



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar
bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la
subcuenca del río Birrís, Costa Rica

por

Fermín Vargas Cabezas

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

Magister Scientiae en Manejo Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2010

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

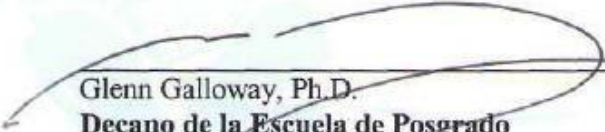
FIRMANTES:

Francisco Jiménez, Dr.Sc.
Consejero Principal


Jorge Faustino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Sergio Velásquez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Federico Gómez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Fermín Vargas Cabezas
Candidato

DEDICATORIA

*A mi madre y
en memoria al legado de mi padre*

*A Dios,
por bendecirme con las mejores oportunidades en mi vida
y brindarme sabiduría para la toma de mis decisiones.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios padre, por darme la fortaleza y serenidad para lograr esta meta.

A mis padres que me enseñaron a soñar, proyectar, visualizar y alcanzar mis metas personales en todos los aspectos de mi vida, entendiendo que nada es imposible y todo puede lograrse con dedicación, amor y sabiduría.

A mi hermano Vicente, por su apoyo permanente e incondicional a lo largo de estos 8 años de formación profesional.

A mi profesor consejero Francisco Jiménez, por sus conocimientos brindados, orientación, confianza brindada y apoyo permanente en la realización de este trabajo y durante toda la maestría.

A mis profesores consejeros Jorge Faustino, Sergio Velásquez y Federico Gómez, por todas las orientaciones y el apoyo brindando en este estudio.

A todos y cada uno de los expertos que consulte para esta investigación, por regalarme su tiempo y sus aportes tan valiosos.

A la Organización de los Estados Americanos (OEA) por el financiamiento, haciendo posible que culminara mis estudios de *Magister Scientiae* en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas.

A todos mis amigos (as) y compañeros (as) de maestría y promoción, por apoyarme siempre con su amistad, solidaridad y aportes a lo largo de la maestría.

Al CATIE y a todos quienes trabajan en esta prestigiosa institución.

Muchas muchísimas Gracias!!!!!!

BIOGRAFÍA

El autor nació en Chuquisaca, Bolivia el 04 de abril de 1982. A partir de 1984 reside en el Departamento de Santa Cruz, cuna de su formación escolar y universitaria. Se graduó por excelencia en la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM) en 2007, en la Facultad de Ciencias Agrícolas como Ingeniero Forestal, obteniendo la mejor calificación de los egresados de la promoción. Durante el año 2007 - 2008 prestó servicios para la Superintendencia Forestal, ahora Autoridad de Bosques y Tierras (ABT) y en 2009 ingresó a la Escuela de Posgrado en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica, en la Maestría de Manejo Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, concluyendo su formación como *Magister Scientiae* en diciembre de 2010.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA.....	V
RESUMEN	X
SUMMARY	XI
ÍNDICE DE CUADROS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XVI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos del estudio.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos y preguntas de investigación</i>	3
2. MARCO REFERENCIAL.....	5
2.1 La erosión, la erosión hídrica y sus efectos	5
2.1.1 <i>El fenómeno de la erosión</i>	5
2.1.2 <i>La erosión hídrica</i>	5
2.1.2.1 Bases hidrológicas de la erosión.....	5
2.1.2.2 Flujo superficial o escorrentía	6
2.1.3 <i>Tipos de erosión hídrica</i>	7
2.1.3.1 Erosión laminar	7
2.1.3.2 Erosión en regueros o surcos	7
2.1.3.3 Erosión en cárcavas	8
2.1.3.4 Erosión por desprendimientos o deslizamientos	8
2.1.4 <i>Factores que intervienen en la erosión causada por el agua</i>	8
2.1.4.1 Lluvia.....	9
2.1.4.2 Pendiente	9
2.1.4.3 Suelo	9
2.1.4.4 Cobertura vegetal.....	10
2.1.4.5 Actividad humana.....	10
2.1.5 <i>Efectos de la erosión hídrica</i>	11
2.2 La ecuación universal de pérdida del suelo (USLE).....	11
2.2.1 <i>Valor A “pérdida de suelo”</i>	12
2.2.2 <i>Factor R “lluvia y escorrentía”</i>	13
2.2.3 <i>Factor K “erodabilidad del suelo”</i>	13
2.2.4 <i>Factor LS “topografía”</i>	16
2.2.5 <i>Factor C “manejo y cobertura del suelo”</i>	17
2.2.6 <i>Factor P “método de control de erosión”</i>	19
2.3 Modelos de erosión	19

