aumentar en una mayor superficie en el rango 45-100% de impermeabilización (492 ha de aumento en el periodo 1989-2007), a la vez que las superficies en el rango 30-45% de impermeabilización disminuyen (108,6 ha menos en el periodo 1989-2007). Los rangos de 0-10% y 10-30% aumentan en 192,0 y 175,6 ha respectivamente. La disminución de la superficie Residencial con 30-45% de impermeabilización puede deberse a un aumento de las cubiertas vegetales por conformación de jardines y crecimiento de árboles, disminuyendo la proporción de suelos desnudos.

Las Áreas Industriales muestran un claro aumento en la cuenca del Estero Colina Bajo, en que las superficies en el rango 45-100% de Impermeabilización

son las de mayor desarrollo (Anexo 8), con 828 ha incorporadas en el periodo 1989-2007 de un total de 896 ha.

5.4 Pérdida de suelos

La superficie ocupada por periodo por las ATI según Clase de Capacidad de Uso del Suelo se indica en el Cuadro 12. Se observa que las Clases I a IV (suelos arables) concentran más de la mitad del desarrollo urbano en el periodo 1989-2007 con 1.453,9 ha de un total de 2.278,0.

Cuadro 12. Superficies según Clase de Capacidad de Uso ocupadas por Áreas Residenciales e Industriales en el periodo 1989 – 2007

Capacidad de Uso	Superficie ocupada en el periodo			
	1989-1998	1998-2003	2003-2007	1989-2007
	----- (ha) -----			
I	47,6	19,0	270,9	337,6
II	113,4	3,9	111,1	228,3
III	223,4	23,7	294,1	541,2
IV	146,0	-12,6	213,4	346,8
N.C.	139,8	-43,1	35,1	131,7
VI	156,6	1,7	24,7	182,9
VII	268,1	-35,9	154,3	386,5
VIII	223,1	35,5	25,1	283,6
TOTAL	1.318,0	-7,9	968,0	2.278,0

En cuanto al comportamiento hidrológico se clasificaron los suelos en grupos hidrológicos, según se describe en el Anexo 5. Considerando esta clasificación, el crecimiento de las ATI en el periodo 1989-2007 se produce preferentemente sobre suelos de gran capacidad de infiltración (784,5 ha del Grupo A) y sobre suelos que naturalmente presentan un alto potencial de generación de escurrimientos superficiales (1.281,6 ha del Grupo D) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Superficies según Grupo Hidrológico de suelos ocupadas por Áreas Residenciales e Industriales en el periodo 1989 – 2007

GRUPO HIDROLÓGICO	Superficie ocupada en el periodo			
	1989-1998	1998-2003	2003-2007	1989-2007
	----- (ha) -----			
A	282,0	77,3	425,3	784,5
B	23,6	-23,1	0,9	1,5
C	75,6	-3,2	2,3	74,6
D	793,4	-16,1	504,4	1.281,6
N.C.	143,4	-42,8	35,1	135,8
TOTAL	1.318,0	-7,9	968,0	2.278,0

Considerando la superficie de AEI la ocupación de los suelos disminuye en 1.282,7 ha para el año 2007 (Cuadro 14), sobre un total de AEI de 2.260 ha. Esto significa que de las 3.542,7 ha clasificadas como ATI, existen 1.282,7 ha de suelos permeables, de tal forma que la superficie efectiva impermeabilizada o AEI es de 2.260,0 ha.

Cuadro 14. Superficies según Grupo Hidrológico de suelos ocupadas por Áreas Residenciales e Industriales en el periodo 1989 – 2007 desagregadas en ATI y AEI

GRUPO HIDROLÓGICO	Superficie (ha)		
	ATI	AEI	ATI-AEI
A	1.023,2	582,2	441,0
B	28,9	18,0	10,9
C	81,9	35,9	46,0
D	1.661,0	1.132,0	529,0
N.C.	747,8	491,9	255,9
TOTAL	3.542,7	2.260,0	1.282,7

5.5 Simulaciones de uso del suelo

De acuerdo con las tendencias observadas para el periodo 1989 – 2007, se simularon dos escenarios futuros para los años 2016 y 2025. En estas simulaciones se utilizaron como escenarios alternativos la consideración de riesgo, desarrollando el método del Promedio Ponderado Ordenado (OWA), el cual toma en cuenta el riesgo asociado a la decisión y el grado de intercambio relacionado con las variables del análisis (Eastman, 2006). Para este caso se utilizaron:

- i. toma de decisión sin compensación de riesgo
- ii. toma de decisión con toma de riesgo
- iii. toma de decisión con compensación completa

Según esto se realizaron simulaciones para el año 2007 con el objeto de calcular el índice Kappa. Los resultados de la concordancia entre la clasificación de coberturas del suelo realizada sobre la imagen del año 2007 y la proyección entregada por el modelo de simulación se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Resultados de concordancia espacial para el año 2007

Escenario	Índice Kappa
Simulación sin toma de riesgo	75,5%
Simulación con toma de riesgo	75,2%
Simulación con compensación de riesgo	88,2%

Se observa que la simulación que presenta la mayor concordancia es el escenario con compensación de riesgo, de tal forma que se aceptan las simulaciones para los años 2016 y 2025 bajo este ordenamiento de factores de restricción como las de mayor probabilidad de ocurrencia, y serán las utilizadas

en los análisis de proyección de balance hídrico e impactos ambientales.

En el Cuadro 16 se presentan los resultados de las simulaciones para los años 2016 y 2025, incluyendo la situación real clasificada para el año 2007. En las Figuras 13 y 14 se presentan las cartografías de coberturas resultantes. En el Cuadro 17 se presenta la situación para los usos Cultivos, Residencial e Industrial.

Según las proyecciones, las superficies de cultivo presentarían una tendencia a disminuir al año 2016 y luego a aumentar al año 2025. Las superficies de áreas Residenciales e Industriales presentarían una tendencia a aumentar, de tal forma que las ATI superarían el 10% en la cuenca del Estero Colina Bajo, alcanzando un 11,2% (Cuadro 18), pasando de un estado natural a uno impactado de acuerdo con Arnold y Gibbons (1994).

5.6 Proyección de pérdida de suelos

En los Cuadros 19 y 20 se presentan las superficies adicionales ocupadas por ATI tomando como referencia la clasificación del año 2007, según Grupo Hidrológico de suelos y Clase de Capacidad de Uso para las simulaciones de los años 2016 y 2025. En el Cuadro 21 se indican las superficies ocupadas por ATI por periodo respecto del total según Clase y Cuenca.

Se observa que del Grupo Hidrológico A se ocupan 43,0 ha en el periodo 2007 – 2016 y 1.388,6 ha en el periodo 2007 – 2025. De los Grupos Hidrológicos B y C las superficies ocupadas son 153,9 ha y 348,3 ha respectivamente durante el periodo 2007- 2025. Las superficies ocupadas por ATI del Grupo Hidrológico D alcanzan a 453,9 ha en 2016 y a 1.713,1 ha en 2025. Esto implica que en el periodo 2007 – 2025 se ocuparía un 36% de los suelos con mejores capacidades de infiltración.

Al considerar las Capacidades de Uso de los suelos (Cuadro 33), específicamente los suelos con aptitud agrícola definidos por las Clases I a IV, se observa que las cuencas de los Esteros Colina Bajo y Lampa concentran el 90% de las nuevas áreas con 2.312,5 ha de un total de 2.561,5 ha en el periodo 2007 - 2025. De estas áreas en suelos de Clase I, al año 2025 se ocuparían por ATI un 8,3% del total de la cuenca del Estero Colina Bajo y un 24,8% en la cuenca del Estero Lampa, que representa un aumento de 10,2% sobre lo existente en 2007 en esta cuenca.

Respecto de los suelos de Clase II de Capacidad de Uso, se observa un aumento de 450,1 ha ocupadas por ATI en 2007 a 503,0 ha en 2016 y a 998,7 ha en 2025, lo que representa aumentos de 2,9% a 3,2% y a 6,4% sobre el total de suelos de esta Clase en el área de estudio. Las cuencas de los Esteros Colina Bajo y Lampa ocuparían un 9,1% y un 8,7% del total de la Clase al año 2025, representando un aumento de 6% y 4% respecto de la situación observada en 2007.

La situación de los suelos de Clase III indica que las ATI pasarían de ocupar 721,1 ha en 2007 a 910,2 ha en 2016 y 1.780 ha en 2025, en que la cuenca del Estero Colina Bajo concentra el 57,1% del aumento al año 2025 ocupando el 14,2% del total de suelos de esta Clase, lo que representa un aumento de 8,9% respecto de 2007. En la cuenca del Estero Lampa aumentaría un 7,2% la ocupación de los suelos Clase III, alcanzando 534,7 ha en 2025 lo cual representa un 11,3% del total de los suelos clasificados en esta Clase de Capacidad de Uso. Las cuencas de los Esteros Chacabuco y Til Til, llegarían a ocupar un 6,0% y un 6,4% respectivamente al año 2025 con aumentos de 1,4% y 5,0% desde lo observado en 2007.

Los suelos de Clase IV, son ocupados por las ATI de 404,8 ha en 2007 a 564,1 ha en 2016 y 1.073,7 en 2025. Las cuencas de los Esteros Colina Bajo y Lampa concentran el aumento con un 12,7% y un 18,0% respecto del total de la Clase

en cada cuenca. Las cuencas de los Esteros Chacabuco y Til Til, aumentan un 0,2% en el periodo 2007 – 2025.

5.7 Proyección del balance hídrico

Dadas las simulaciones de cambio de uso del suelo para los años 2016 y 2025, se procedió a calcular las fracciones de Escurrimiento (Q) y Retención (L) al interior de las cuencas en estudio, comparando con la situación establecida para el año 2007 según las ecuaciones 2, 3 y 6. Los resultados para precipitaciones máximas en 24 horas se presentan en el Cuadro 22.

5.7.1 Escorrentía

Se observa que los volúmenes de escorrentía (Q) aumentan de 57.399.428 m³ en 2007 a 57.825.545 m³ en 2016 y a 58.488.232 m³ en 2025, equivalentes a un caudal continuo de 664,3, 669,3 y 676,9 m³/s para los años 2007, 2016 y 2025 respectivamente. Estos aumentos representan variaciones en la escorrentía de 0,74% para el año 2016 y 1,90% para el año 2025 respecto de la situación establecida para el año 2007.

Las cuencas de Colina Bajo y Lampa, en que se produciría el mayor desarrollo de las superficies impermeables según el modelo de simulación, presentan una disminución de la escorrentía de 0,06 % y 0,71% para el año 2016, y un aumento de 2,43% y 1,47% para el año 2025 respectivamente.

La disminución de la escorrentía en la simulación del año 2016 estaría asociada a un aumento de la Categoría de Vegetación Dispersa, a una disminución de las áreas de cultivo y a una mayor ocupación de suelos del grupo hidrológico D. El aumento de la escorrentía al año 2025 se produciría por la ocupación de suelos del Grupo A por las ATI.