2.4	Modelo CALSITE como herramienta de análisis.....	21
2.4.1	<i>Caracterización del CALSITE</i>	21
2.4.2	<i>Justificación para la elección del CALSITE</i>	22
2.5	Estimación de la erosión en Costa Rica.....	23
2.6	Carbono orgánico en el suelo.....	24
2.6.1	<i>El ciclo terrestre del carbono</i>	25
2.6.2	<i>Los suelos y el secuestro de carbono</i>	26
2.6.3	<i>Pérdida de carbono orgánico del suelo por erosión hídrica</i>	28
2.6.4	<i>Labranza y la dinámica del carbono del suelo</i>	29
2.7	Pago por servicios ambientales: fijación y almacenamiento de carbono en suelos..	31
3.	METODOLOGÍA.....	35
3.1	Descripción del área de estudio “Subcuenca río Birrís”	35
3.1.1	<i>Localización</i>	35
3.1.2	<i>Geología</i>	36
3.1.3	<i>Red hidrográfica</i>	37
3.1.4	<i>Clima</i>	38
3.1.5	<i>Tipo de suelo</i>	38
3.1.6	<i>Uso del suelo y sistemas de producción</i>	39
3.1.7	<i>Población</i>	40
3.2	Recolección y análisis de la información	40
3.2.1	<i>Planteamiento de escenarios de producción hortícola y ganadera</i>	40
3.2.2	<i>Estimación de la erosión potencial y sedimento en diferentes escenarios</i>	42
3.2.2.1	Alimentación del programa.....	42
3.2.2.2	Modelización con CALSITE.....	47
3.2.2.3	Calibración y estimación de sedimento.....	51
3.2.3	<i>Estimación de la pérdida de COS por erosión potencial y sedimento en diferentes escenarios</i>	52
3.2.3.1	Marco muestral.....	53
3.2.3.2	Estimación del COS en laboratorio.....	55
3.2.3.3	Estimación del contenido, pérdida y retención de COS.....	55
3.2.4	<i>Estimación del valor económico del COS que se dejaría y se deja de perder por erosión potencial y sedimento respectivamente, en diferentes escenarios</i>	57
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1	Uso de suelo de los escenarios de producción hortícola y ganadera	60
4.1.1	<i>Escenario base 1_1: uso de suelo actual</i>	60
4.1.2	<i>Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero</i>	62
4.1.3	<i>Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero</i>	64
4.1.4	<i>Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo</i>	66
4.1.5	<i>Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo</i>	68
4.1.6	<i>Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles</i>	70
4.2	Erosión potencial y sedimentos	72

4.2.1	<i>Suelo que podría perderse por erosión potencial</i>	72
4.2.1.1	Escenario base 1_1: uso de suelo actual.....	72
4.2.1.2	Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero.....	75
4.2.1.3	Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero	78
4.2.1.4	Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo	80
4.2.1.5	Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo	82
4.2.1.6	Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles	85
4.2.2	<i>Suelo perdido por sedimento</i>	88
4.2.2.1	Escenario base 1_1: uso de suelo actual.....	88
4.2.2.2	Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero.....	91
4.2.2.3	Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero	94
4.2.2.4	Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo	97
4.2.2.5	Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo	100
4.2.2.6	Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles	103
4.3	<i>Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial</i>	106
4.3.1	<i>Escenario base 1_1: uso de suelo actual</i>	106
4.3.2	<i>Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero</i>	108
4.3.3	<i>Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero</i>	110
4.3.4	<i>Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo</i>	111
4.3.5	<i>Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo</i>	112
4.3.6	<i>Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles</i>	114
4.4	<i>Pérdida económica del COS por sedimento y erosión potencial</i>	115
4.4.1	<i>Escenario base 1_1: uso de suelo actual</i>	116
4.4.2	<i>Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero</i>	118
4.4.3	<i>Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero</i>	120
4.4.4	<i>Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo</i>	121
4.4.5	<i>Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo</i>	122
4.4.6	<i>Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles</i>	124
4.5	<i>Resumen de resultados</i>	126
4.5.1	<i>Erosión potencial y producción de sedimentos por escenarios</i>	126
4.5.2	<i>Erosión potencial y producción de sedimentos por usos de suelos</i>	127
4.5.3	<i>Pérdida de COS por erosión potencial y sedimentos</i>	128
4.5.3.1	Retención o almacenamiento de COS	129
4.5.4	<i>Pérdida económica de COS por erosión potencial y sedimentos</i>	130
4.5.4.1	Retención o almacenamiento económico de COS.....	131
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
5.1	Conclusiones	133
5.2	Recomendaciones	135

6.	LITERATURA CITADA	136
7.	ANEXOS	141

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue determinar el efecto de los sistemas de producción hortícola y ganadera en el almacenamiento de carbono en el suelo, mediante la simulación de escenarios de erosión del suelo, como base para un posible esquema de pago por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono en el suelo, en la subcuenca del río Birrís de Costa Rica. Para emprender esta investigación, primeramente se definió los escenarios con base a dos usos de suelos: cultivos y potreros. Una vez determinados los escenarios, con el modelo CALSITE – USLE, se realizó la estimación de la erosión potencial y sedimentos a nivel subcuenca y por usos de suelos, para luego estimar las pérdidas de COS y correspondiente valoración económica.

El uso de suelos cultivos, en el escenario base, cubre 33% del área de la subcuenca, pero representa cerca del 92% de la erosión potencial de toda la misma, que el promedio es de 68 t/ha/año; en dicho uso, la erosión potencial es de 190 t/ha/año. Mientras tanto el uso de suelo pastos (ganadería), presenta una erosión potencial de solamente 7 t/ha/año. La sedimentación en este mismo escenario base, es de 49 t/ha/año (71% de la erosión potencial).

El 28% de la subcuenca en el escenario base, presenta erosión potencial con categoría de severa (50-200 t/ha/año) o muy severa (>200 t/ha/año) y está asociada al uso del suelo cultivos.

Los escenarios simulados que conllevan un incremento del área de cultivos (potrero a cultivos y cultivo - pasto a cultivo), incrementarían la erosión potencial (en 57 y 33%, respectivamente) y la sedimentación (en 77 y 40%, respectivamente), con respecto al escenario base (uso actual del suelo). Contrariamente, los escenarios simulados que conllevan a un incremento del área de potreros (cultivo a potreros y cultivo - pasto a potreros), reducirían la erosión potencial (en 88 y 3%, respectivamente) y la sedimentación (en 86 y 4%, respectivamente).

La conversión de los usos del suelo pasto a sistemas silvopastoriles y cultivos a sistemas agroforestales, sería una buena opción para reducir la erosión potencial en 70% y la producción de sedimentos en 69%, con referencia al escenario base, a nivel de la subcuenca. A nivel usos, la conversión del uso del suelo cultivos a sistemas agroforestales, disminuiría la erosión y sedimentación en la subcuenca, ya que ambas variables se reducirían en 74%, con respecto al escenario base. De igual modo la conversión del uso del suelo potrero a sistemas silvopastoriles, reduciría la erosión y sedimentación en 84%, con respecto al escenario base.

En la misma proporción en porcentaje de disminución de la erosión potencial y sedimento, se disminuyen también las pérdidas de COS. Entonces, los productores que opten por sistemas silvopastoriles, sistemas agroforestales y potreros (ganadería), tendrían la mayor retención o almacenamiento de COS y por lo tanto, deberían de recibir un mayor incentivo económico por este servicio ambiental.

Palabras clave: escenarios, erosión potencial, sedimentos, carbono orgánico del suelo (COS), pérdida, que se podría perder, retención o almacenamiento, que se podría retener, estimación o valoración económica.