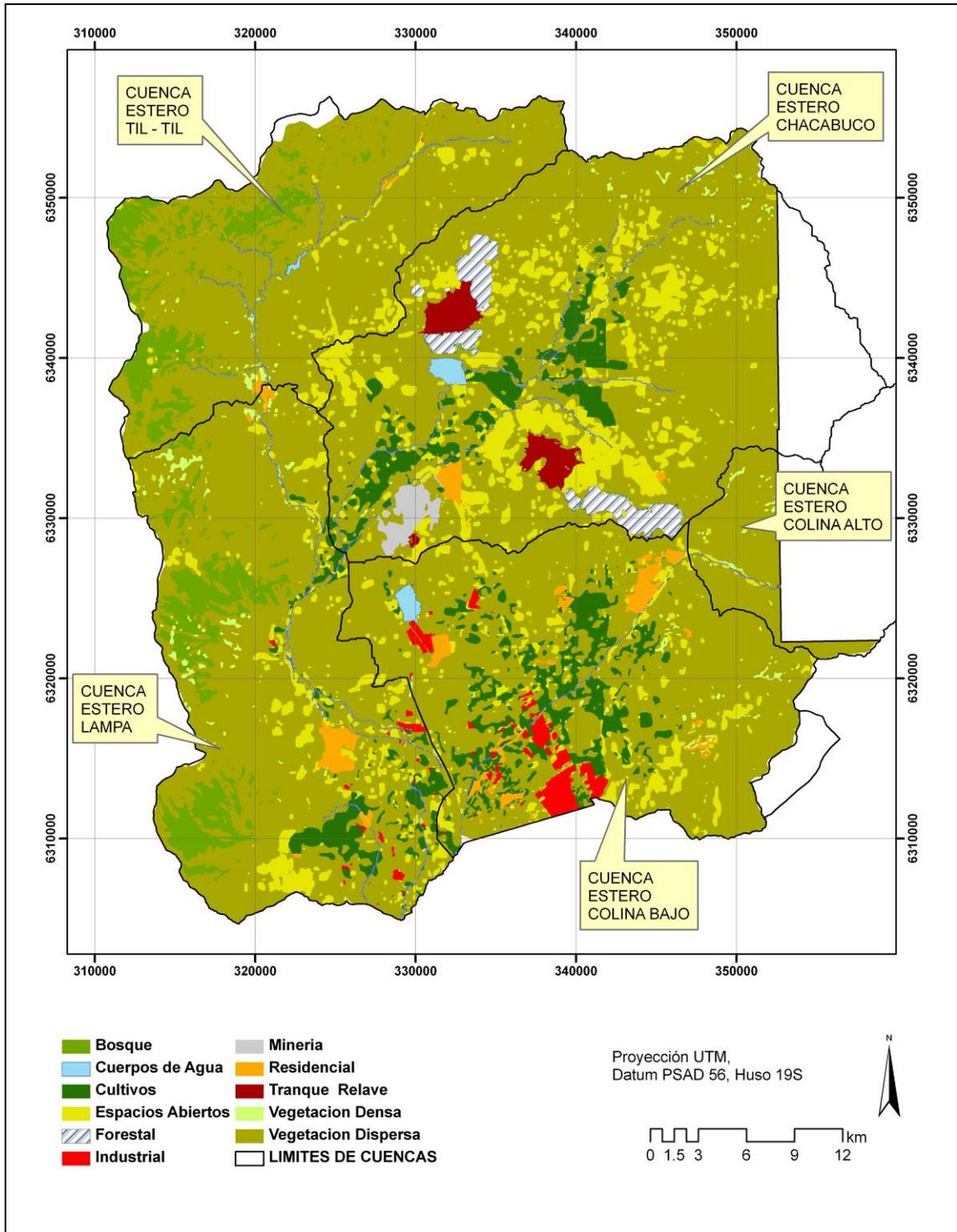


Figura 13. Coberturas de uso de suelo. Simulación año 2016

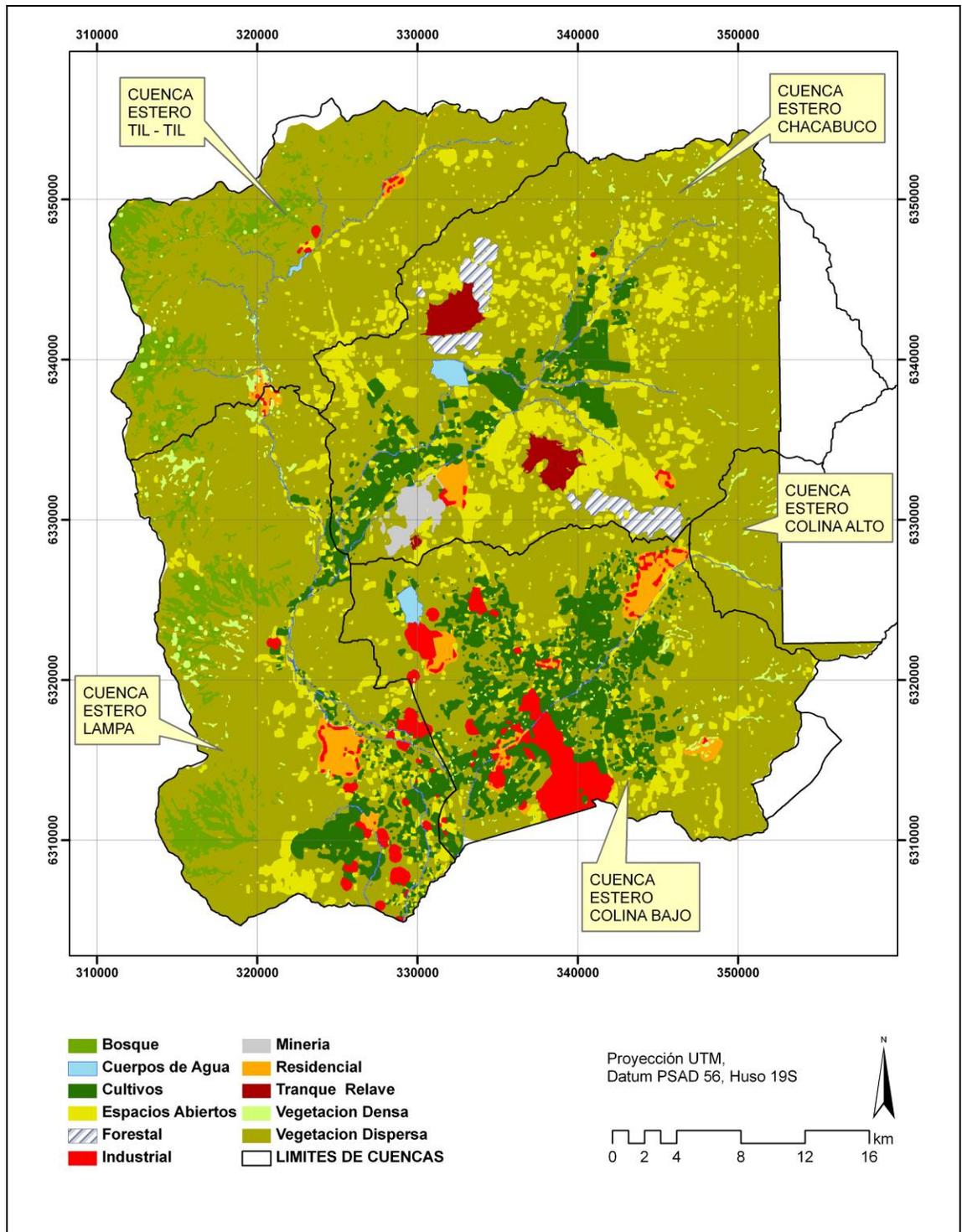


Figura 14. Coberturas de uso de suelo. Simulación año 2025

**Cuadro 16. Distribución de superficies según cobertura y cuenca para los años 2007,
2016 y 2025**

Cuenca	Cobertura	Superficie (ha)		
		2007 Real	2016 Simulado	2025 Simulado
CHACABUCO	Bosque			0,5
	Cuerpos de Agua	722,0	722,6	712,4
	Cultivos	4.502,9	3.848,1	5.145,6
	Espacios Abiertos	5.496,7	9.979,1	10.561,6
	Forestal	838,1	2.225,3	1.879,7
	Industrial		32,3	123,2
	Minería	680,2	860,0	835,3
	Residencial	314,3	351,0	438,9
	Tranque Relave	1.498,0	1.511,6	1.506,5
	Vegetación Densa	421,9	360,1	447,5
	Vegetación Dispersa	42.944,9	37.528,7	35.767,6
	TOTAL	59.425,8	59.434,8	57.418,8
COLINA ALTO	Cultivos	1,6		1,8
	Cuerpos de Agua	34,1	36,0	35,4
	Espacios Abiertos	96,3	121,6	133,9
	Residencial			1,7
	Vegetación Densa	173,8	121,6	168,2
	Vegetación Dispersa	4.892,2	4.918,9	4.857,1
TOTAL	5.198,1	5.198,1	5.198,1	
COLINA BAJO	Cuerpos de Agua	352,4	347,9	345,5
	Cultivos	7.334,7	4.761,4	8.760,0
	Espacios Abiertos	2.142,5	3.307,5	3.278,5
	Forestal		7,0	0,1
	Industrial	1.398,8	1.407,4	3.137,7
	Residencial	872,1	1.222,0	1.402,8
	Vegetación Densa	437,9	279,1	582,3
	Vegetación Dispersa	27.999,6	29.205,6	23.031,0
TOTAL	40.538,0	40.538,0	40.538,0	
LAMPA	Bosque	3.809,8	4.343,3	3.502,8
	Cuerpos de Agua	399,0	375,1	381,1
	Cultivos	3.094,0	2.103,1	3.551,2
	Espacios Abiertos	1.943,1	3.427,1	3.502,6
	Industrial	230,6	224,1	1.086,4
	Residencial	634,4	668,3	866,4
	Vegetación Densa	630,7	590,4	911,1
	Vegetación Dispersa	31.622,5	30.632,6	28.562,6
TOTAL	42.364,1	42.364,1	42.364,1	
TIL-TIL	Bosque	3.682,1	3.888,1	3.118,7
	Cuerpos de Agua	302,2	298,6	285,0
	Espacios Abiertos	865,4	1.384,1	1.523,2
	Industrial		79,0	123,1
	Residencial	77,0	169,7	185,8
	Tranque Relave		7,7	1,2
	Vegetación Densa	224,2	197,3	360,9
	Vegetación Dispersa	26.777,9	25.904,3	26.330,8
TOTAL	31.928,8	31.928,8	31.928,8	

Cuadro 17. Distribución de superficies de cultivos, áreas residenciales e industriales según cuenca para los años 2007, 2016 y 2025

Cuenca	Cobertura	Superficie		
		2007	2016	2025
		----- (ha) -----		
CHACABUCO	Cultivos	4.502,9	3.848,1	5.145,6
COLINA ALTO	Cultivos	1,6		1,8
COLINA BAJO	Cultivos	7.334,7	4.761,4	8.760,0
LAMPA	Cultivos	3.094,0	2.103,1	3.551,2
TOTAL		14.933,2	10.712,6	17.458,6
CHACABUCO	Industrial		32,3	123,2
COLINA BAJO	Industrial	1.398,8	1.407,4	3.137,7
LAMPA	Industrial	230,6	224,1	1.086,4
TIL-TIL	Industrial		79,0	123,1
TOTAL		1.629,4	1.742,8	4.470,5
CHACABUCO	Residencial	314,3	351,0	438,9
COLINA ALTO	Residencial			1,7
COLINA BAJO	Residencial	872,1	1.222,0	1.402,8
LAMPA	Residencial	634,4	668,3	866,4
TIL-TIL	Residencial	77,0	169,7	185,8
TOTAL		1.897,7	2.411,0	2.895,6

Cuadro 18. Proporción de ATI según cuenca para los años 2016 y 2025

Cuenca	ATI	
	2016	2025
		----- (%) -----
Chacabuco	0,67	0,98
Colina Alto	0	0,03
Colina Bajo	6,49	11,20
Lampa	2,11	4,61
Til Til	0,78	0,97

Cuadro 19. Superficie de suelos ocupados por ATI según Grupo Hidrológico para los años 2016 y 2025

GRUPO HIDROLÓGICO	Superficie ocupada en el periodo		
	2007-2016	2016-2025	2007-2025
	----- (ha) -----		
A	43,0	1.345,6	1.388,6
B	2,3	151,6	153,9
C	114,0	234,3	348,3
D	453,9	1.259,2	1.713,1
N.C.	10,1	221,7	231,8
Total	623,3	3.212,4	3.835,7

Cuadro 20. Superficie de suelos de aptitud agrícola ocupadas por ATI según Clase de Capacidad de Uso en los periodos 2007 - 2016 y 2007 - 2025

Suma de Total		Año			Superficie ocupada en el periodo		
Clase	Cuenca	2007	2016	2025	2007 - 2016	2016 - 2025	2007 - 2025
		----- (ha) -----					
Clase I	Estero Chacabuco		0,2	0,8	0,2	0,5	0,8
	Estero Colina Bajo	109,3	108,8	268,9	-0,5	160,1	159,6
	Estero Lampa	180,6	181,0	305,1	0,4	124,1	124,5
Total Clase I		289,9	290,0	574,8	0,1	284,7	284,8
Clase II	Estero Chacabuco	176,7	180,0	336,4	3,2	156,4	159,6
	Estero Colina Alto			1,1	0,0	1,1	1,1
	Estero Colina Bajo	137,7	186,2	406,6	48,5	220,4	269,0
	Estero Lampa	135,7	136,8	254,6	1,0	117,8	118,8
	Estero Til Til		0,1		0,1	-0,1	0,0
Total Clase II		450,1	503,0	998,7	52,9	495,7	548,5
Clase III	Estero Chacabuco	133,1	144,9	172,9	11,7	28,0	39,7
	Estero Colina Bajo	381,5	529,2	1.016,1	147,7	487,0	634,6
	Estero Lampa	194,6	218,3	534,7	23,7	316,5	340,2
	Estero Til Til	12,0	17,9	56,6	6,0	38,7	44,6
Total Clase III		721,1	910,2	1.780,3	189,1	870,1	1.059,2
Clase IV	Estero Chacabuco		0,1	2,6	0,1	2,5	2,6
	Estero Colina Bajo	296,6	446,1	699,2	149,6	253,0	402,6
	Estero Lampa	108,2	106,5	371,4	-1,7	264,9	263,2
	Estero Til Til		11,4	0,6	11,4	-10,8	0,6
Total Clase IV		404,8	564,1	1.073,7	159,4	509,6	669,0
Total general		1.866,0	2.267,4	4.427,5	401,4	2.160,1	2.561,5

Cuadro 21. Proporción de suelos de aptitud agrícola ocupadas por ATI según Clase de Capacidad de Uso en los periodos 2007 - 2016 y 2007 - 2025

Clase	Cuenca	2007	2016	2025	Total de la Clase en la cuenca (ha)
I	Estero Chacabuco	0,0%	0,0%	0,0%	4.980,2
	Estero Colina Bajo	3,4%	3,4%	8,3%	3.238,7
	Estero Lampa	14,7%	14,7%	24,8%	1.229,4
II	Estero Chacabuco	2,3%	2,4%	4,4%	7.630,0
	Estero Colina Alto	0,0%	0,0%	1,0%	102,2
	Estero Colina Bajo	3,1%	4,2%	9,1%	4.478,7
	Estero Lampa	4,6%	4,7%	8,7%	2.940,4
	Estero Til Til	0,0%	0,0%	0,0%	459,8
III	Estero Chacabuco	4,6%	5,0%	6,0%	2.883,7
	Estero Colina Bajo	5,3%	7,4%	14,2%	7.166,4
	Estero Lampa	4,1%	4,6%	11,3%	4.734,2
	Estero Til Til	1,3%	2,0%	6,4%	889,8
IV	Estero Chacabuco	0,0%	0,0%	0,2%	1.653,3
	Estero Colina Bajo	5,4%	8,1%	12,7%	5.503,8
	Estero Lampa	5,2%	5,2%	18,0%	2.061,5
	Estero Til Til	0,0%	1,3%	0,1%	886,8

Cuadro 22. Valores de las variables Escorrentía (Q) y Pérdidas (L), según cuenca para los años 2007, 2016 y 2025.

Año	Cuenca	ESCORRENTÍA (Q)	Variación	PERDIDAS (L)	Variación
Expresado como volumen		(m ³)		(m ³)	
2007	Total Estero Chacabuco	17.097.648		21.466.582	
2007	Total Estero Colina Alto	1.269.412		1.852.802	
2007	Total Estero Colina Bajo	9.664.361		15.419.567	
2007	Total Estero Lampa	11.276.561		22.824.728	
2007	Total Estero Til-Til	18.091.446		15.389.904	
2007	TOTAL GENERAL	57.399.428		76.953.583	
2016	Total Estero Chacabuco	17.620.704	3,06%	20.943.526	-2,44%
2016	Total Estero Colina Alto	1.274.848	0,43%	1.847.366	-0,29%
2016	Total Estero Colina Bajo	9.658.187	-0,06%	15.425.742	0,04%
2016	Total Estero Lampa	11.196.196	-0,71%	22.905.093	0,35%
2016	Total Estero Til-Til	18.075.611	-0,09%	15.405.739	0,10%
2016	TOTAL GENERAL	57.825.545	0,74%	76.527.466	-0,55%
2025	Total Estero Chacabuco	17.645.019	3,20%	20.919.201	-0,71%
2025	Total Estero Colina Alto	1.270.741	0,10%	1.851.470	0,00%
2025	Total Estero Colina Bajo	9.899.035	2,43%	15.184.885	-0,30%
2025	Total Estero Lampa	11.442.429	1,47%	22.658.826	-0,22%
2025	Total Estero Til-Til	18.231.007	0,77%	15.250.330	-0,18%
2025	TOTAL GENERAL	58.488.232	1,90%	75.864.713	-1,41%
Expresado como caudal continuo		(m ³ /s)		(m ³ /s)	
2007	Total Estero Chacabuco	197,9		248,5	
2007	Total Estero Colina Alto	14,7		21,4	
2007	Total Estero Colina Bajo	111,9		178,5	
2007	Total Estero Lampa	130,5		264,2	
2007	Total Estero Til-Til	209,4		178,1	
2007	TOTAL GENERAL	664,3		890,7	
2016	Total Estero Chacabuco	203,9		242,4	
2016	Total Estero Colina Alto	14,8		21,4	
2016	Total Estero Colina Bajo	111,8		178,5	
2016	Total Estero Lampa	129,6		265,1	
2016	Total Estero Til-Til	209,2		178,3	
2016	TOTAL GENERAL	669,3		885,7	
2025	Total Estero Chacabuco	204,2		242,1	
2025	Total Estero Colina Alto	14,7		21,4	
2025	Total Estero Colina Bajo	114,6		175,8	
2025	Total Estero Lampa	132,4		262,3	
2025	Total Estero Til-Til	211,0		176,5	
2025	TOTAL GENERAL	676,9		878,1	

5.7.2 Retención

Los volúmenes de retención al interior de las cuencas (Factor L), disminuyen de 76.953.583 m³ en 2007 a 76.527.466 m³ en 2016 y a 75.864.713 m³ en 2025, equivalentes a un caudal continuo de 890,7, 885,7y 878,1 m³/s para los años 2007, 2016 y 2025, datos que representan variaciones de -0,55% y -1,41% para los años 2016 y 2025 respectivamente.

Las mayores variaciones ocurren en la cuenca de Chacabuco, en que el cambio de categoría de las áreas de Vegetación Dispersa a Espacios Abiertos, genera una disminución de los volúmenes retenidos en un 2,44% para el año 2016. En las cuencas de Chacabuco, Colina Bajo y Lampa, las variaciones alcanzarían a -0,71%, -0,30%, -0,22% en el año 2025, en que el aumento de las ATI, de las áreas de Cultivo, y de las áreas de Espacios Abiertos generarían menores volúmenes de retención.

5.8 Parches vegetales

5.8.1 Superficie total

Las áreas de vegetación natural representan en el área de estudio entre un 81% y 88% de la superficie durante el periodo 1989 - 2007, mientras que las simulaciones de uso del suelo indican proporciones de 88% para el año 2016 y de 83% para el año 2025 (Anexo 9).

En general en todas las cuencas dominan la vegetación de baja y media cobertura, clasificadas como Espacios Abiertos y Vegetación Dispersa. Las proporciones de áreas con presencia de vegetación natural son mayores en la clasificación del año 2003 con 88% con respecto al total en estudio, medias en 2007 y 1998 con 87 y 86% y bajas en 1989 con 81%.

Los resultados indican en la cuenca del Estero Chacabuco, que las superficies de Espacios Abiertos disminuyen notoriamente entre los años 1989 y 1998 y posteriormente aumentan en 2003 y 2007 presentando un comportamiento oscilante. Los espacios de Vegetación Dispersa aumentaron en el periodo 1989 - 1998, manteniéndose en superficies similares en 2003 y 2007. Las superficies de Vegetación Densa, disminuyen fuertemente entre 1989 y 1998, y posteriormente aumentan ligeramente 2003 y 2007.

En la cuenca del Estero Colina Alto, domina ampliamente la cobertura de Vegetación Dispersa, aumentando ligeramente entre 1989 y 2007. Las áreas de Vegetación Densa son mayores que las áreas de Espacios Abiertos, mostrando una disminución sostenida entre 1989 y 2007.

En la Cuenca del Estero Colina Bajo, predominan las áreas de Vegetación Dispersa, mostrando un aumento entre 1989 y 2007. Las áreas de Espacios Abiertos disminuyen en el periodo, coincidiendo con el aumento de la superficie de Vegetación Dispersa.

En la cuenca del Estero Lampa, predominan las superficies de Vegetación Dispersa, aumentando entre 1989 y 1998 y manteniéndose en superficies similares en 2003 y 2007. Las superficies de Bosque Esclerófilo aumentaron entre 1989 y 2003, y disminuyeron al año 2007. Las superficies de Vegetación Densa prácticamente desaparecen dando lugar a mayores superficies de Vegetación Dispersa y Bosque Esclerófilo en el periodo 1989 – 1998. Los Espacios Abiertos, muestran una reducción en 1998, para luego aumentar en 2003 y mantenerse en 2007.

Una tendencia similar a la de la cuenca del Estero Lampa muestra la cuenca del Estero Til Til, con aumentos de las superficies de Vegetación Dispersa y Bosque Esclerófilo y disminución de las categorías Espacios Abiertos y Vegetación Densa en el periodo 1989 – 1998, disminución de las superficies de Bosque Esclerófilo hacia el año 2007, y mantención de las superficies de Vegetación Dispersa y Espacios Abiertos desde 2003 a 2007.

De acuerdo con los resultados, las cuencas con mayores proporciones de espacios de vegetación natural (Cuadro 23) son las del Estero Colina Alto con 96,4% a 99,5% en 1989 y 2007 respectivamente, y Estero Til Til que varía de 96,7% a 99,% entre 1989 y 2007. En la cuenca del Estero Lampa aumenta la superficie de vegetación natural de 82,9% en 1989 a 91,1% en 2003,

disminuyendo ligeramente a 90,0% en 2007. En la cuenca del Estero Chacabuco aumenta la superficie de vegetación natural de 83,5% en 1989 a 86,8% en 2003, disminuyendo a 85,2% en el año 2007. La cuenca del Estero Colina Bajo presenta las menores proporciones de vegetación natural con un 59,0% en 1989, aumentando a 77,8% en 2003, principalmente debido a la disminución de las áreas de Cultivo y al aumento de las superficies de Vegetación Dispersa.