SUMMARY

The main objective of this study was to determine the impact of horticultural production systems and livestock production in carbon storage in soil, by simulating soil erosion scenarios as a basis for a possible scheme of payment for environmental service carbon storage in the soil of the Birris River Basin in Costa Rica. To undertake this research, I first defined scenarios based on two uses of soils, crops and pastures. Once certain scenarios were determined, the model CALSITE - USLE was performed to estimate the potential erosion and sediment throughout the watershed and land uses, and then estimate the corresponding loss of SOC and economic assessment.

Crop land use in the baseline scenario cover 33% of the watershed area but represents about 92% of the potential erosion of the same area. the average is 68 t/ha/year in this application, the potential erosion is 190 t/ha/year. Meanwhile, pasture land use (livestock), presents a potential erosion of only 7 t/ha/year. Sedimentation in this baseline scenario, is 49 t/ha/year (71% of the potential erosion).

Twenty-eight per cent of the watershed in the baseline scenario presents a potential erosion of the severe (50-200 t/ha/year) or very severe (> 200 t/ha/year) category and is associated with land-use crops.

The simulated scenarios involving an increase in crop area (pasture crops and crop - pasture to crop), would increase the erosion potential (at 57 and 33% respectively) and sedimentation (at 77 and 40%, respectively), benchmark scenario (current land use). Conversely, the simulated scenarios that lead to an increased area of pastures (pastures and crop cultivation - pasture to pasture), reduce erosion potential (at 88 and 3% respectively) and sedimentation (at 86 and 4% respectively).

The conversion of pasture land use systems and crop silvopastoral agroforestry systems would be a good option for reducing erosion potential in 70% and sediment yield 69%, with regard to the baseline scenario and basin. In terms of its uses, conversion of land use agroforestry crops would decrease erosion and sedimentation in the basin, since both variables would be reduced by 74% compared to the baseline scenario. Similarly, use of conversion pasture land for silvopastoral systems, would reduce erosion and sedimentation by 84% compared to the baseline scenario.

In the same percentage proportion decrease in potential erosion and sediment, the wastage of SOC would be reduced. Then, farmers who choose to use silvopastoral systems, agroforestry systems and pastures (cattle), have greater retention or storage of SOC and therefore should receive a greater economic incentive for this environmental service.

Keywords: scenarios, potential erosion, sediment, soil organic carbon (SOC), loss, you might lose, holding or storage, which could retain, economic valuation.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de los factores de la USLE.....	11
Cuadro 2. Factor P para distintas práctica de conservación y manejo.....	19
Cuadro 3. Volumen transado en Mt CO ₂ eq y precio promedio en US\$/t CO ₂ eq, en 2009.	33
Cuadro 4. Coordenadas UTM y geográficas de la subcuenca del río Birrís (Marchamalo, 2004).....	35
Cuadro 5. Red de drenaje de la subcuenca del río Birrís, afluentes y altitud de nacimientos (entre paréntesis).....	37
Cuadro 6. Variables climáticas de la subcuenca del río Birrís (Otárola 2007 citado en Lianes 2008).....	38
Cuadro 7. Comunidades en la subcuenca del río Birrís, número de habitantes, extensión y población (hab/km ²) (Otárola 2007 citado en Lianes 2008).....	40
Cuadro 8. Escenarios de producción hortícola y ganadera.....	41
Cuadro 9. Valores del factor C para la subcuenca del río Birrís.....	45
Cuadro 10. Valores de referencia χ^2	52
Cuadro 11. Procedimiento para la estimación del número de muestras.....	53
Cuadro 12. Número de muestras tomadas en función de la pendiente del relieve.....	54
Cuadro 13. Porcentaje COS por cobertura.....	56
Cuadro 14. Precio promedio en US\$/t CO ₂ eq, en 2009.....	58
Cuadro 15. Uso de suelos y áreas del escenario 1_1.....	60
Cuadro 16. Uso de suelos y áreas del escenario 1_2.....	62
Cuadro 17. Uso de suelos y áreas del escenario 1_3.....	64
Cuadro 18. Uso de suelos y áreas del escenario 1_4.....	66
Cuadro 19. Uso de suelos y áreas del escenario 1_5.....	68
Cuadro 20. Uso de suelos y áreas del escenario 1_6.....	70
Cuadro 21. Erosión potencial en el escenario 1_1.....	73
Cuadro 22. Rango de erosión potencial en el escenario 1_1.....	73
Cuadro 23. Erosión potencial en el escenario 1_2.....	75
Cuadro 24. Rango de erosión potencial en el escenario 1_2.....	75
Cuadro 25. Erosión potencial en el escenario 1_3.....	78
Cuadro 26. Rango de erosión potencial en el escenario 1_3.....	78
Cuadro 27. Erosión potencial en el escenario 1_4.....	80
Cuadro 28. Rango de erosión potencial en el escenario 1_4.....	80
Cuadro 29. Erosión potencial en el escenario 1_5.....	82
Cuadro 30. Rango de erosión potencial en el escenario 1_5.....	82
Cuadro 31. Erosión potencial en el escenario 1_6.....	85
Cuadro 32. Rango de erosión potencial en el escenario 1_6.....	85
Cuadro 33. Pérdida de sedimento en el escenario 1_1.....	89
Cuadro 34. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_1.....	89
Cuadro 35. Pérdida de sedimento en el escenario 1_2.....	91
Cuadro 36. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_2.....	91
Cuadro 37. Pérdida de sedimento en el escenario 1_3.....	94