Cuadro 23. Superficies de vegetación natural según cuenca, año de clasificación y de simulación de uso del suelo

Cuenca	Año					
	1989	1998	2003	2007	2016	2025
	----- (ha) -----					
Estero Chacabuco	47.954	49.619	49.776	48.817	47.897	46.740
	83,5%	86,5%	86,8%	85,2%	83,5%	81,5%
Estero Colina Alto	4.999	5.095	5.162	5.158	5.155	5.153
	96,4%	98,3%	99,5%	99,5%	99,3%	99,3%
Estero Colina Bajo	23.977	29.083	31.539	30.641	32.805	26.844
	59,0%	71,7%	77,8%	75,6%	81,0%	66,2%
Estero Lampa	35.102	37.199	38.510	38.019	38.978	36.442
	82,9%	87,9%	91,1%	90,0%	92,2%	86,2%
Estero Til-Til	30.833	31.257	31.518	31.531	31.537	31.325
	96,7%	98,1%	98,9%	99,0%	98,9%	98,3%

Para los años simulados, las superficies totales de vegetación natural presentan un ligero aumento respecto del año 2007, variando de 87% a 88%, y una disminución al año 2025 con un 83% respecto de la superficie total en estudio (Anexo 9). La cuenca que presenta la mayor variación es la del Estero Colina Bajo que aumenta las superficies de vegetación natural a 81,0% en 2016 y disminuye a 66,2% en 2025. La cuenca del Estero Chacabuco disminuye de 85,2% en 2007 a 83,5% en 2016 y a 81,5% en 2025. En la cuenca del Estero Lampa, la vegetación natural variaría de 90,0% en 2007 a 92,2% en 2016,

disminuyendo a 86,2% en 2025. Las cuencas de los Esteros Colina Alto y Til Til, se mantienen en valores cercanos al 99% y 98% respectivamente para los periodos simulados.

5.8.2 Número de parches de vegetación natural

El número de fragmentos por categoría de tipo vegetal, cuenca en estudio y periodo de evaluación, para fragmentos de superficie igual o mayor a 1,0 ha se presenta en el Anexo 9.

Según se observa, en la cuenca del Estero Chacabuco, el número de fragmentos del tipo Espacios Abiertos disminuye entre 1989 y 1998, posteriormente aumentan en 2003 y 2007. La tendencia coincide con el comportamiento de las superficies involucradas, en que una disminución del número de fragmentos está asociada a una disminución de la superficie, indicando un proceso de desaparición de parches. La categoría de Vegetación Dispersa, presenta una tendencia a disminuir el número de fragmentos, manteniendo una superficie similar a partir de 2003, lo que estaría indicando un proceso de consolidación de este tipo de cobertura en esta cuenca. Las áreas de Vegetación Densa, muestran una disminución del número de fragmentos, asociado a una disminución de las superficies, manteniendo una relación prácticamente constante, indicando un proceso de extinción.

En la cuenca del Estero Colina Alto, se produce una reducción del número de fragmentos en el periodo 1989 – 2007.

En la cuenca del Estero Colina Bajo, las áreas de Espacios Abiertos presentan una disminución del número de fragmentos de entre 1989 y 1998, posteriormente aumentan en 2003 y disminuyen en 2007. La relación con la superficie de esta cobertura, indica un proceso que tendería al desarrollo de coberturas menos fragmentadas. En cuanto a Vegetación Densa, el número de

fragmentos disminuye entre 1989 y 1998, aumentando en el año 2007, en que la relación con la superficie indica un espacio en proceso de fragmentación. Las áreas de Vegetación Dispersa, presentan un aumento destacable entre 1989 y 1998, lo que coincide con un aumento de la superficie en esta categoría. Hacia el año 2003, se produce una reducción del número de fragmentos, y un aumento ligero de la superficie, que indicaría un proceso de consolidación en una distribución menos fragmentada. En el año 2007, el número de fragmentos aumenta ligeramente.

En la cuenca del Estero Lampa, el número de fragmentos de la categoría Bosque Esclerófilo presenta valores similares en los años 1989, 1998 y 2003. En el año 2007, se produce una reducción del número de fragmentos junto a una reducción de la superficie, configurando un proceso de extinción. La categoría Espacios Abiertos muestra una fuerte reducción del número de fragmentos entre 1989 y 1998, junto a una notoria reducción de la superficie. Las áreas de Vegetación Dispersa, muestran una disminución del número de fragmentos, junto a un aumento de las superficies en esta categoría en el periodo 1989 – 2007, indicando que este tipo de cobertura vegetal se está expandiendo y consolidando. Las áreas de Vegetación Densa, muestran una reducción del número de fragmentos y una disminución de la superficie en el periodo 1989 – 2007.

En la cuenca del Estero Til Til, las áreas de Vegetación Dispersa siguen la tendencia observada en la cuenca del Estero Lampa, con una reducción del número de fragmentos y un aumento de las superficies en el periodo 1989 – 2007. Las áreas de Espacios Abiertos, muestran una reducción del número de fragmentos entre 1989 y 1998, junto a una reducción de la superficie. Hacia el año 2007, el número de fragmentos aumentó, mientras que la superficie disminuyó ligeramente. Las áreas de Bosque Esclerófilo, presentan leves variaciones en el número de fragmentos, en el periodo 1989 - 2003. Posteriormente, disminuyen, consecuentemente con una reducción de la

superficie. Las áreas de Vegetación Densa, tienden a desaparecer, con una disminución del número de fragmentos en el periodo del mismo modo que en la cuenca del Estero Lampa.

5.8.3 Tamaño promedio de parches de vegetación natural

En el Anexo 9 se presenta la superficie promedio de los parches según tipo de cobertura vegetal y cuenca. Como apreciación general, el tamaño promedio de parches de las áreas de Vegetación Dispersa muestra un aumento en el periodo 1989 – 2003 y un leve disminución entre 2003 y 2007, presentando la mayor incidencia en el tamaño promedio de los parches de las cuencas en estudio.

En la cuenca del Estero Chacabuco, las áreas de Espacios Abiertos, muestran un tamaño que varía entre 8,9 y 4,5 ha, con una disminución entre 1989 – 1998, un aumento al año 2003 y una disminución en 2007. Las áreas de Vegetación Densa, siguen una tendencia similar.

En la cuenca del Estero Colina Alto, las áreas de Vegetación Dispersa aumentan de manera importante, de un tamaño promedio de 126,4 ha en 1989 a 2.494 ha en 2007. Las áreas de Espacios Abiertos y de Vegetación Densa, disminuyen en el mismo periodo.

En la cuenca del Estero Colina Bajo, el tamaño de parches de Espacios Abiertos y de Vegetación Densa disminuye entre 1989 y 2007 y aumenta para las áreas de Vegetación Dispersa, entre 4,1 y 3,2 ha y 135,7 y 125,7 respectivamente.

La cuenca del Estero Lampa presenta un aumento del tamaño promedio de parches en la categoría Bosque Esclerófilo, aumentando de 11,1 ha en 1989 a 26,4 ha en 2007. Sin embargo, este aumento es producto de la desaparición de fragmentos dispersos y la superficie total. Las áreas de Espacios Abiertos,

muestran una reducción del tamaño promedio de 9,8 ha en 1989 a 3,7 ha en 1998, indicando, junto a una reducción de la superficie y del número de fragmentos, que se trata de una categoría en proceso de fragmentación. Las áreas de Vegetación Densa, disminuyen el tamaño promedio de parches, en este caso de 7,0 ha en 1989 a 3,7 ha en 2007. En cuanto a las áreas de Vegetación Dispersa, se observa un aumento del tamaño de parches de 40,7 ha en 1989 a 178,8 ha en 2007, lo que junto a una reducción del número de parches y a un aumento de la superficie indican un proceso de expansión.

En la cuenca del Estero Til Til, las áreas de Bosque Esclerófilo presentan un leve aumento del tamaño promedio de parches, de 10,4 ha en 1989 a 14,1 ha en 2007. Las áreas de Espacios Abiertos, disminuyen su tamaño de 7,5 ha en 1989 a 2,8 en 2007, junto a una notable reducción en la superficie que ocupan. En las áreas de Vegetación Densa los parches desaparecieron hacia 1998. Posteriormente, en el periodo 2003 – 2007, aumentan desde 1,8 ha a 4,0 ha. La categoría de Vegetación Dispersa, presenta una tendencia al aumento en el tamaño de los parches, desde 58,1 ha en 1989 a 284,6 ha en 2007.

5.8.4 Perímetro de parches de vegetación natural

En el Cuadro 24 se presenta la suma del perímetro de parches según categoría y cuenca para las áreas de vegetación natural. En general se observa que los valores de la suma de los perímetros de parches disminuye en las cuencas en estudio en el periodo 1989 – 1998, aumentan en el periodo 1998 – 2003 a excepción de la cuenca del Estero Til Til, y disminuye en el periodo 2003 - 2007, salvo en la cuenca del Estero Chacabuco.

Cuadro 24. Suma de perímetro de parches de vegetación natural según tipo de cobertura vegetal y cuenca

Cuenca	Cobertura	AÑO						Total general
		1989	1998	2003	2007	2016	2025	
		------(km)-----						
Estero Chacabuco	Bosque Esclerófilo	2						2
	Espacios Abiertos	2,523	521	1,188	1,145	893	964	7,235
	Vegetación Densa	619	128	138	102	89	100	1,176
	Vegetación Dispersa	3,049	1,392	2,167	2,168	1,395	1,462	11,634
	Total Estero Chacabuco	6,191	2,043	3,493	3,415	2,377	2,526	20,046
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	68	39	54	21	22	25	228
	Vegetación Densa	232	105	62	45	27	39	511
	Vegetación Dispersa	329	198	156	112	92	107	993
	Total Estero Colina Alto	629	342	273	178	141	170	1,732
Estero Colina Bajo	Bosque Esclerófilo	2						2
	Espacios Abiertos	1,198	415	632	487	481	474	3,687
	Vegetación Densa	228	77	115	97	65	146	729
	Vegetación Dispersa	1,361	1,507	2,009	1,948	1,058	1,030	8,912
	Total Estero Colina Bajo	2,787	2,000	2,758	2,531	1,604	1,650	13,330
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	914	1,064	1,032	669	302	398	4,379
	Espacios Abiertos	1,142	140	483	455	407	428	3,054
	Vegetación Densa	1,076	14		146	111	169	1,516
	Vegetación Dispersa	2,348	1,997	2,114	1,922	1,114	1,252	10,747
	Total Estero Lampa	5,481	3,214	3,628	3,191	1,935	2,247	19,695
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	856	985	954	722	361	456	4,334
	Espacios Abiertos	964	135	172	165	178	197	1,811
	Vegetación Densa	673		8	48	38	69	836
	Vegetación Dispersa	2,278	1,371	1,328	1,151	770	887	7,786
	Total Estero Til-Til	4,772	2,492	2,462	2,085	1,348	1,608	14,766
Total general	19,859	10,090	12,614	11,401	7,405	8,202	69,571	

Las áreas de Espacios Abiertos en la cuenca del Estero Chacabuco, presentan una disminución del perímetro total de parches de 2.523 km a 521 km en el periodo 1989 – 1998, aumentan a 1.188 km en 2003 y a 1.145 km en 2007. Las áreas de Vegetación Densa, presentan una disminución del perímetro total en todos los periodos, junto a una reducción de la superficie y del número de parches. Las áreas de Vegetación Dispersa, muestran una disminución del perímetro desde 3.049 km en 1989 a 1.392 km en 1998, un aumento a 2.168 km en 2007.

En la cuenca del Estero Colina Alto, el perímetro total en todas las coberturas muestra una clara tendencia a disminuir.

En la cuenca del Estero Colina Bajo, las áreas de Espacios Abiertos y de Vegetación Densa disminuyeron el perímetro total en el periodo 1989 - 2007, con valores más bajos en la clasificación del año 2003. Por el contrario, en las áreas de Vegetación Dispersa, el perímetro total aumenta en el periodo 1989 – 2003, desde 1.361 km a 2.009 km, y disminuye ligeramente a 1948 km en 2007.

En la cuenca del Estero Lampa, las áreas de Bosque Esclerófilo, presentan un aumento del perímetro total en el periodo 1989 – 2003, desde 914 km a 1.064 km. El perímetro total disminuye a 669 km en 2007, coincidiendo con lo observado en el comportamiento de la superficie que ocupa esta cobertura. Una situación similar ocurre con las áreas de Espacios Abiertos y Vegetación Densa, mientras que las áreas de Vegetación Dispersa, presentan valores de 2.348 km en 1989 y de 1.922 km en 2007, junto a un aumento de la superficie.

En la cuenca del Estero Til Til, las áreas de Bosque Esclerófilo presentan un aumento del perímetro total en el periodo 1989 – 1998 desde 856 km a 985 km, luego una disminución a 722 km en 2007. Las áreas de Espacios Abiertos y de Vegetación Densa, el perímetro total luego de disminuir fuertemente en el periodo 1989 – 1998, aumenta en 2003 y 2007. Las áreas de Vegetación Dispersa, presentan una disminución del perímetro total desde 2.278 km en 1989 a 1.151 km en 2007.

5.8.5 Relación Perímetro / Superficie de parches de vegetación natural

En el Anexo 9 se presenta la relación Perímetro / Superficie (km/ha), para las cuencas en estudio. Se observa que, en general el promedio del perímetro de parches por unidad de superficie se mantiene en rangos similares, con valores de 0,43 a 0,54 km/ha. Los menores valores ocurren para la cobertura de

Bosque Esclerófilo en la cuencas de los Esteros Lampa y Til Til (0,41 km/ha en 1989 a 0,44 en km/ha en 2007).

5.8.6 Interpretaciones de las variables de métrica de parches vegetales naturales

En el Anexo 10, se presentan los valores de las variables de métrica de paisajes obtenidos según cuenca, tipo de cobertura vegetal y año de clasificación.

Según las medidas realizadas sobre los parches de vegetación natural, se observa que las áreas de Espacios Abiertos y de Vegetación Densa, están sujetas a procesos de fragmentación y extinción, aumentando el perímetro y disminuyendo la superficie en todas las cuencas en estudio. La mayor parte de estas superficies cambian a Vegetación Dispersa en el periodo 1989 – 2007 (Cuadro 12), deteriorando su condición en el caso de la Vegetación Densa y mejorando en el caso de las áreas de Espacios Abiertos. Por otra parte, las áreas de Vegetación Dispersa siempre muestran un incremento de la superficie y una disminución del perímetro, indicando una expansión, precisamente sobre las áreas mencionadas.

Para las simulaciones de los años 2016 y 2025, en las áreas de Vegetación Densa se obtienen menores perímetros y superficies de parches con respecto a lo observado en la clasificación del año 1989. Sin embargo, tomando como base de proyección la clasificación del año 2007, las áreas de Vegetación Densa presentarían una expansión, con menores relaciones perímetro / superficie, siguiendo el comportamiento observado entre 1998 y 2007.

Las áreas de Bosque Esclerófilo, presentan un aumento al año 1998 y una disminución al año 2007 respecto de lo observado en 1989. La relación perímetro / superficie, disminuye en el periodo 1989 – 2007, indicando una reducción del efecto de borde y una consecuente mayor superficie por parche.

Las simulaciones de uso del suelo, indican un aumento de la superficie de esta cobertura para el año 2016 respecto de la clasificación del año 2007 y una disminución para la clasificación del año 2025, en ambos casos con mayores tamaños de parches, siguiendo la tendencia al aumento observada entre 1989 y 2007.

6 DISCUSIÓN

Los resultados de las clasificaciones de cobertura del suelo en el periodo 1989 – 2007, indican en la Provincia de Chacabuco la ocurrencia de procesos de expansión urbana, junto a una reducción de las áreas de cultivos.

Esta expansión urbana se registra principalmente en las cuencas del Estero Colina Bajo y del Estero Lampa, en donde existen amplias zonas de suelos de pendiente casi plana, y que se consideran accesibles, con un extenso desarrollo de redes viales. En efecto, estas cuencas son las que presentan mayor proporción de ATI, variando de 1,77% en 1989 a 5,59% (Colina Bajo) y de 0,57% a 2,04% (Lampa). El desarrollo de áreas impermeables sobre suelos agrícolas es el 64% al año 2007, ocupando aquellos de alto valor productivo y que presentan las mejores condiciones para favorecer la infiltración (784,5 ha del Grupo Hidrológico A). Estos resultados se hacen consecuentes con el planteamiento de que el desarrollo de redes viales es una condicionante en la expansión urbana mientras que son ocupados los suelos de mayor valor, ya sea por su productividad agrícola, como por sus funciones ambientales, en este estudio, referidas a la capacidad de infiltración de aguas lluvias (suelos del grupo hidrológico A) y por su preferencia para el desarrollo de urbanizaciones industriales o residenciales, dado que estos fueron los factores de forzamiento para el crecimiento urbano utilizados por el modelo de simulación.

La desagregación en subcuencas, según se plantea en este estudio, destaca la relevancia de los factores de escala espacial, dado que mientras más extenso es el territorio en evaluación, más importancia tiene el estado natural sobre la cuantificación de las proporciones de áreas impermeables. Lo anteriormente señalado es analizado en detalle en FAO, 2000. Según esta referencia, los impactos del uso de la tierra sobre los procesos hidrológicos y el medio biofísico sólo se pueden verificar dentro de cuencas pequeñas, con frecuencia hasta extensiones de 100 km². Para cuencas de mayor tamaño, se indica, dominan

los procesos naturales. Los análisis desarrollados en este estudio se realizaron con superficies de cuencas de 219 a 638 km². Según los resultados obtenidos de las simulaciones, los procesos de cambio de la vegetación natural pueden llegar a ser importantes en las variaciones de las variables del proceso hidrológico, lo que efectivamente ocurre por el aumento de la vegetación de cobertura media (Vegetación Dispersa) en las proyecciones simuladas. Sin embargo, es posible afirmar que la expansión urbana y el aumento de las ATI en las cuencas de Colina Bajo y Lampa son relevantes en el aumento de la escorrentía y la disminución de la infiltración en los periodos proyectados, y se evidencia una relación entre expansión urbana y la desaparición de coberturas vegetales densas.