Cuadro 38. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_3.....	94
Cuadro 39. Pérdida de sedimento en el escenario 1_4.	97
Cuadro 40. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_4.....	97
Cuadro 41. Pérdida de sedimento en el escenario 1_5.	100
Cuadro 42. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_5.....	100
Cuadro 43. Pérdida de sedimento en el escenario 1_6.	103
Cuadro 44. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_6.....	103
Cuadro 45. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.....	107
Cuadro 46. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.....	109
Cuadro 47. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.....	110
Cuadro 48. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.....	111
Cuadro 49. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5.....	113
Cuadro 50. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.....	114
Cuadro 51. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.	117
Cuadro 52. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.	119
Cuadro 53. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.	120
Cuadro 54. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.	121
Cuadro 55. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5.	123
Cuadro 56. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.	125
Cuadro 57. Estimación de la erosión potencial y producción de sedimentos en cada escenario.	127
Cuadro 58. Riesgo de pérdida de suelos por escenarios.....	127
Cuadro 59. Estimación de la erosión potencial y sedimentos por usos de suelos en cada escenario.	128
Cuadro 60. Pérdida de COS por erosión potencial y sedimentos.....	129
Cuadro 61. Retención o almacenamiento de COS.....	130
Cuadro 62. Pérdida económica de COS.....	131
Cuadro 63. Retención o almacenamiento económico de COS.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conductividad hidráulica a saturación (cm/h).....	15
Figura 2. Nomograma para determinar el valor de K (unidades métricas) de erosionabilidad del suelo en la USLE (según Wischmeier, Johnson y Cross 1971). Dividir los valores por 1,3 para obtener el valor de K en unidades originales americanas.	16
Figura 3. Factor y longitud de pendiente.	16
Figura 4. Aumento de la erosión en función del tipo de cobertura bajo condiciones análogas de capacidad de uso de la tierra.	17
Figura 5. Influencia de la cubierta vegetal de altura en el factor EI efectivo.	18
Figura 6. Diagrama de flujo para modelizar los procesos de erosión hídrica (según Meyer y Wischmmier 1969).....	20
Figura 7. Principales depósitos y flujos del balance global del carbono	24
Figura 8. Balance terrestre global del carbono (simplificado).....	26
Figura 9. Balance del carbono del suelo.	27
Figura 10. Procesos del suelo afectado por la erosión acelerada, la redistribución y sitios de deposición.	29
Figura 11. Cambios en el carbono orgánico del suelo inducidos por perturbación y posterior reacumulación por aplicación de manejo de conservación. Modificado de Johnson, 1995.	31
Figura 12. Principales beneficios del manejo sostenible del carbono del suelo en varias escalas espaciales (de Izac 1997).	31
Figura 13. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Birrís en Costa Rica.....	35
Figura 14. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Birrís (4838.68 ha) en la cuenca alta del río Reventazón (153 100,85 ha).....	36
Figura 15. Diagrama de flujo de rutinas del programa CALSITE.....	48
Figura 16. Diagrama de flujo de CALSITE.....	51
Figura 17. Finca de producción (hortícola o ganadera) para muestreo de COS.	55
Figura 18. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_1.....	61
Figura 19. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_2.....	63
Figura 20. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_3.....	65
Figura 21. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_4.....	67
Figura 22. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_5.....	69
Figura 23. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_6.....	71
Figura 24. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_1.	74
Figura 25. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_2.	77
Figura 26. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_3.	79
Figura 27. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_4.	81
Figura 28. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_5.	84
Figura 29. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_6.	87
Figura 30. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida de suelos: Escenario 1_1.	90
Figura 31. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_2.....	93

Figura 32. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_3.	96
Figura 33. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_4.	99
Figura 34. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_5.	102
Figura 35. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_6.	105
Figura 36. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1. ...	108
Figura 37. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2. ...	109
Figura 38. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3. ...	111
Figura 39. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4. ...	112
Figura 40. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5. ...	113
Figura 41. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6. ...	115
Figura 42. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.	118
Figura 43. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.	119
Figura 44. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.	121
Figura 45. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.	122
Figura 46. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5.	124
Figura 47. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.	126

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ASA	: Asociaciones Administradoras de Acueductos
CALCITE	: Calibrated Simulation of Transported Erosion
CATIE	: Centro Agrícola Tropical de Investigación y Enseñanza
CCX	: Chicago Climate Exchange
CIFOR	: Center for International Forestry Research
CO ₂	: Dióxido de Carbono
COP	: Conferencia de las Partes
COS	: Carbono Orgánico del Suelo
CP	: Constitución Política
DI	: Delivery Index
DQO	: Demanda Química de Oxígeno
DR	: Delivery Ratio
Eq	: Equivalente (1t de C=3,67 tCO ₂ eq)
EU ETS	: European Union Emission Trading Scheme (United Kingdom)
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FONAFIFO	: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
GtC	: Gigatoneladas de carbono
ICE	: Instituto Costarricense de Electricidad
IPCC	: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
JASEC	: Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago
LUT	: Look Up Table
MAG	: Ministerio de Agricultura y Ganadería
MDL	: Mecanismo de Desarrollo Limpio
MED	: Modelo de Elevación Digital
MINAE	: Ministerio del Ambiente y Energía
MO	: Materia Orgánica
Mt	: Millones de toneladas
NPP	: Net Primary Productivity
OEA	: Organización de Estados Americanos
OTC	: Over the Counter (market)
Pg	: Petagram (1Pg = 10 ¹⁵ g = 1 000 000 000 t =1Gt)
PNB	: Productividad Neta del Bioma
PNE	: Productividad Neta del Ecosistema
PPB	: Productividad Primaria Bruta
PPM	: Parte Por Millón (1ppm ≡ 1 x 10 ⁻⁶)
PSA	: Pago por Servicios Ambientales
REDD	: Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation
RMP	: Recommended Management Practices

RUSLE	:	Revised Universal Soil Loss Equation
SCS	:	Soil Conservation Service
SIG	:	Geographical Information System
SINAC	:	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
TRAGSA	:	Empresa de Transformación Agraria
TRAGSATEC	:	Tecnología y Servicios Agrarios SA
UMCRE	:	Unidad de Manejo de Cuenca del Río Reventazón
UNFCC	:	Convención Marco sobre Cambio Climático de Naciones Unidas
USLE	:	Universal Soil Loss Equation
VCS	:	Voluntary Carbon Standard

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El incremento en la atmósfera de los gases de efecto invernadero (GEI) y el consecuente cambio climático tendrán efectos importantes en el siglo XXI. Si bien los escenarios exactos todavía son inciertos, son de esperar serios efectos negativos y también algunos efectos positivos, por lo que es esencial que se tomen medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para incrementar su captura en los suelos y en la biomasa. Para ello, deben ser desarrolladas nuevas estrategias y políticas apropiadas para el manejo de la agricultura, tierras de pastoreo y los bosques. Una opción se basa en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas terrestres, principalmente en las tierras usadas para la agricultura o la forestación (IPCC 2000).