Según los indicadores de salud ambiental de cuencas (Arnold y Gibbons, 1994; Schueler, 1994; Brabec, et al, 2002), el área de estudio se encuentra al año 2007, en un estado intermedio entre condiciones naturales y degradadas, definidas estas últimas por una impermeabilización sobre el 10%.

Considerando las Áreas Efectivas Impermeables (AEI), las urbanizaciones de mayor incidencia son las de menores proporciones de áreas permeables, indicando con esto que la expansión urbana se caracteriza por tratarse de zonas de elevada tasa de impermeabilización, superior al 45%, lo que es consecuente con los porcentajes de ocupación del suelo permitidos por el PRMS, que son superiores al 30% para uso habitacional y de 60% para uso industrial.

Las áreas residenciales presentan un 66% de superficie impermeable en promedio alcanzando una cifra similar para áreas residenciales suburbanas de la cuenca Green Cove, EE.UU. (Thurston Regional Planning, 2003). Las áreas Industriales presentan un 67% de impermeabilización, siendo inferior a las áreas Industriales en la cuenca de referencia que presenta un 80% de superficie impermeable en promedio.

Las simulaciones de cambio de uso del suelo indican un aumento de las ATI que alcanzarían en la Cuenca del Estero Colina Bajo 6,49% y 11,20%, y en la cuenca del Estero Lampa 2,11% y 4,61% para los años 2016 y 2025 respectivamente. Estas simulaciones de crecimiento urbano consideran como urbanizable, las áreas definidas en el PRMS, en las cuales se incluyen las ZUDC, obteniendo una configuración dispersa (Figuras 13 y 14). De esta forma, el crecimiento urbano proyectado en la cuenca de Colina Bajo superaría el 10% considerado en la literatura como el límite en que la calidad de un cauce comienza a degradarse. El PRMS permite como urbanizable 19.465 ha en la Provincia de Chacabuco, que representan un 11% aproximadamente del total del área de estudio de este trabajo. Si se considera como unidad de estudio la Provincia, los cambios atribuibles a la expansión urbana no serían evidentes.

Respecto a estas estimaciones cuantitativas, el PRMS indica como urbanizable superficies que superan ampliamente los umbrales recomendados para mantener la salud ambiental de las cuencas. Este instrumento, permite un 45,6% de áreas urbanas en la cuenca del Estero Colina Bajo, y un 12,2% en la cuenca del Estero Lampa. Cabe señalar que la proporción urbanizable no necesariamente es equivalente a superficie impermeable, pero pueden tomarse como referencia los valores promedio de tasas impermeables de áreas urbanas según el análisis de AEI, que indica para áreas residenciales un 66% y para áreas industriales un 67%, lo que implicaría aproximadamente, un 30% permitido por el PRMS en Colina Bajo como superficie impermeable y cerca de un 8% en Lampa. En consecuencia, la regulación impuesta por el PRMS sólo falla en la preservación de la calidad ambiental, según la escala definida en este estudio, en la cuenca de Colina Bajo. Sin duda que, al ampliar la escala de trabajo a niveles de microcuencas, las áreas impermeables serían más importantes en proporción respecto de la superficie total, implicando que a nivel local, sería posible afirmar que se produce un deterioro de la calidad ambiental, siendo necesaria la evaluación de los proyectos de urbanización en conjunto

dentro de la unidad mínima que conforma la microcuenca. Los ZUDC (Zonas Urbanas de Desarrollo Condicionado) aprobados en estas cuencas, y las normas que permiten la ocupación del suelo constituyen un claro ejemplo para la aplicación de los aspectos de consideración de escala. Según el PRMS, los ZUDC deben ocupar una superficie superior a 300 ha, permitiéndose un coeficiente de constructibilidad (ocupación de suelo por superficie construida) de 1,2, y en predios subdivididos acogidos al DL 3.516, coeficientes de 0,15 para uso habitacional y de 0,30 para otros usos. En predios de superficie mayor a 300 ha no acogidos al DL 3.516, se requiere de un Estudio de Impacto Urbano, cuyos contenidos entre otros, señalan la necesidad de cumplir la Ley 19.300 y su reglamento y la factibilidad de servicio o ampliación del sistema de alcantarillado de aguas lluvias; al mismo tiempo que se permite para uso industrial un coeficiente de ocupación del suelo de 60% y superior al 30% para uso residencial. Esto sugiere que todo proyecto de edificación debe evaluarse considerando la microcuenca en la que se emplaza.

Como impacto directo de la expansión urbana simulada, se obtuvo un aumento de la escurrimiento para precipitaciones máximas en 24 horas de 0,74% al año 2016 y de 1,90% al año 2025. En las cuencas de Colina Bajo y de Lampa, las variaciones son mayores que las señaladas por Arnold y Gibbons (2004), quienes indican que con un 15% de aumento de ATI la escurrimiento aumenta un 2%. En estas cuencas, se proyectan aumentos de ATI de 5,61% y de 2,27% al año 2025, con aumentos de escurrimiento de 2,43% y de 1,47% respectivamente. Esto se asocia a la elevada proporción de suelos del Grupo Hidrológico A (altas capacidades de infiltración) que serían ocupados por superficies urbanas. Complementariamente, la retención de agua al interior de las cuencas disminuye 0,30% en Colina Bajo y 0,22% en la cuenca del Estero Lampa. La ocupación de los suelos del grupo A es el factor relevante. Sin embargo, el PRMS no indica explícitamente su preservación, siendo uno de los aspectos que deben ser considerados en la gestión del territorio. Cabe señalar que las prácticas o proyectos de mitigación y compensación por ocupación de suelos,

permiten la habilitación de otros suelos a través de la modificación de la capacidad de uso; sin embargo, se ignora el hecho de que los suelos tienen una función ambiental única e irremplazable asociadas a su posición en la cuenca y a funciones distintas al solo uso o valor agrícola. Sin duda que al realizar evaluaciones a nivel de microcuencas, la importancia de las superficies impermeables en el aumento de la escorrentía y la disminución de la infiltración sería más marcado, en donde la solución al problema es la aplicación de las buenas prácticas de manejo, tanto estructurales como de operación (González, 2009; FAO, 2009). En consecuencia, el PRMS debería hacer mención a estos aspectos, mientras que la evaluación ambiental de los proyectos de urbanización en forma individual, debería considerar el estudio a nivel de la microcuenca en donde se emplaza e incluir la estrategia de mitigación de los impactos de las superficies impermeables.

Sin embargo, la aplicación de estas consideraciones en la evaluación de los impactos de las áreas impermeables requiere de precisiones metodológicas, entre ellas, la necesidad de contar con validaciones de las recomendaciones de umbrales de impermeabilización en cuencas chilenas, comparando tasas de ATI y AEI con determinaciones de calidades de agua en cauces y estándares para evaluar terrenos en pendientes altas o planos, especialmente en la estimación de sus potenciales de escurrimiento e infiltración.

Respecto del modelo de simulación de cambios de coberturas utilizado, se advierte que la excesiva complejidad introducida por un elevado número de tipologías de clasificación, puede ser manejada reduciendo las categorías sólo a aquellas indispensables para simular la expansión urbana considerando la diferencia entre ATI y AEI. En este estudio, sólo fue posible simular con la proporción promedio de superficie impermeable observada en las áreas urbanas. Esta limitación claramente puede ser superada al estudiar cuencas de menor tamaño que las definidas en este estudio, lo que entregaría una mayor precisión sobre los cambios en los procesos de escurrimiento e infiltración

previstos. Según lo señalado, la simulación realizada puede considerarse como un escenario que se acerca a los límites de ocupación de suelos permitidos por el PRMS.

La utilización de las precipitaciones máximas en 24 horas es otro aspecto discutible de la presente evaluación sobre los cambios en la escorrentía y la infiltración como procesos hidrológicos, ya que representan el promedio observado en una serie temporal dada, y no necesariamente corresponden con aquellos eventos de carácter extremo que causan aumentos notables en la escorrentía. Sin embargo, es posible afirmar que, si la utilización de estos valores promedios arroja la ocurrencia de cambios significativos en la escorrentía (mayores que los indicados por la literatura de referencia para las cuencas estudiadas), eventos extremos causarán cambios aún más importantes y, en consecuencia, los resultados obtenidos por este estudio, por sí solos, pueden ser considerados en la planificación de uso del territorio en la provincia de Chacabuco.

Sobre la evaluación realizada para coberturas vegetales naturales, llama la atención, la disminución y tendencia errática en la cuantificación de las superficies de las categorías de Vegetación Dispersa y de Espacios Abiertos. Se observa en el periodo 1989 – 1998, que la discriminación realizada por el método de la clasificación supervisada puede confundir ambas categorías, de tal forma que existirían 25.372 ha de Espacios Abiertos que cambian a Vegetación Dispersa y 87.252 ha que se mantienen en esta categoría, en contraste con 117.629 ha y 119.691 ha que se observan en los periodos 1998 – 2003 y 2003 – 2007 respectivamente. Esto implica, y refuerza la justificación de que una parte de la superficie clasificada como Espacios Abiertos en el año 1989, corresponderían a superficies de Vegetación Dispersa. La clasificación sobre el año 1989 estaría entregando mayores superficies en la categoría Espacios Abiertos debido una menor actividad fotosintética de las coberturas vegetales de pastos, arbustos y especies como *Acacia caven* y, *Prosopis sp*,

dado un año hidrológico asociado a un evento La Niña de carácter Fuerte (Lozada et al, 2004), mientras que en el año 1998 las coberturas tuvieron una mayor expresión favorecidas por un año lluvioso determinado por un evento El Niño de carácter fuerte (Lozada et al, 2004). Las variaciones interanuales representan una limitante en la evaluación objetiva de las dinámicas de la vegetación natural, obligando a contar con series temporales de datos mucho más amplias que las utilizadas en este estudio.

De acuerdo con la evaluación realizada para los parches de vegetación natural, se establece a través de este estudio que, la vegetación clasificada como Espacios Abiertos (0 – 55 % de cobertura vegetal), y las áreas de Vegetación Densa (71 – 100 % de cobertura vegetal), aumentan el perímetro de los parches y disminuyen la superficie por categoría, indicando procesos de fragmentación y extinción, con un cambio hacia rangos medios de cobertura vegetal (48 – 80% de cobertura) en la categoría Vegetación Dispersa. Este cambio sugiere que las áreas de Espacios Abiertos mejoran su condición ambiental debido a la presencia de árboles, arbustos y cubiertas herbáceas de mayor desarrollo, a la vez que se produce un deterioro de áreas de Vegetación Densa. Las pérdidas de Vegetación Densa son más evidentes en las cuencas con mayor urbanización, con mayores aumentos en el perímetro y una disminución más marcada en el tamaño de parches vegetales.

Los tamaños promedios de parches obtenidos en la cuenca de Colina Bajo, para las áreas de Vegetación Densa varían de 4,1 ha en 1989 a 3,2 ha en 2007, valores mayores a los obtenidos por Romero y Vásquez (2005), quienes estudiando la métrica de paisajes en la zona de Chicureo (área incluida en la cuenca de Colina Bajo), señalan tamaños de parches de 2,49 ha en 1989 y de 2,18 ha en 2003. Al respecto, es probable que el método de evaluación de las variables de métrica de paisajes desarrollado en este estudio sea causa de la diferencia entre los resultados obtenidos y las referencias indicadas por la literatura. En este estudio, se evaluó a partir de formatos vectoriales de las

clasificaciones de coberturas en formato raster. Sobre los formatos vectoriales se procedió a eliminar polígonos inferiores a 1 ha para lograr una representatividad por efecto del tamaño de píxel, que se considera adecuada en una grilla de 3 x 3, o de 90 x 90 metros, equivalente a 9.000 m². Sobre los formatos se establece que el uso de raster es conveniente para representaciones de variables continuas, mientras que el vector simplifica los análisis de variables discretas. En este trabajo se consideró, que el análisis de unidades de vegetación natural en las diferentes categorías es un análisis de unidades discretas en una matriz, en donde la implicancia más relevante está dada por la escala de observación, en este caso la configuración espacial del paisaje, en cuencas con menor o mayor desarrollo de áreas urbanas.

Si se considera la cuenca de Colina Alto como la menos impactada al año 2007, dado que presenta 0% de ATI, se observa que el tamaño de parches de Vegetación Densa es de 3,4 ha, superficie mayor al de la cuenca de Colina Bajo, que presenta desarrollo de ATI. Las áreas de Bosque Esclerófilo en las cuencas de Lampa y Til Til, presentan una disminución de superficies de 8,43% y 8,84% respectivamente. Esta disminución en superficie, implica la desaparición de parches de superficies pequeñas, permitiendo un aumento de la superficie promedio de parches. Este aumento se refleja en las variaciones de tamaño que van desde 11,1 ha a 26,4 ha en Lampa, y de 10,4 ha a 14,1 ha en Til Til en el periodo 1989 – 2007. La mayor pérdida de superficie en Til Til, y el menor tamaño de los parches, estarían asociados al desarrollo de un área residencial de baja densidad en el sector de Caleu, en que predios rústicos han sido subdivididos en el marco de la Decreto Ley 3.516. Sin embargo, dados los alcances de este estudio, no existen los antecedentes suficientes para comprobar estas implicancias, requiriéndose un levantamiento detallado de coberturas de suelos.

Las simulaciones de uso de suelos para el año 2025, indican para la cobertura de Bosque Esclerófilo, la continuación del proceso observado en el periodo

1989 - 2007, en que el tamaño de parche aumenta al doble del tamaño clasificado en 2007, con superficies de 47,3 ha en Lampa y de 21,8 ha en Ti Til, junto a una disminución de la superficie total de la categoría de 14,4 % y 18,8% respectivamente. Los cambios debidos a la pérdida de Bosque Esclerófilo, significan en la cuenca de Til Til un aumento de la escorrentía, debido a que, precisamente, es en el sector de Caleu en donde se producen las mayores intensidades de precipitación, aumentando el factor erosividad (que corresponde al factor de erosión asociado a la lluvia).

7 CONCLUSIONES

La expansión urbana y la reducción de las áreas de cultivo, según los resultados de este estudio, ocurren de preferencia en las cuencas de los Esteros Lampa y Colina, en sectores de pendiente plana a casi plana, ocupando el 64% de los suelos de Capacidades de Uso I a IV en el periodo observado entre los años 1989 y 2007, permitiendo concluir que la urbanización tiene como factores de desarrollo la preexistencia de urbanizaciones y la disponibilidad de suelos que coincide con aquellos de mayor valor agrícola. Estas observaciones hacen posible proyectar escenarios futuros de cambio de coberturas, sistematizando los factores que explican la expansión urbana. Así lo demostró la validación del modelo de simulación construido utilizando estos criterios.

La aplicación de un modelo de cambio de coberturas basado en las tendencias observadas en el periodo 1989 – 2007, permitió realizar simulaciones de escenarios futuros que incluyeron el modelamiento del crecimiento urbano bajo los factores de restricción establecidos por el Plano Regulador Metropolitano de Santiago. El desarrollo proyectado de las áreas urbanas al año 2025, supera en la parte baja de la cuenca del Estero Colina, según los criterios establecidos en este estudio, las recomendaciones de impermeabilización que permiten mantener la calidad ambiental de las cuencas. Como impacto directo de la expansión urbana proyectada, se evidencian en esta cuenca y en la del Estero Lampa, aumentos de la escorrentía superficial y una disminución de la infiltración de aguas lluvias para eventos de precipitaciones máximas en 24 horas, debido a una importante ocupación de suelos con elevadas capacidades de infiltración.

El aumento de la escala de trabajo, a nivel de la microcuenca en la evaluación de proyectos de urbanizaciones, indica que los impactos descritos en este trabajo se pueden evidenciar con mayores implicancias ambientales, lo que sugiere la necesidad de estudiar cada proyecto en particular con referencia a la microcuenca que ocupa.

Las estimaciones de áreas efectivas impermeables, descritas como aquellas que aportan directamente a los cambios en la escorrentía y la infiltración como procesos hidrológicos al interior de una cuenca, se acercan a las condiciones máximas permisibles de ocupación del suelo establecidas por el PRMS. De los resultados de este estudio se concluye que el PRMS como instrumento de gestión del territorio falla en la mitigación de los impactos en gran parte del territorio que regula. De acuerdo con esto, es necesario replantear las restricciones al desarrollo urbano impuestas por el PRMS, de modo tal que mitigue los impactos sobre la escorrentía y la infiltración como producto del desarrollo de áreas urbanas y revierta las tendencias de disminución de las cubiertas vegetales densas y de bosque permitiendo su conservación y preservación efectiva.

Las áreas de Bosque en las Comunas de Lampa y Til Til, se encuentran en las zonas de mayor intensidad de precipitaciones, en donde se evidencia un proceso de disminución de su superficie en el periodo 1989 – 2007, y se proyecta según las simulaciones cambio de coberturas del suelo, un retroceso aún mayor. Esta disminución de la cobertura vegetal está asociada a una ocupación residencial bajo la forma de parcelas de agrado. En esta forma de ocupación del territorio, las implicancias a nivel de áreas impermeables no son evidentes, sin embargo, si es posible concluir que los procesos hidrológicos se alteran.

Las áreas de Vegetación Densa tienden a desaparecer en las cuencas en estudio, con una disminución más marcada en las cuencas con mayor

urbanización, presentando menores tamaños promedio de parches en el periodo 1989 – 2007. Para los periodos simulados, la tendencia de estas áreas es una reducción en la superficie total.

8 RECOMENDACIONES

Se establece la necesidad de evaluar, a niveles de escala más detalladas, las tendencias de cambio en las cuencas que presentan las mayores superficies de ATI y para las cuales el modelo de simulación indica la ocurrencia de pérdida de suelos arables de Capacidad de Uso I a IV, el aumento de la escorrentía y la disminución de la retención de agua lluvia al interior de la cuenca por ocupación de suelos de alta capacidad de infiltración.

De la misma forma, surge como prioridad la realización de estudios en escala de detalle en las zonas de bosque de las Comunas de Lampa y Til Til, estableciendo los usos de suelos, y las tasas de pérdida y fragmentación de parches vegetales.

La necesidad de generar antecedentes que permitan justificar modificaciones al PRMS queda de manifiesto en los resultados de este estudio. En este contexto, los instrumentos de gestión territorial, para que regulen las áreas urbanizables mitigando los impactos asociados, deben considerar las capacidades de infiltración de los suelos y los índices de salud de cuencas en el contexto de los máximos de áreas impermeabilizadas permisibles. Para esto, deben incluir en los Estudios de Impacto Urbano la variable impermeabilización, de tal forma de minimizar los impactos ambientales producto de su desarrollo y expansión, a la vez que deben incluir las prácticas y conceptos de buenas prácticas, referidas a estrategias de mitigación estructurales y de operación.

9 LITERATURA CITADA

Alberti, M. y J. Marzluff. 2004. Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human ecological functions. *Urban Ecosystems* 7. pp: 241-265.

Aguilera F. 2006. Predicción Del Crecimiento Urbano Mediante Sistemas De Información Geográfica Y Modelos Basados En Autómatas Celulares. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, Granada, España. *Geofocus Art. 06*. pp. 81-112.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 1998.

American Forests. 1999. Regional ecosystem analysis of the Chesapeake Bay Region. Washington, DC.

Arnold, C y Gibbons, J. 1994. Impacts of Development on Waterways. Reviews the hydrologic, physical, chemical and ecological effects of increasing urbanization on waterways; includes an explanation of the concept of impervious surface coverage as an indicator of these impacts. *NEMO Fact Sheet Series N° 3*. pp.1-4.

Arnold, C. and Gibbons, J. 1996. Impervious surface coverage: Emergence of a key environmental factor. *Journal of The American Planning Association* 62, 2: 243-258.

Barnes, K; Morgan, M. y Roberge, M. 2001. Impervious surfaces and quality of natural and built environments. Department of Geography and Environmental

Planning. Towson University. pp. 28.

Barredo, J. 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio. Madrid: RA-MA Editorial.

Berry, B. y Horton, F. 1974. Urban Environmental Management: Planning for Pollution Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.

Black, J. 1977. Water Pollution Technology. Reston, VA: Reston Publishing Company, Inc.

Booth, D. 1991. Urbanization and the Natural Drainage System-Impacts, Solutions and Prognoses. Northwest Environmental Journal 7(1): 93-118.

Booth, D. y Jackson, C. 1997. Urbanization of aquatic systems: Degradation thresholds, stormwater detention, and the limits of mitigation. Journal American Water Resources. 33 (5), 1077–1090.

Bormann H, Breuer L, Gräff T, Huisman J. Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. Ecological modelling 209 (2007): p. 29–40.

Brabec, E. Schulte, S. y Richards, P. 2002. Impervious surfaces and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning. Journal of Planning Literature, Vol. 16, N° 4. May 2002: pp. 499 -514.

Brabec, E. 2009. Imperviousness and Land-Use Policy: Toward an Effective Approach to Watershed Planning. Journal of hydrologic engineering. Vol. 14, No. 4.

Brezonik, P. y Stadelmann, T. 2007. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Research* 36 (2002): p.1743–1757.

Capiella, K; Schueler, T. y Wright, T. 2005. *Urban Watershed Forestry Manual. Part 1: Methods for Increasing Forest Cover in a Watershed.* U.S. Department of Agriculture. U.S. Forest Service. Newtown Square, PA. pp. 140

Carter, R. 1961. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. U.S. Geological Survey Paper 424-B, B9-B11. Washington, DC: U.S. Geological Survey.

Castelle, A; Johnson, A; y Conolly, C. 1994. Wetland and Stream Buffer Size Requirements A Review. *Journal of Environmental Quality* 23(5):878-882.

Castro, C. 2005. Impacto de la dispersión urbana de la ciudad de Santiago en la calidad del suelo en la periferia norte: Colina y Lampa. *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales.* Barcelona: Universidad de Barcelona, 1 de agosto de 2005, vol. IX, núm. 194 (37). <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-194-37.htm>

Castro, C. 2007. Condicionantes físicas para la urbanización en la periferia de la Región Metropolitana de Santiago. En: *Santiago de Chile. Movilidad espacial y Reconfiguración Metropolitana.* Carlos de Mattos y Rodrigo Hidalgo Editores. Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección Eure – Libros. Serie GEOlibros nº 8. 2007. 284 pp.

Center for Watershed Protection (CWP), 2003. Impacts of Impervious Cover on Aquatic Systems. *Watershed Protection Research Monograph* Nº 1. pp 141.

CONAF, 1999. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Proyecto CONAF-CONAMA-BIRF.

http://www.conaf.cl/?seccion_id=331aff350993c9e897fcb2734f002b97&unidad=0&

Conway, T. y Lathrop, R. 2005. Alternative land use regulations and environmental impacts: assessing future land use in an urbanizing watershed. *Landscape and urban planning* 71 (2005). pp.1-15.

Correa, E; Flores, L. y Lesino, G. 2003. Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Argentina. Vol. 7, N° 2.

Choi, W. y Deal, B. 2007. Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA). *Journal of Environmental Management*. In press.

Chow, V.; Maidment, D. y Mays, L. 1994. *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.

Doll, B; Wise-Frederick, D; Buckner, C; Wilkerson, S; Harman, W. y Smith, R. 2000. Hydraulic Geometry Relationships for Urban Streams Throughout the Piedmont of North Carolina.

Draper, S. y Rao, S. 1986. Runoff Prediction Using Remote Sensing Imagery. *Water Resources Bulletin*, Vol. 22, no. 6.

Dunne, T. y Leopold, L. 1978. *Water In Environmental Planning*. San Francisco: W.H. Freeman and Company.

Dzurik, A. 1990. *Water Resources Planning*. Savage, MD: Rowman & Littlefield

Publishers, Inc.

Eastman, J. 2003. IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University.

Eastman, J., McKendry, J. y Fulk, M. 2007. Change and Time Series Análisis. Volume 1. Second Edition. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Clark University, Worcester, MA 01610 USA.

Envirocast. 2003. Seeing the forests through the trees: Part 2, autumn leaf fall and the watershed. Envirocast 12(2); 1-4.

Food and Agricultural Organization (FAO), 2000. Relaciones tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales. Actas del taller electrónico organizado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO. 18 de septiembre-27 de octubre de 2000. Boletín de tierras y aguas de la FAO nº 9. 102 p.

Food and Agricultural Organization (FAO), 2009. La microcuenca hidrográfica como ámbito de planificación del uso y manejo de los recursos naturales, enfoque socio-territorial. [en línea]. <http://www.rlc.fao.org/es/tierra/micro.htm>. (consulta: 15 de diciembre de 2009).

FISRWG. 1998. Federal Interagency Stream Restoration Working Group . Stream corridor restoration. principles, processes and practices. Washington, DC.

Forman, R. 1995. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge.

Galli, J. 1990. Thermal impacts associated with urbanization and stormwater management best management practices, Metropolitan Washington Council of

Governments, Washington, D.C.

Göbel, P., Dierkes, C. y Coldewey, W. 2006. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology* 91; pp. 26–42.

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. 2004. Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *GeoFocus (Artículos)*, nº 4; pp. 179-208.

González, C. 2007. ¿Conoces la cuenca hidrográfica donde vives?, Carta Circular, Servicio de Extensión Agrícola, Universidad de Puerto Rico.

González, 2009. Manejo y control de las aguas de escorrentía para mantener la calidad del agua. Universidad de Puerto Rico. Servicio de Extensión Agrícola. 27p.

Han, J., Hayashi, Y., Cao X., y Imura, H. 2009. Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning* 91 (2009) 133–141.

Harris, E. y Rantz, S. 1964. Effect of Urban Growth on Streamflow Regimen of Permanente Creek Santa Clara County California: Hydrologic Effects of Urban Growth, U.S.Geological Survey Water-Supply Paper 1591-B.

Henríquez, C., Azócar, G. y Aguayo, M. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Rev. Geografía Norte Grande*. n.36. Santiago.

Henríquez, C., Azócar, G. y Romero, H. 2006. Monitoring and modeling the

urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Hábitat International* 30 (2006); pp. 945–964.

Henríquez, C. y Azócar, G. 2007. Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación de impacto ambiental. *Scripta Nova. REVISTA ELECTRÓNICA DE GEOGRAFÍA Y CIENCIAS SOCIALES*. Universidad de Barcelona. Vol. XI, núm. 245 (41).

Klein, R. 1979. Urbanization and Stream Quality Impairment. *Water Resources Bulletin* 15(4):948-963.

Leopold, L. 1968. hydrology for urban planning a guidebook on the hydrologic effects of urban land use. U. S. Geological Survey Circular 554. Washington DC: U.S. Department of interior.

Leopold, L. 1994. *A View of the River*. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Lillesand, T. y Kiefer, R. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3rd edition. New York. John Wiley and Sons, Inc.

Lozada García, Beatriz, Prael, Angélica y Sentelhas, Paulo. Influencia del fenómeno ENOS (El Niño y La Niña) en la disponibilidad de grados-día. *Agronomía Trop.*, jul. 2004, vol.54, no.3, p.309-320. ISSN 0002-192X.

Luck, M. y Wu ,J. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case of study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology* 17 PP: 327-339.

Luo, G., Zhou, Chen, C. y Li, C. 2007. A methodology of characterizing status and trend of land changes in oases: A case study of Sangong River watershed,

Xinjiang, China. *Land Use Policy* 22 (2005); pp.187–196.

May, C; Horner, R; Karr, J; Mar, B y Welch, E. 1997. Effects of urbanization on small streams in the Puget Sound lowland ecoregion. *Watershed Protection. Tech. 2*: 483–494.

McDonnell, M; Pickett, S; Groffman, P y Bohlen, P. 1997. Ecosystem processes along an urban-rural gradient. *Urban Ecosystems* 1. PP: 21-36

MINVU, 2006. Ordenanza Plan Regulador Metropolitano de Santiago. Texto Actualizado. Secretaría Ministerial Metropolitana de Vivienda y Urbanismo, Unidad Desarrollo Urbano, Área de Planificación. Documento de Trabajo, Arch. 40-2. 178 p.

Momparler , S. y Doménech, A. 2008. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia”. *Revista Técnica de Medio Ambiente. C&M Publicaciones*, 124 , 92–104.

Moscoso, C. 2007. Cambios en los usos y coberturas de suelo y sus efectos sobre la escorrentía urbana. Valparaíso y Viña del Mar, período 1980-2005. Tesis para optar al título de Geógrafo. Departamento de Geografía. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile.

MOP, DGA. 1991. Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días.

Naranjo, G. 2007. Expansión metropolitana en el periurbano de Santiago. Implicancias territoriales en la Provincia de Chacabuco. En: Santiago de Chile. *Movilidad espacial y Reconfiguración Metropolitana*. Carlos de Mattos, Rodrigo Hidalgo Editores. Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección Eure – Libros. Serie GEOLibros nº 8. 2007. 284 pp.

Naiman, R. 1992. Watershed Management: Balancing Sustainability and Environmental Change. Chapman and Hall, London, UK. 265 pp.

Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2009. Win TR -55 Small Watershed Hydrology. 32 Bit Window Based Application. Version 1.00.09. Compiled on 08/05/2009. http://www.wsi.nrcs.usda.gov/products/W2Q/H&H/Tools_Models/WinTR55.html. (consulta: 15 de diciembre de 2009).

Osborne, L. y Kovacic, D. 1993. Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. *Freshwater Biology* 29: 243-58.

Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. Y Menor Toribio, J. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje, *GeoFocus (Artículos)*, Nº 3, 2003, pp. 22-44. ISSN: 1578-5157

Pappas, E., Smith, D., Huang, C., Shuster W. y Bonta, J. 2008. Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. *Catena* 72 (2008); pp. 146–152.

Paul, M. y Meyer, J. 2001: Streams in the Urban Landscape. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2001. 32 ; pp. 333-65.

Plunk, D; Morgan, K y Newland, L. 1990. Mapping Impervious Cover Using Landsat TM Data. *Journal of Soil and Water Conservation*. Sept-Oct, pp.589-591.

Reilly, J. , Maggio, P. y Karp, S. 2003. A model to predict impervious surface for regional and municipal land use planning purposes. *Environmental Impact Assessment Review* 24 (2004); pp. 363–382.

Richards, C; Johnson, L y Host, G. 1996. Landscape-scale influences on stream habitats and biota. *Canadian Journal of Fisheries. Aquatic. Sciences.* 53:295–311.

Rivera H. Aplicación De La Evaluación Multicriterio Para La Asignación De Funciones Al Territorio De La Reserva Nacional Valdivia. Proyecto Manejo Sustentable Del Bosque Nativo (Conaf / Gtz), 2001.

Roa-Espinosa, A; Wilson, T; Norman, J y Johnson, K. 2003. Predicting the Impact of Urban Development on Stream Temperature Using a Thermal Urban Runoff Model (TURM). National Conference on Urban Stormwater: Enhancing Programs at the Local Level. February 17-20. Chicago, IL. Retrieved 17 Jul. 2008

Romero, H. Y Vásquez, A. 2005. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Revista EURE.* Vol. XXXI, N° 94; pp. 97-117, Santiago de Chile, diciembre 2005.

Romero, H., Vásquez, A. y Souza, N. 2005. Patrones espaciales de crecimiento urbano y sus efectos ambientales en la metrópolis de Valparaíso. Ponencia presentada en XXVI Congreso Internacional de Geografía, Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. Octubre de 2005. *Anales de la Sociedad de Ciencias Geográficas de Chile*, 2005.

Romero, H. Molina, M. Moscoso, C. Sarricolea, P. Smith, P. Vásquez, A. 2007. Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales. En: Santiago de Chile. *Movilidad espacial y*

Reconfiguración Metropolitana. Carlos de Mattos y Rodrigo Hidalgo Editores. Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección Eure – Libros. Serie GEOlibros nº 8. 2007. 284 pp.

Roth, N; Allan, J. y Erickson, D. 1996. Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scales. *Landscape Ecology*. 11:141–56

Ross, B. y Diílla, T. 1993. Rainfall simulation/water quality monitoring for best management practice effectioeness evaluation .Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University.

Ruiz, V. 2006. Estudio sistémico de riesgos naturales y antrópicos recurrentes a que se expone la ciudad de Valparaíso en relación a los asentamientos de pobreza. Master in programmazione di ambienti urbani sostenibili, Università degli Studi di Ferrara (Italia), Pontificia Università Cattolica del Paraná (Brasil), Università Cattolica di Cordoba, (Argentina), Università Tecnica Federico Santa Maria di Valparaiso (Chile). Anno accademico 2004-2005.

Salazar, A. 2007. La periurbanización en la recomposición de los espacios rurales metropolitanos: Santiago de Chile. En: Santiago de Chile. Movilidad espacial y Reconfiguración Metropolitana. Carlos de Mattos y Rodrigo Hidalgo Editores. Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección Eure – Libros. Serie GEOlibros nº 8. 2007. 284 pp.

Sauer, V; Thomas, W; Stricker, V. y Wilson, K. 1983. Flood Characteristics of Urban Watersheds in the United States, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2207.

Schueler, T. 1994. The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques* 1(3): pp. 100-111.

Schueler, T. 1995. The Architecture of Urban Stream Buffers. *Watershed Protection Techniques* 1(4): 155-163.

Schueler, T. y Holland, H. 2000. *The Practice of Watershed Protection-Techniques for Protecting Our Nations, Streams, Rivers, Lakes and Estuaries*. Center for Watershed Protection. Ellicott City, MD.

Silva, M., Pla, L. 2006. Análisis del patrón del paisaje y usos del suelo en gradientes urbano-rurales, Provincia de Buenos Aires, Argentina. CONICET-GEPAMA. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad de Buenos Aires. Universidad Francisco de Miranda, Coro-Venezuela.

Sleavin, W; Civco, D; Prisole, S. y Giannotti, L. 2000. Measuring Impervious Surfaces for Non-Point Source Pollution Modeling. *Proceedings of the ASPRS Annual Conference* May 22-26, 2000, Washington D.C.

Southard, R. 1987. An alternative basin characteristic for estimating impervious area and urban flood frequency and its potential application in Mississippi. *Proceedings; Mississippi water resources conference*. Mississippi water resources conference, Jackson, MS, United States, Mar.25-26, 1987.

Spencer, D. y Alexander, T. 1978. Technique for Estimating the Magnitude and Frequency of Floods in St. Louis County, Missouri, U.S. *Geological Survey Water Resources Investigations* 78-139.

Spinello, A. y Simmons, D. 1992. Baseflow of 10 South Shore Streams, Long Island, New York 1976-85 and the Effects of Urbanization on Baseflow and Flow Duration. *USGS. Water Resources Investigation Report* 90-4205.

Sponseller, R; Benfield, E. y Valett, H. 2001. Relationships between land use, spatial scale and stream macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology*. 46:1409–24.

Stanuikynas, T. y D. Van Abs. 2000. Impervious surface methodology. A methodology for defining and assessing impervious surfaces in the Raritan River basin. New Jersey: New Jersey Water Supply Authority.