Los suelos han acumulado y almacenado carbono en forma de materia orgánica durante miles de años. La materia orgánica preserva los nutrientes, retiene el agua y ayuda a proteger los suelos contra la erosión. Sin embargo, el carbono del suelo es sumamente vulnerable a los cambios en las condiciones del medio ambiente, tales como el clima, la vegetación y el uso de la tierra. La conservación de carbono del suelo contribuye a satisfacer nuestras necesidades de alimentos y fibras ante el cambio climático. El uso de las tierras ha disminuido el carbono presente en el suelo y ha reducido la calidad de la materia orgánica (Freibauer 2009).

El manejo agrícola convencional de suelos, con uso intensivo del arado, promueve la liberación de carbono (C) hacia la atmósfera, mientras que el uso conservacionista favorece la acumulación de C en formas orgánicas dentro del suelo. El Carbono Orgánico del Suelo (COS) favorece la agregación del suelo y consecuentemente interviene en la distribución del espacio poroso del suelo, afectando diversas propiedades físicas, como humedad aprovechable, capacidad de aire y movimiento de agua y gases en el suelo (Martínez et ál. 2008).

La subcuenca del río Birrís se caracteriza por ser entre las más importantes para JASEC (Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago) y entre las priorizadas por el ICE para su programa de manejo integrado de cuencas (ICE 2000). El alto conflicto de uso de la tierra que caracteriza esa subcuenca por su vocación forestal y su actual uso productivo de la tierra, orientado a agricultura y ganadería, hace que sea de alta prioridad para la implementación de esquemas de manejo sostenible de tierras. El actual esquema de pago por servicios ambientales en su rubro de protección de cuenca enfoca en el rol de los árboles, su principal acción (Vignola et ál. S/F).

Paralelamente al aprovechamiento hidroeléctrico, la subcuenca del río Birrís presenta una importante actividad agropecuaria. Esta actividad produce impactos sobre las aguas, en términos de alteraciones de la respuesta hidrológica de las tierras, erosión-sedimentación y contaminación orgánica y por agroquímicos.

1.2 Justificación

De acuerdo a Freibauer (2009) una vez que se produce la pérdida de carbono, su captación en el suelo presenta muchas limitaciones prácticas, como son: competencia por los residuos orgánicos disponibles, la capacidad de los suelos para almacenar carbono a largo plazo y un alto riesgo de que el carbono retenido se pierda de nuevo, al modificarse la gestión de los suelos. También menciona que la emisión de carbono procedente del suelo es más rápida que su absorción y el carbono orgánico joven del suelo es más vulnerable al cambio, que el carbono más antiguo. Por este motivo, resulta más eficaz la conservación de las importantes reservas de carbono ya existentes en los ecosistemas, que la captación de nuevo carbono adicional.

La conservación de suelos representa, junto con la mano de obra familiar, los recursos de producción más importantes con que cuenta el pequeño productor. El recurso suelo se vuelve sensiblemente más importante en la producción orgánica porque en su manejo ya no se le considera como únicamente materia, sino por el contrario, se trata de un “organismo vivo” y requiere por tanto, todos los cuidados y consideraciones necesarias para su utilización desde un punto de vista sostenible (Quiróz 2002).

Según la FAO (2002), existen ciertas prácticas agrícolas y ganaderas que son conocidas por su estímulo a la acumulación adicional de carbono en el suelo, con el consecuente mejoramiento de su fertilidad y efecto positivo sobre el ambiente. Menciona también la FAO (2007a) que conforme los servicios ambientales proporcionados por los sistemas de la cuenca se hacen más escasos, los beneficiarios de estos están comenzando a reconocer su valor y están dispuestos a invertir para que se sigan suministrando; se puede señalar como uno de los principales servicios, la fijación de carbono.

Al nivel internacional existen acuerdos que regulan la emisión CO_2 , como es el Protocolo de Kyoto. Este acuerdo reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas, ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero, o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera, gracias a los sumideros. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO_2 . Dentro del contexto del Protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el almacenamiento de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero (FAO 2002).