Steedman, R. 1988. Modification and assessment of an index of biotic integrity to quantify stream quality in Southern Ontario. *Canadian journal of Fisheries and Aquatic Science* 45: 492-501.

Stocker, J. 1998. Methods for Measuring and Estimating Impervious Surface Coverage.

Nonpoint education for municipal officials. Technical paper N°3. 3pp.

Storm Water Pollution Prevention. 2002. Best Management Practices Guide Book, EXCAL Visual.

Taylor, B. 1993. The Influences of Wetland and Watershed Morphological Characteristics and Relationships to Wetland Vegetation Communities. Masters Thesis. Dept. of Civil Engineering. University of Washington, Seattle, WA.

Terrel, C. y Perfetti, P. 1991. Water Quality Indicators Guide: Surface Waters. United states. Department of agriculture. pp129.

Thurston Regional Planning. 2003. The relationship of land cover to total and effective impervious area. Thurston Regional Planning Council. Washington. 49p.

Torres, A. 2004. Apuntes de clase sobre hidrología urbana. Universidad Javeriana. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. pp 377.

Toll, D. 1984. An Evaluation of Simulated Thematic Mapper Data and Landsat MSS Data for Discriminating Suburban and Regional Land Use and Land Cover. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 50, no. 12.

USEPA. 2000. National Water Quality Inventory: 1998 Report to Congress. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.

Vesilind, P; Peirce, J. y Weiner; R. 1990. Environmental Pollution and Control. 3rd ed. Stoneham, MA: Butterworth-Heinemann.

Wang, L; Lyons, J. y Kanehl, P. 2001. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales. Environmental Management. 28: 255–66

Water Environment Federation. 1998. Urban runoff quality management. WEF Manual of Practice No. 23; ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 87. 259 pp

Zandbergen, P., H. Schreier, S. Brown, K. Hall y R. Bestbier (2000). Urban watershed management version 2.0. Vancouver: Institute for Resources and Environment, University of British Columbia.

Zhang, L; Wu, J; Zhen, Y. y Jiong, S. 2004. A GIS- based gradient analysis of urban landscape pattern of Shanghai metropolitan area, China. Landscape and Urban Planning 69 PP: 1-16.

ANEXO 1. Variables de las correcciones radiométricas de imágenes Landsat

Lansat 5 Fecha: 17/mar/1989											
Banda	Lmin (mW/cm2 sr um)	Lmax	Dn Haze	Wave lenght of center	Sat viewing angle	Sun Azimuth	Sun elevation	Sun ZENITH	bk OFFSET (INTER CEPT)	mk GAIN (SLOPE)	ck
1	-0,1520	19,300	40	0,486	31,27	58,73	40,92	49,08	0,11	0,01	16,59
2	-0,2840	36,500	11	0,571	31,27	58,73	40,92	49,08	0,13	0,01	19,22
3	-0,1170	26,400	8	0,661	31,27	58,73	40,92	49,08	0,17	0,01	26,70
4	-0,1510	22,100	0	0,388	31,27	58,73	40,92	49,08	0,27	0,02	14,73
5	-0,0370	3,020	0	1,677	31,27	58,73	40,92	49,08	0,28	0,01	50,52
6	0,1238	1,530									
7	-0,0150	1,650	0	2,223	31,27	58,73	40,92	49,08	0,24	0,00	61,86
Lansat 5 Fecha: 29/ene/1998											
Banda											
1	-0,1520	19,300	47	0,486	12,00	78,00	49,00	41,00	0,05	0,00	-11,66
2	-0,2840	36,500	16	0,571	12,00	78,00	49,00	41,00	0,08	-0,01	-13,96
3	-0,1170	26,400	10	0,661	12,00	78,00	49,00	41,00	0,12	-0,01	-17,71
4	-0,1510	22,100	4	0,388	12,00	78,00	49,00	41,00	0,23	-0,02	-11,96
5	-0,0370	3,020	2	1,677	12,00	78,00	49,00	41,00	0,24	-0,01	-20,63
6	0,1238	1,530									
7	-0,0150	1,650	1	2,223	12,00	78,00	49,00	41,00	0,17	-0,01	-29,26
Landsat 7 Fecha: 4/feb/2003											
Banda											
1	-0,6200	19,160	42	0,482	16,40	73,60	51,30	38,70	0,03	0,00	6,64
2	-0,6400	19,650	29	0,565	16,40	73,60	51,30	38,70	0,04	0,00	8,94
3	-0,5000	15,290	22	0,660	16,40	73,60	51,30	38,70	0,07	0,00	13,53
4	-0,5100	15,740	15	0,825	16,40	73,60	51,30	38,70	0,14	0,01	11,65
5	-0,1000	3,106	9	1,650	16,40	73,60	51,30	38,70	0,15	0,01	21,92
6											
7	-0,0350	1,080	7	2,220	16,40	73,60	51,30	38,70	0,10	0,00	25,33
Lansat 5 Fecha: 23/feb/2007											
Banda											
1	-0,1520	19,300	38	0,486	26,00	64,00	49,00	41,00	0,13	0,00	-29,20
2	-0,2840	36,500	15	0,571	26,00	64,00	49,00	41,00	0,08	-0,01	-12,27
3	-0,1170	26,400	8	0,661	26,00	64,00	49,00	41,00	0,12	-0,01	-15,91
4	-0,1510	22,100	4	0,388	26,00	64,00	49,00	41,00	0,22	-0,02	-12,35
5	-0,0370	3,020	4	1,677	26,00	64,00	49,00	41,00	0,23	-0,01	-19,21
6	0,1238	1,530									
7	-0,0150	1,650	4	2,223	26,00	64,00	49,00	41,00	0,17	-0,01	-22,65

ANEXO 2. Plano Regulador Metropolitano de Santiago

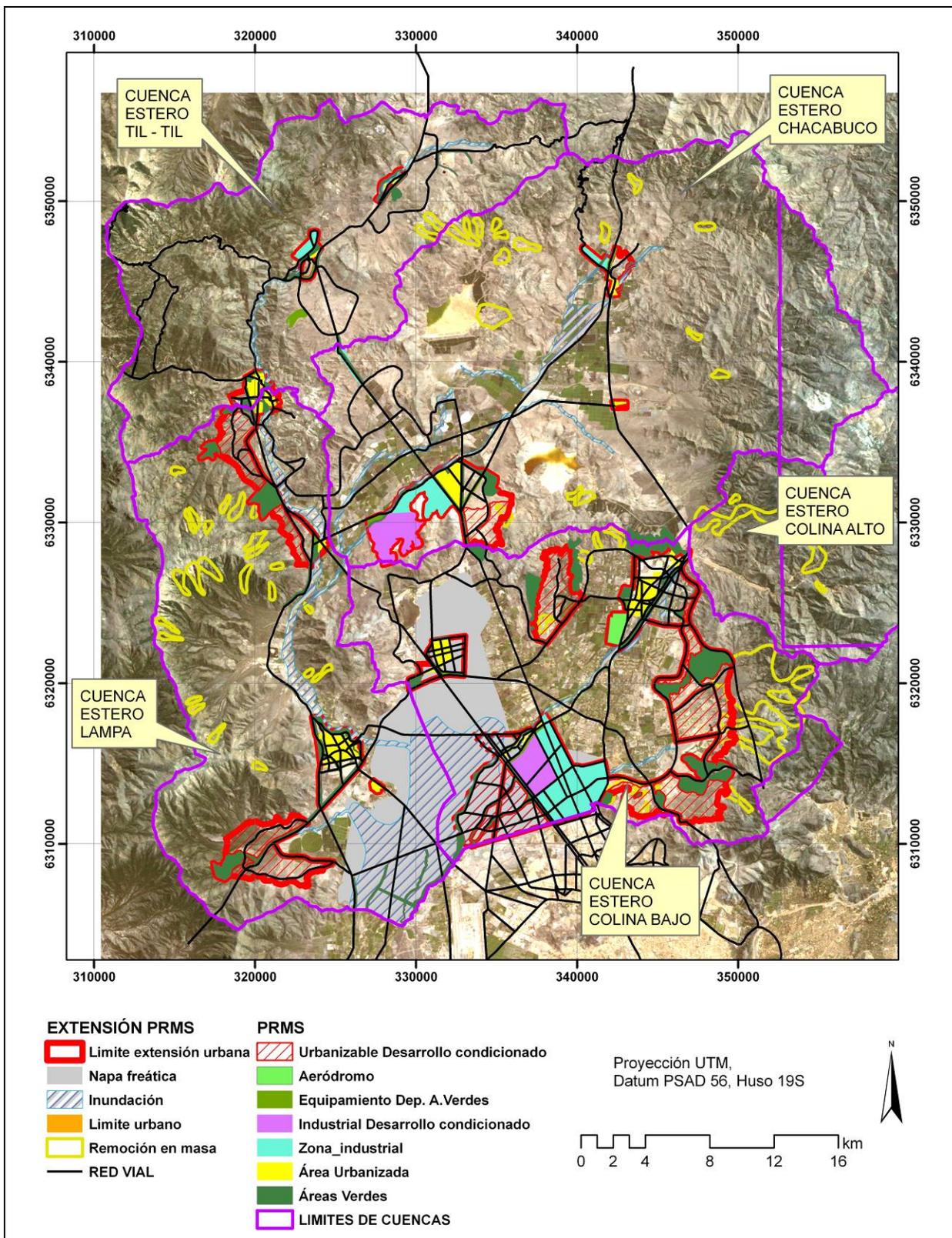


Figura 15. Plano Regulador Metropolitano de Santiago, Extensión Provincia de Chacabuco

Elaboración propia según Ordenanza PRMS 18/12/2006

ANEXO 3. Grupos Hidrológicos de Suelos

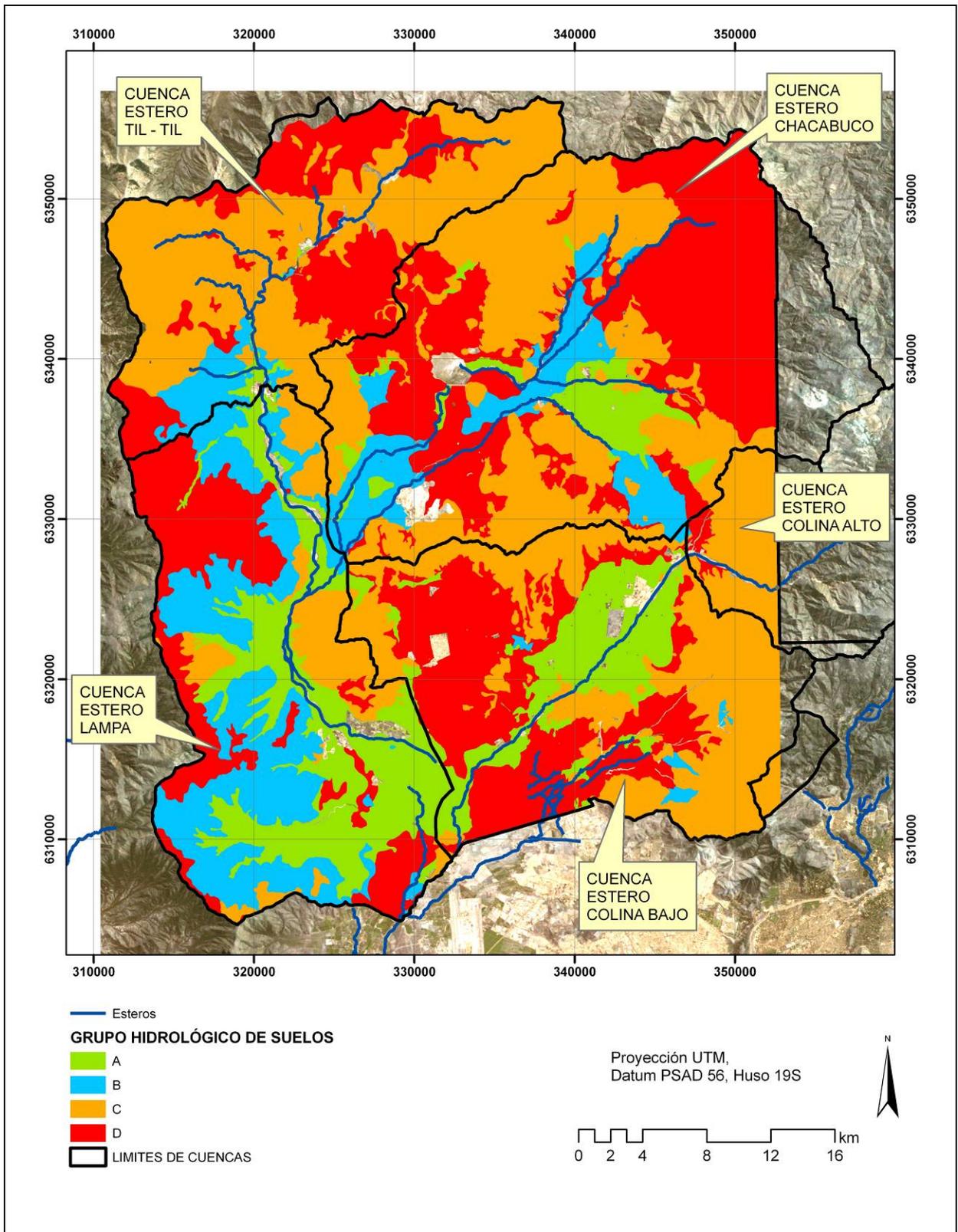


Figura 16. Grupos Hidrológicos de Suelos
 Elaboración propia a partir de CIREN (2005)

ANEXO 4. Isoyetas precipitación máxima en 24 horas

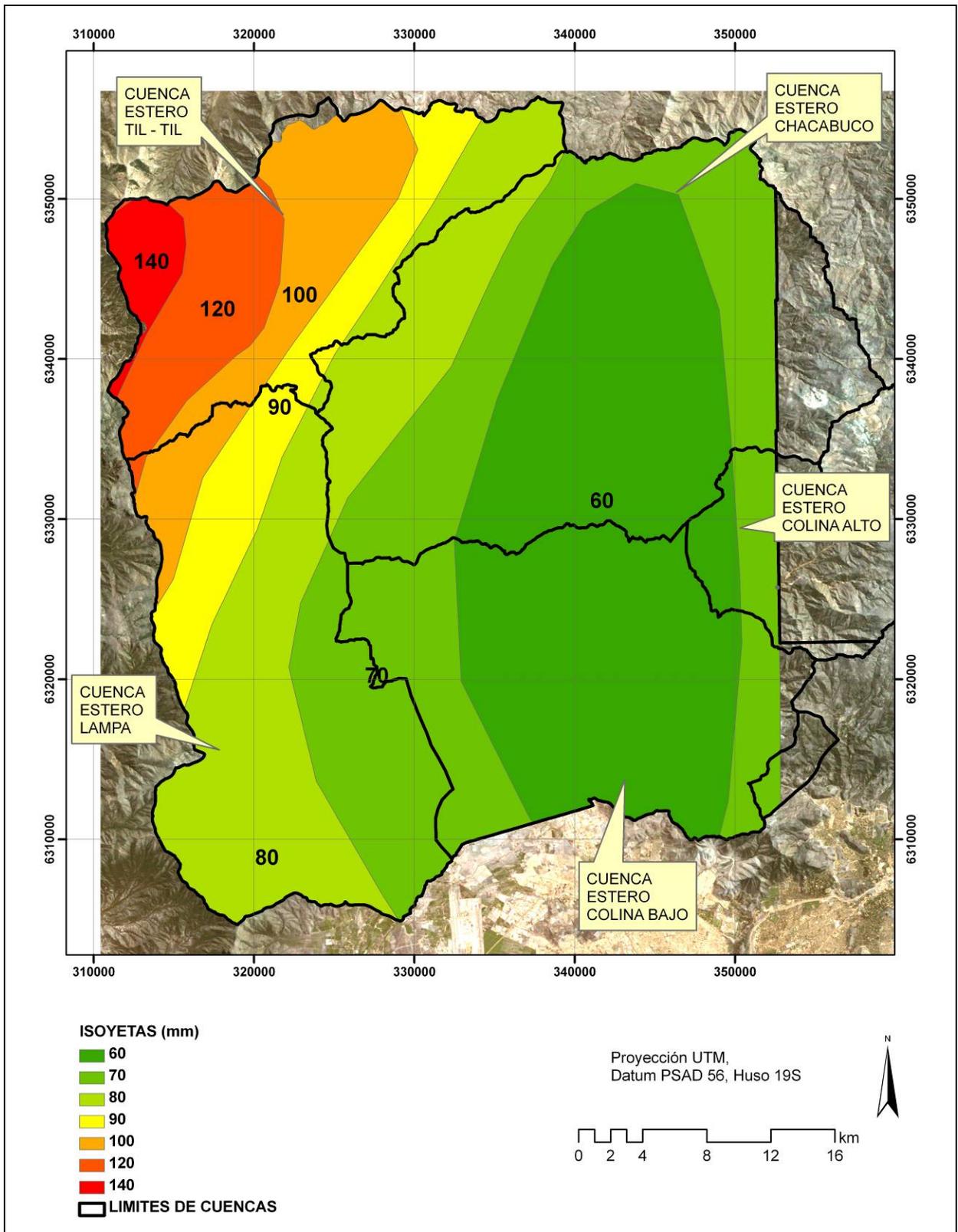


Figura 17. Isoyetas precipitación máxima en 24 horas
 Elaboración propia a partir de MOP, DGA (1991)

ANEXO 5. Criterios para la clasificación de suelos en Grupos Hidrológicos

	DESCRIPCIÓN	Grupo hidrológico de suelo
BAJO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA.	Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando estén muy húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas bien excesivamente drenados. Estos suelos una alta tasa de transmisión de agua.	A
MODERADAMENTE BAJO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA.	Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a drenados, textura moderadamente finos a moderadamente gruesos, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderada.	B
MODERADAMENTE ALTO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA.	Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impiden el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a las sales o álcali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).	C
ALTO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA.	Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a las sales o álcali, y suelos poco profundos sobre materiales casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión muy lenta.	D

Fuente: Chow *et al* (1994)

ANEXO 6. Matrices de cambio de coberturas del suelo

Cuadro 25. Matriz de cambio de superficies años 1989 - 1998

Coberturas año 1989 (ha)	Coberturas año 1998 (ha)											Total general
	Industrial	Residencial	B. Esclerófilo	Cultivos	Cuerpos de Agua	E. Abiertos	Minería	Forestal	T. Relave	V. Densa	V. Dispersa	
Área Industrial	112	6		1		0					0	120
Área Residencial	0	1.107		6	3	7					12	1.135
Bosque Esclerófilo		0	5.281	1	3	5				0	2.859	8.149
Cultivos	211	118	141	17.058	439	1.377	1			23	11.704	31.072
Cursos y Cuerpos de Agua		0	0	261	1.869	1	7			0	3	2.141
Espacios Abiertos	35	188	65	1.813	89	2.210	123	43	74	56	25.372	30.068
Minería				0	7	7	391				11	416
Vegetación Densa	19	51	1.742	8	7	79	1		0	981	9.574	12.462
Vegetación Dispersa	183	605	3.240	372	85	1.939	88	175	329	1.061	87.252	95.328
Total general	559	2.074	10.469	19.520	2.501	5.626	610	218	404	2.121	136.788	180.891

Cuadro 26. Matriz de cambio de superficies años 1989 - 2003

Coberturas año 1989 (ha)	Coberturas año 2003 (ha)											Total general
	Industrial	Residencial	B. Esclerófilo	Cultivos	Cuerpos de Agua	E. Abiertos	Forestal	Minería	T. Relave	V. Densa	V. Dispersa	
Área Industrial	119					0					0	120
Área Residencial	0	1.017	1	24	4	16					74	1.135
Bosque Esclerófilo		0	5.434		3	18					2.694	8.149
Cultivos	442	76	352	11.330	667	2.088	1	0		158	15.960	31.073
Cursos y Cuerpos de Agua					2.141							2.141
Espacios Abiertos	61	183	44	1.783	94	3.884	192	292	469	69	22.999	30.069
Minería				1	14	16		348			38	416
Vegetación Densa	35	18	2.218	77	7	143	0	0	0	919	9.046	12.462
Vegetación Dispersa	357	281	2.444	1.168	86	5.398	213	58	803	408	84.115	95.330
Total general	1.014	1.575	10.491	14.385	3.016	11.561	406	698	1.272	1.553	134.927	180.895

Cuadro 27. Matriz de cambio de superficies años 1989 - 2007

Coberturas año 1989 (ha)	Coberturas año 2007 (ha)											Total general
	Industrial	Residencial	Esclerófilo	Cultivos	Cuerpos de Agua	E. Abiertos	Forestal	Minería	T. Relave	V. Densa	V. Dispersa	
Área Industrial	118					0					0	119
Área Residencial	1	1.020		43	1	3				1	66	1.135
Bosque Esclerófilo		0	4.117	1	3	30				193	3.806	8.149
Cultivos	681	191	82	11.737	434	2.051	1	0		445	15.187	30.808
Cursos y Cuerpos de Agua	8	22			1.832			6				1.869
Espacios Abiertos	272	357	25	1.883	87	2.984	354	289	542	127	23.144	30.063
Minería				1	2	16		335			56	409
Vegetación Densa	39	18	1.609	92	7	169	0	0	0	776	9.751	12.462
Vegetación Dispersa	519	292	1.672	1.171	83	5.295	483	55	956	524	84.274	95.324
Total general	1.639	1.900	7.505	14.927	2.449	10.548	838	686	1.498	2.065	136.284	180.338

Cuadro 28. Matriz de cambio de superficies años 1998 - 2003

Coberturas año 1998 (ha)	Coberturas año 2003 (ha)											Total general
	Industrial	Residencial	Esclerófilo	Cultivos	Cuerpos de Agua	E. Abiertos	Forestal	Minería	T. Relave	V. Densa	V. Dispersa	
Industrial	552	2		1		2					3	559
Residencial	224	1.362		84	0	66				6	336	2.078
Esclerófilo			6.308	2	0	17				0	4.146	10.473
Cultivos	107	26	220	9.478	495	1.196	3	1		74	7.931	19.530
Cuerpos de Agua					2.501							2.501
Espacios Abiertos	34	45	8	450	1	1.591	8	101	118	60	3.250	5.665
Minería				1	14	60	2	412			122	611
Forestal						7	101				110	218
Tranque Relave						0			395	1	8	404
Vegetación Densa	0	0	4	65	0	34	1	0		504	1.515	2.123
Vegetación Dispersa	98	145	3.957	4.317	4	8.622	291	184	759	912	117.629	136.917
Total general	1.014	1.579	10.498	14.397	3.016	11.594	406	698	1.272	1.555	135.050	181.079

Cuadro 29. Matriz de cambio de superficies años 1998 - 2007

		Coberturas año 2007 (ha)											
Coberturas año 1998 (ha)	Área Industrial	Residencial	Esclerófilo	Cultivos	Cuerpos de Agua	E. Abiertos	Forestal	Minería	T. Relave	V. Densa	V. Dispersa	Total general	
Área Industrial	550	2		1		2					2	557	
Área Residencial	260	1.364		79	0	64				4	254	2.026	
Bosque Esclerófilo			4.845	1	0	45					218	5.365	
Cultivos	251	154	12	9.157	258	1.165	3	1		287	8.007	19.295	
Cursos y Cuerpos de Agua	8	22			1.832			6				1.869	
Espacios Abiertos	152	52	3	552	1	935	11	97	124	45	3.694	5.665	
Minería				1	2	44	3	399			154	603	
Forestal						2	136				81	218	
Tranque Relave									402		2	404	
Vegetación Densa	2	0	1	60	0	47	1	0		330	1.683	2.123	
Vegetación Dispersa	449	304	2.649	5.084	3	8.271	687	182	973	1.186	117.126	136.915	
Total general	1.672	1.898	7.510	14.935	2.096	10.574	840	685	1.498	2.069	136.368	180.147	

Cuadro 30. Matriz de cambio de superficies años 2003 - 2007

		Coberturas año 2007 (ha)											
Coberturas año 2003 (ha)	Industrial	Residencial	Esclerófilo	Cultivos	Cuerpos de Agua	E. Abiertos	Forestal	Minería	T. Relave	V. Densa	V. Dispersa	Total general	
Área Industrial	1.011											1.011	
Área Residencial		1.579										1.579	
Bosque Esclerófilo	0	2	6.155	11		10				500	3.820	10.498	
Cultivos	109	77		8.911		615	2			103	4.563	14.378	
Cursos y Cuerpos de Agua	11	23			2.096			11				2.141	
Espacios Abiertos	112	52	2	709		3.240	32		27	41	7.378	11.592	
Forestal						0	360				46	406	
Minería						2		674			22	698	
Tranques de Relave						7	5		1.209		51	1.272	
Vegetación Densa	2			99		8	2		3	641	801	1.555	
Vegetación Dispersa	428	166	1.353	5.206		6.693	439		260	784	119.691	135.020	
Total general	1.672	1.898	7.510	14.936	2.096	10.575	840	686	1.498	2.069	136.371	180.151	

ANEXO 7. Superficies de coberturas de suelos según cuencas

Cuadro 31. Superficies de coberturas del suelo según cuenca, año 1989

Cobertura	Estero Chacabuco	Estero Colina Alto	Estero Colina Bajo	Estero Lampa	Estero Tili-Tili	Río Mapocho	Total general
	(ha)						
Área Industrial			118	1			119
Área Residencial	256		604	243	32		1.135
Bosque Esclerófilo	10		1	4.200	3.938		8.149
Cultivos	8.063	162	15.321	6.561	700		30.808
Cursos y Cuerpos de Agua	728	34	373	431	302		1.869
Espacios Abiertos	12.455	320	6.308	6.249	4.691	41	30.063
Minería	342		17		50		409
Vegetación Densa	2.402	959	1.017	4.574	2.945	564	12.462
Vegetación Dispersa	33.364	3.724	17.030	20.416	19.871	920	95.324
Total general	57.619	5.199	40.791	42.674	32.529	1.525	180.338

Cuadro 32. Superficies de Uso y cobertura del suelo según cuenca, año 1998

Cobertura	Estero Chacabuco	Estero Colina Alto	Estero Colina Bajo	Estero Lampa	Estero Tili-Tili	Río Mapocho	Total general
	(ha)						
Área Industrial			556	0			557
Área Residencial	337		1.206	406	76		2.026
Bosque Esclerófilo	14		1	5.772	4.686		10.473
Cultivos	5.501	68	9.057	4.424	245		19.296
Cursos y Cuerpos de Agua	728	34	373	431	302		1.869
Espacios Abiertos	2.344	165	2.001	528	626	1	5.665
Minería	535		18		50		603
Forestal	218						218
Tranque Relave	404						404
Vegetación Densa	707	464	404	90	39	419	2.123
Vegetación Dispersa	46.774	4.467	27.114	30.963	26.491	1.106	136.915
Total general	57.563	5.199	40.731	42.616	32.515	1.525	180.148

Cuadro 33. Superficies de Uso y cobertura del suelo según cuenca, año 2003

Cobertura	Estero Chacabuco	Estero Colina Alto	Estero Colina Bajo	Estero Lampa	Estero Til-Til	Río Mapocho	Total general
	(ha)						
Área Industrial			928	45			973
Área Residencial	314		806	382	77		1.579
Bosque Esclerófilo	1		3	5.661	4.833		10.498
Cultivos	4.227	1	7.084	3.066			14.378
Cursos y Cuerpos de Agua	728	34	373	431	302		1.869
Espacios Abiertos	5.843	234	2.691	1.998	797	30	11.591
Forestal	404		0				404
Minería	674				24		698
Tranques de Relave	1.272						1.272
Vegetación Densa	560	238	429	0	44	284	1.555
Vegetación Dispersa	43.442	4.692	28.342	30.913	26.418	1.212	135.019
Total general	57.465	5.199	40.658	42.497	32.495	1.525	179.838

Cuadro 34. Superficies de Uso y cobertura del suelo según cuenca, año 2007

Cobertura	Estero Chacabuco	Estero Colina Alto	Estero Colina Bajo	Estero Lampa	Estero Til-Til	Río Mapocho	Total general
	(ha)						
Área Industrial			1.402	231			1.632
Área Residencial	314		872	634	77		1.898
Bosque Esclerófilo				3.810	3.701		7.511
Cultivos	4.503	2	7.335	3.095			14.935
Cursos y Cuerpos de Agua	722	34	358	416	302		1.832
Espacios Abiertos	5.499	96	2.147	1.946	877	9	10.575
Forestal	838						838
Minería	680						680
Tranques de Relave	1.498						1.498
Vegetación Densa	422	174	439	637	224	173	2.069
Vegetación Dispersa	42.989	4.893	28.104	31.727	27.314	1.342	136.369
Total general	57.465	5.199	40.658	42.497	32.495	1.525	179.838

ANEXO 8. Desagregación de Áreas Efectivas Impermeables (AEI)

**Cuadro 35. Superficies de Áreas Efectivas Impermeables (AEI) según cuenca en el periodo
1989 – 2007**

AÑO	COBERTURA	Estero	Estero	Estero	Estero	Total general
		Chacabuco	Colina Bajo	Lampa	Til-Til	
		----- (ha) -----				
1989	Residencial					
	0-10% Área Impermeable	0,2	0,4	1,5	0,4	2,4
	Residencial					
	10-30% Área Impermeable	28,7	90,8	73,2	4,7	197,4
	Residencial					
	30-45% Área Impermeable	105,0	244,5	116,9	15,3	481,7
	Residencial					
	45-100% Área Impermeable	122,4	275,2	55,3	11,7	464,5
	TOTAL Residencial	256,3	610,9	246,9	32,1	1.146
	Industrial					
	0-10% Área Impermeable		0,6			0,6
Industrial						
10-30% Área Impermeable		43,5	0,1		43,5	
Industrial						
30-45% Área Impermeable		53,4	0,4		53,7	
Industrial						
45-100% Área Impermeable		20,7	0,1		20,8	
TOTAL Industrial		118,2	0,6	0	118,6	
2007	Residencial					
	0-10% Área Impermeable	16,3	95,4	75,3	7,4	194,4
	Residencial					
	10-30% Área Impermeable	62,0	107,3	183,3	20,4	373,0
	Residencial					
	30-45% Área Impermeable	97,8	116,2	138,9	20,2	373,2
	Residencial					
	45-100% Área Impermeable	138,1	553,3	236,9	29,0	957,3
	TOTAL Residencial	314,2	872,2	634,4	77,0	1.897,9
	Industrial					
	0-10% Área Impermeable		157,9	46,8		204,7
Industrial						
10-30% Área Impermeable		213,4	93,0		306,4	
Industrial						
30-45% Área Impermeable		193,5	44,4		237,9	
Industrial						
45-100% Área Impermeable		849,4	46,5		895,9	
TOTAL Industrial		1.414,2	230,7		1.644,9	

Cuadro 36. Superficie de Áreas Efectivas Impermeables (AEI) según proporción impermeable y cuenca en el periodo 1989 – 2007 para Áreas Residenciales

AÑO	COBERTURA	Estero	Estero	Estero	Estero	Total general
		Chacabuco	Colina Bajo	Lampa	Til-Til	
----- (ha) -----						
1989	0-10% Área Impermeable	0,2	0,4	1,5	0,4	2,4
1998	0-10% Área Impermeable	0,1	6,2	12,0	0,3	18,5
2003	0-10% Área Impermeable	34,4	117,7	147,3	14,2	313,6
2007	0-10% Área Impermeable	16,3	95,4	75,3	7,4	194,4
1989	10-30% Área Impermeable	28,7	90,8	73,2	4,7	197,4
1998	10-30% Área Impermeable	26,2	268,7	240,2	18,5	553,6
2003	10-30% Área Impermeable	72,6	95,2	106,7	25,2	299,7
2007	10-30% Área Impermeable	62,0	107,3	183,3	20,4	373,0
1989	30-45% Área Impermeable	105,0	244,5	116,9	15,3	481,7
1998	30-45% Área Impermeable	83,2	410,2	102,8	30,1	626,2
2003	30-45% Área Impermeable	87,8	116,8	66,3	17,9	288,8
2007	30-45% Área Impermeable	97,8	116,2	138,9	20,2	373,2
1989	45-100% Área Impermeable	122,4	275,2	55,3	11,7	464,5
1998	45-100% Área Impermeable	227,8	520,8	51,5	27,5	827,6
2003	45-100% Área Impermeable	119,4	484,1	76,0	19,8	699,3
2007	45-100% Área Impermeable	138,1	553,3	236,9	29,0	957,3
Cambio de Superficies en el periodo						
1989-1998	0-10% Área Impermeable	-0,1	5,8	10,5	-0,1	16,1
1998-2003	0-10% Área Impermeable	34,3	111,5	135,3	13,9	295,1
2003-2007	0-10% Área Impermeable	-18,0	-22,3	-72,0	-6,8	-119,2
1989-1998	10-30% Área Impermeable	-2,4	177,9	167,0	13,8	356,3
1998-2003	10-30% Área Impermeable	46,4	-173,5	-133,5	6,6	-254,0
2003-2007	10-30% Área Impermeable	-10,6	12,1	76,6	-4,8	73,3
1989-1998	30-45% Área Impermeable	-21,8	165,7	-14,2	14,7	144,5
1998-2003	30-45% Área Impermeable	4,7	-293,5	-36,4	-12,2	-337,4
2003-2007	30-45% Área Impermeable	9,9	-0,5	72,6	2,4	84,4
1989-1998	45-100% Área Impermeable	105,4	245,6	-3,7	15,8	363,1
1998-2003	45-100% Área Impermeable	-108,4	-36,6	24,4	-7,7	-128,3
2003-2007	45-100% Área Impermeable	18,7	69,2	160,9	9,2	258,0

Cuadro 37. Superficies de Áreas Efectivas Impermeables (AEI) según proporción impermeable y cuenca en el periodo 1989 – 2007 para Áreas Industriales

AÑO	COBERTURA	Estero	Estero	Estero	Estero	Total general
		Chacabuco	Colina Bajo	Lampa	Til-Til	
----- (ha) -----						
1989	0-10% Área Impermeable		1			1
1998	0-10% Área Impermeable		1			1
2003	0-10% Área Impermeable		138	6		144
2007	0-10% Área Impermeable		158	47		205
1989	10-30% Área Impermeable		43	0		44
1998	10-30% Área Impermeable		77	0		78
2003	10-30% Área Impermeable		149	13		163
2007	10-30% Área Impermeable		213	93		306
1989	30-45% Área Impermeable		53	0		54
1998	30-45% Área Impermeable		133	0		133
2003	30-45% Área Impermeable		120	10		130
2007	30-45% Área Impermeable		193	44		238
1989	45-100% Área Impermeable		21	0		21
1998	45-100% Área Impermeable		344	0		344
2003	45-100% Área Impermeable		522	15		537
2007	45-100% Área Impermeable		849	46		896

Cambio de Superficies en el periodo

1989-1998	0-10% Área Impermeable	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9
1998-2003	0-10% Área Impermeable	0,0	136,1	6,0	0,0	142,2
2003-2007	0-10% Área Impermeable	0,0	20,3	40,7	0,0	61,1
1989-1998	10-30% Área Impermeable	0,0	33,8	0,2	0,0	34,1
1998-2003	10-30% Área Impermeable	0,0	72,1	13,1	0,0	85,2
2003-2007	10-30% Área Impermeable	0,0	64,1	79,6	0,0	143,7
1989-1998	30-45% Área Impermeable	0,0	79,8	-0,3	0,0	79,5
1998-2003	30-45% Área Impermeable	0,0	-12,9	9,9	0,0	-2,9
2003-2007	30-45% Área Impermeable	0,0	73,2	34,4	0,0	107,6
1989-1998	45-100% Área Impermeable	0,0	323,6	-0,0	0,0	323,6
1998-2003	45-100% Área Impermeable	0,0	177,3	15,0	0,0	192,3
2003-2007	45-100% Área Impermeable	0,0	327,8	31,4	0,0	359,1

ANEXO 9. Resultados de métrica de paisajes

Cuadro 38. Superficies de vegetación natural según cuenca, tipo de vegetación, año de clasificación y de simulación de coberturas del suelo

Cuenca	Cobertura	AÑO					
		1989	1998	2003	2007	2016	2025
		----- (ha) -----					
Estero Chacabuco	Bosque Esclerófilo		4				
	Espacios Abiertos	10.982	1.552	4.551	3.679	9.961	10,477
	Vegetación Densa	1.625	307	359	249	335	375
	Vegetación Dispersa	35.348	47.757	44.865	44.889	37.602	35,888
Total Estero Chacabuco		47.954	49.619	49.776	48.817	47.897	46,740
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	211	112	157	56	117	128
	Vegetación Densa	743	319	169	113	118	154
	Vegetación Dispersa	4.045	4.664	4.836	4.989	4.919	4,871
Total Estero Colina Alto		4.999	5.095	5.162	5.158	5.155	5,153
Estero Colina Bajo	Bosque Esclerófilo			3			
	Espacios Abiertos	5.514	1.361	1.991	1.346	3.275	3,225
	Vegetación Densa	681	194	320	255	264	494
	Vegetación Dispersa	17.781	27.528	29.225	29.039	29.267	23,124
Total Estero Colina Bajo		23.977	29.083	31.539	30.641	32.805	26,844
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	4.022	5.278	5.309	3.721	4.336	3,497
	Espacios Abiertos	5.765	358	1.541	1.342	3.408	3,454
	Vegetación Densa	3.965	34		410	577	844
	Vegetación Dispersa	21.350	31.529	31.660	32.547	30.658	28,647
Total Estero Lampa		35.102	37.199	38.510	38.019	38.978	36,442
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	3.770	4.133	4.465	3.374	3.870	3,073
	Espacios Abiertos	3.927	387	517	402	1.378	1,493
	Vegetación Densa	2.088		18	148	190	337
	Vegetación Dispersa	21.047	26.737	26.518	27.608	26.099	26,422
Total Estero Til-Til		30.833	31.257	31.518	31.531	31.537	31,325
Total general		142.865	152.252	156.505	154.165	156.372	146,503
		81%	86%	88%	87%	88%	83%
TOTAL CUENCAS EN ESTUDIO		177,434	177.260	177.197	177.136	177.251	177.250

Cuadro 39. Número de fragmentos según tipo de cobertura de vegetación natural y cuenca

		AÑO					
Cuenca	Cobertura	1989	1998	2003	2007	2016	2025
Estero Chacabuco	Bosque Esclerófilo	3	5				
	Espacios Abiertos	2.572	896	1.403	1.645	446	590
	Vegetación Densa	832	233	212	179	103	143
	Vegetación Dispersa	965	930	492	528	100	121
Total Estero Chacabuco		4.372	2.064	2.107	2.352	649	854
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	141	128	100	58	15	20
	Vegetación Densa	252	123	71	59	21	39
	Vegetación Dispersa	77	29	16	26	4	4
Total Estero Colina Alto		470	280	187	143	40	63
Estero Colina Bajo	Bosque Esclerófilo			2			
	Espacios Abiertos	1.334	706	871	834	345	390
	Vegetación Densa	324	133	133	173	73	211
	Vegetación Dispersa	274	785	375	414	92	120
Total Estero Colina Bajo		1.932	1.624	1.381	1.421	510	721
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	621	696	574	248	60	93
	Espacios Abiertos	1.215	345	658	689	269	320
	Vegetación Densa	991	30		246	96	183
	Vegetación Dispersa	1.098	1.023	485	480	66	164
Total Estero Lampa		3.925	2.094	1.717	1.663	491	760
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	615	702	631	469	157	196
	Espacios Abiertos	1.121	226	226	338	121	162
	Vegetación Densa	856	5	23	67	42	82
	Vegetación Dispersa	919	598	296	297	40	65
Total Estero Til-Til		3.511	1.531	1.176	1.171	360	505
Total general		14.210	7.593	6.568	6.750	2.050	2.903

Cuadro 40. Tamaño promedio de parches de vegetación natural según categoría y cuenca.

		AÑO					
Cuenca	Cobertura	1989	1998	2003	2007	2016	2025
		------(ha)-----					
Estero Chacabuco	Bosque Esclerófilo	0,7	1,1				
	Espacios Abiertos	4,5	2,0	3,5	2,5	22,4	17,9
	Vegetación Densa	2,3	1,7	2,0	1,8	3,4	2,9
	Vegetación Dispersa	35,9	51,0	90,3	83,9	375,6	295,8
Total Estero Chacabuco		11,0	24,1	23,6	20,7	73,8	54,7
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	1,7	1,0	1,8	1,1	7,9	6,4
	Vegetación Densa	3,3	2,9	2,7	2,2	5,7	4,1
	Vegetación Dispersa	51,1	158,8	299,5	191,0	1.229,3	1.215,6
Total Estero Colina Alto		10,6	18,2	27,6	36,1	128,9	81,8
Estero Colina Bajo	Bosque Esclerófilo			1,7			
	Espacios Abiertos	4,4	2,2	2,6	1,9	9,6	8,4
	Vegetación Densa	2,4	1,9	2,7	1,8	3,8	2,6
	Vegetación Dispersa	63,7	34,9	76,9	69,3	317,6	192,2
Total Estero Colina Bajo		12,5	18,0	22,8	21,5	64,3	37,3
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	6,6	7,8	9,5	15,1	72,3	37,7
	Espacios Abiertos	4,9	1,2	2,6	2,2	12,7	10,9
	Vegetación Densa	4,1	1,4		2,0	6,1	4,8
	Vegetación Dispersa	19,2	30,6	64,6	67,1	463,9	174,3
Total Estero Lampa		9,0	17,8	22,4	22,8	79,4	47,9
Estero Til Til	Bosque Esclerófilo	6,2	6,0	7,3	7,4	24,8	15,9
	Espacios Abiertos	3,7	1,9	2,6	1,6	11,5	9,3
	Vegetación Densa	2,7	0,9	1,1	2,5	4,6	4,3
	Vegetación Dispersa	22,4	44,4	88,9	92,1	651,0	405,2
Total Estero Til Til		8,8	20,4	26,8	26,9	87,5	62,0
Total general		10,1	20,1	23,8	22,8	76,2	50,5

ANEXO 10. Valores de las variables de métrica de paisajes

CUENCA	COBERTURA	AÑO	Suma de PERIMETRO (km)	Superficie total (ha)	Tamaño promedio de parches (ha)	Promedio de Perímetro/ Superficie (km/ha)
Estero Chacabuco	Bosque Esclerófilo	1998	1.8	4.0	2.0	0.5
Estero Colina Bajo	Bosque Esclerófilo	2003	1.6	3.3	1.7	0.5
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	1989	914.1	4,021.9	11.1	0.4
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	1998	1,063.7	5,277.8	15.5	0.5
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	2003	1,031.6	5,309.2	16.4	0.4
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	2007	669.0	3,720.5	26.4	0.4
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	2016	302.3	4,335.7	81.8	0.2
Estero Lampa	Bosque Esclerófilo	2025	398.3	3,497.5	47.3	0.3
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	1989	856.1	3,770.5	10.4	0.4
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	1998	985.5	4,133.1	11.4	0.5
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	2003	954.3	4,464.8	12.6	0.4
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	2007	721.5	3,374.1	14.1	0.4
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	2016	361.2	3,870.2	30.7	0.3
Estero Til-Til	Bosque Esclerófilo	2025	455.6	3,073.3	21.8	0.3
Estero Chacabuco	Espacios Abiertos	1989	2,523.2	10,982.2	8.9	0.0
Estero Chacabuco	Espacios Abiertos	1998	521.1	1,552.0	4.3	0.5
Estero Chacabuco	Espacios Abiertos	2003	1,188.4	4,550.9	6.0	0.4
Estero Chacabuco	Espacios Abiertos	2007	1,145.1	3,679.4	4.5	0.5
Estero Chacabuco	Espacios Abiertos	2016	893.4	9,960.8	24.3	0.2
Estero Chacabuco	Espacios Abiertos	2025	963.7	10,476.8	21.0	0.2
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	1989	67.6	210.6	5.1	0.6
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	1998	39.0	111.6	5.6	0.5
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	2003	54.5	156.8	4.4	0.5
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	2007	21.0	56.5	4.3	0.5
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	2016	21.5	117.1	8.4	0.2

CUENCA	COBERTURA	AÑO	Suma de PERIMETRO (km)	Superficie total (ha)	Tamaño promedio de parches (ha)	Promedio de Perímetro/ Superficie (km/ha)
Estero Colina Alto	Espacios Abiertos	2025	24.7	128.0	7.1	0.3
Estero Colina Bajo	Espacios Abiertos	1989	1,197.9	5,514.3	8.1	0.4
Estero Colina Bajo	Espacios Abiertos	1998	415.2	1,360.8	4.5	0.4
Estero Colina Bajo	Espacios Abiertos	2003	632.1	1,990.6	4.2	0.4
Estero Colina Bajo	Espacios Abiertos	2007	486.5	1,346.4	3.2	0.5
Estero Colina Bajo	Espacios Abiertos	2016	481.1	3,274.8	10.8	0.3
Estero Colina Bajo	Espacios Abiertos	2025	474.2	3,225.4	9.8	0.3
Estero Lampa	Espacios Abiertos	1989	1,142.0	5,765.0	9.8	0.7
Estero Lampa	Espacios Abiertos	1998	139.6	357.9	3.7	0.5
Estero Lampa	Espacios Abiertos	2003	483.2	1,541.0	4.2	0.4
Estero Lampa	Espacios Abiertos	2007	454.6	1,341.9	3.9	0.4
Estero Lampa	Espacios Abiertos	2016	406.7	3,408.5	14.5	0.2
Estero Lampa	Espacios Abiertos	2025	427.8	3,454.0	13.0	0.2
Estero Til-Til	Espacios Abiertos	1989	964.1	3,927.0	7.5	0.5
Estero Til-Til	Espacios Abiertos	1998	135.3	386.9	3.6	0.5
Estero Til-Til	Espacios Abiertos	2003	171.5	517.3	4.2	0.5
Estero Til-Til	Espacios Abiertos	2007	165.0	401.7	2.8	0.5
Estero Til-Til	Espacios Abiertos	2016	178.2	1,378.5	13.0	0.2
Estero Til-Til	Espacios Abiertos	2025	196.6	1,492.9	11.2	0.2
Estero Chacabuco	Vegetación Densa	1989	618.8	1,624.7	3.7	0.5
Estero Chacabuco	Vegetación Densa	1998	127.9	306.8	3.1	0.5
Estero Chacabuco	Vegetación Densa	2003	137.9	359.5	3.2	0.5
Estero Chacabuco	Vegetación Densa	2007	102.0	248.7	2.9	0.5
Estero Chacabuco	Vegetación Densa	2016	88.7	334.6	4.5	0.4
Estero Chacabuco	Vegetación Densa	2025	100.2	375.4	4.3	0.4
Estero Colina Alto	Vegetación Densa	1989	232.2	743.2	6.5	0.5
Estero Colina Alto	Vegetación Densa	1998	104.9	319.5	5.7	0.5
Estero Colina Alto	Vegetación Densa	2003	62.3	169.3	4.0	0.5

CUENCA	COBERTURA	AÑO	Suma de PERIMETRO (km)	Superficie total (ha)	Tamaño promedio de parches (ha)	Promedio de Perímetro/ Superficie (km/ha)
Estero Colina Alto	Vegetación Densa	2007	44.8	112.8	3.4	0.5
Estero Colina Alto	Vegetación Densa	2016	27.4	118.3	6.2	0.3
Estero Colina Alto	Vegetación Densa	2025	39.1	154.0	5.1	0.3
Estero Colina Bajo	Vegetación Densa	1989	227.6	680.9	4.1	0.5
Estero Colina Bajo	Vegetación Densa	1998	77.4	193.7	3.6	0.5
Estero Colina Bajo	Vegetación Densa	2003	115.3	320.5	4.3	0.5
Estero Colina Bajo	Vegetación Densa	2007	97.1	255.4	3.2	0.4
Estero Colina Bajo	Vegetación Densa	2016	65.3	263.9	4.7	0.3
Estero Colina Bajo	Vegetación Densa	2025	146.4	493.8	3.4	0.4
Estero Lampa	Vegetación Densa	1989	1,076.3	3,965.4	7.0	0.4
Estero Lampa	Vegetación Densa	1998	13.9	33.6	2.2	0.5
Estero Lampa	Vegetación Densa	2007	145.5	409.7	3.7	0.5
Estero Lampa	Vegetación Densa	2016	111.4	576.6	7.0	0.3
Estero Lampa	Vegetación Densa	2025	168.8	843.6	6.3	0.3
Estero Til-Til	Vegetación Densa	1989	673.0	2,088.2	4.5	0.5
Estero Til-Til	Vegetación Densa	2003	7.8	17.9	1.8	0.5
Estero Til-Til	Vegetación Densa	2007	48.1	147.8	4.0	0.5
Estero Til-Til	Vegetación Densa	2016	38.3	189.6	5.6	0.3
Estero Til-Til	Vegetación Densa	2025	68.6	337.4	5.3	0.3
Estero Chacabuco	Vegetación Dispersa	1989	3,049.0	35,347.5	101.3	0.6
Estero Chacabuco	Vegetación Dispersa	1998	1,392.4	47,756.6	254.0	1.0
Estero Chacabuco	Vegetación Dispersa	2003	2,166.8	44,865.3	284.0	0.4
Estero Chacabuco	Vegetación Dispersa	2007	2,168.2	44,888.6	270.4	0.4
Estero Chacabuco	Vegetación Dispersa	2016	1,395.0	37,601.9	464.2	0.3
Estero Chacabuco	Vegetación Dispersa	2025	1,462.4	35,887.8	370.0	0.3
Estero Colina Alto	Vegetación Dispersa	1989	329.0	4,045.2	126.4	0.5
Estero Colina Alto	Vegetación Dispersa	1998	197.9	4,663.7	388.6	0.4
Estero Colina Alto	Vegetación Dispersa	2003	155.8	4,836.2	967.2	0.3

CUENCA	COBERTURA	AÑO	Suma de PERIMETRO (km)	Superficie total (ha)	Tamaño promedio de parches (ha)	Promedio de Perímetro/ Superficie (km/ha)
Estero Colina Alto	Vegetación Dispersa	2007	112.5	4,989.0	2,494.5	0.0
Estero Colina Alto	Vegetación Dispersa	2016	91.8	4,919.5	1,639.8	0.1
Estero Colina Alto	Vegetación Dispersa	2025	106.6	4,870.8	1,623.6	0.1
Estero Colina Bajo	Vegetación Dispersa	1989	1,361.3	17,781.4	135.7	0.4
Estero Colina Bajo	Vegetación Dispersa	1998	1,507.3	27,528.2	69.5	0.8
Estero Colina Bajo	Vegetación Dispersa	2003	2,008.6	29,224.7	144.0	0.4
Estero Colina Bajo	Vegetación Dispersa	2007	1,947.5	29,038.7	125.7	0.4
Estero Colina Bajo	Vegetación Dispersa	2016	1,057.8	29,266.5	385.1	0.3
Estero Colina Bajo	Vegetación Dispersa	2025	1,029.8	23,124.4	226.7	0.2
Estero Lampa	Vegetación Dispersa	1989	2,348.5	21,349.8	40.7	0.6
Estero Lampa	Vegetación Dispersa	1998	1,996.7	31,529.3	94.1	0.4
Estero Lampa	Vegetación Dispersa	2003	2,113.6	31,659.7	127.1	0.4
Estero Lampa	Vegetación Dispersa	2007	1,921.8	32,546.5	178.8	0.4
Estero Lampa	Vegetación Dispersa	2016	1,114.4	30,657.6	638.7	0.3
Estero Lampa	Vegetación Dispersa	2025	1,251.6	28,646.5	231.0	0.3
Estero Til-Til	Vegetación Dispersa	1989	2,278.5	21,047.0	58.1	0.5
Estero Til-Til	Vegetación Dispersa	1998	1,370.8	26,736.6	163.0	0.4
Estero Til-Til	Vegetación Dispersa	2003	1,328.5	26,518.0	208.8	0.4
Estero Til-Til	Vegetación Dispersa	2007	1,150.6	27,607.6	284.6	0.4
Estero Til-Til	Vegetación Dispersa	2016	770.0	26,098.5	966.6	0.3
Estero Til-Til	Vegetación Dispersa	2025	887.3	26,421.5	480.4	0.3