Uno de ellos son los mecanismos de pago de servicios ambientales que han surgido en los últimos años, como una opción muy importante para el financiamiento de la protección, conservación y reforestación, pero también del recurso hídrico en las cuencas, principalmente las abastecedoras de agua. Sin embargo, estos mecanismos se han desarrollado principalmente asociados a coberturas boscosas. Existe consenso entre muchos investigadores y decisores, de la importancia y necesidad de incluir a los sistemas de producción agrícola y ganadera dentro de los esquemas prioritarios de generación y de pago de servicios ambientales, ya que las

tierras más degradadas generalmente son las agrícolas y las dedicadas a la ganadería (FAO 2002).

En investigaciones recientes se menciona que la subcuenca del río Birrís presenta una alta cantidad e intensidad de lluvias, lo que aunado a las condiciones de fuertes pendientes y actividad agrícola y pecuaria intensiva y extensiva, sin prácticas adecuadas de producción, genera tasas elevadas de erosión del suelo. Marchamalo (2004) estimó una erosión promedio de 42 t/ha/año, lo cual totaliza 201 672 t/año, para toda la subcuenca.

Estas pérdidas de suelo llevan implícitas grandes pérdidas de nutrientes que agotan su fertilidad, aumentan los costos de producción, la dependencia de insumos externos, la degradación de los recursos naturales, tiene grandes implicaciones económicas por la sedimentación de embalses y la reducción de la producción hidroeléctrica, entre otros muchos factores. Uno de los efectos directos de la erosión es la pérdida de la materia orgánica y con ello, de la reserva de carbono del suelo. Este es hoy día un tema relevante a nivel mundial, por la importancia de la fijación y almacenamiento de carbono como vía para reducir el calentamiento global y el cambio climático.

Sin embargo, existen pocos estudios de investigación que permitan determinar cuál es la contribución de diferentes sistemas de producción agrícola y ganadera a la generación de servicios ambientales, bajo diferentes escenarios de manejo de los cultivos o la ganadería, pendiente del terreno, características de los suelos, cantidad e intensidad de lluvia, prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas, diferentes usos de la tierra. En estos sistemas, el servicio ambiental más importante que se ve afectado es el almacenamiento y fijación de carbono, puesto que la erosión del suelo, y con ello de la materia orgánica afecta, el principal reservorio de carbono de la tierra, que está mayoritariamente en el suelo y en menor proporción en la cobertura vegetal.

La utilización de modelos permite visualizar los factores que tienen influencia en el comportamiento de un sistema. Además hoy en día los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos detallados de predicción de erosión, son herramientas que aumentan nuestra capacidad para tomar decisiones en la planificación de los recursos naturales en las cuencas. Uno de ellos es el *Calibrated Simulation of Transported Erosion CALSITE*, que utiliza la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE), que es una herramienta muy práctica y está calibrada en la subcuenca del río Birrís.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Determinar el efecto de sistemas de producción hortícola y ganadera en la pérdida de carbono en el suelo, por erosión potencial y sedimentación, como base para un posible mecanismo de compensación por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono.

1.3.2 Objetivos específicos y preguntas de investigación

- 1) Proponer escenarios de producción hortícola y ganadera para simular las pérdidas de suelo por erosión hídrica laminar, utilizando la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE) y el modelo CALSITE.

- a) De acuerdo a las características biofísicas de la subcuenca y productivas de los cultivos hortícolas ¿cuáles serían escenarios que representan de manera típica características de esos sistemas de producción?
 - b) De acuerdo a las características biofísicas de la subcuenca y productivas de la actividad ganadera ¿cuáles serían escenarios que representan de manera típica características de esos sistemas de producción?
- 2) Estimar la erosión hídrica laminar y de sedimentos en cada uno de los escenarios de producción hortícola y ganadera a nivel de subcuenca.
- a) ¿Cuál es la cantidad de suelo que se podría perder por erosión potencial en los diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera simulados?
 - b) ¿Cuál es la cantidad de suelo que se pierde por sedimento en los diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera simulados?
- 3) Estimar para los usos del suelo: cultivos hortícolas y potreros, la pérdida de carbono por erosión potencial hídrica laminar y sedimento.
- a) ¿Cuál es la cantidad de carbono del suelo que se dejaría de perder por erosión potencial en la subcuenca bajo diferentes áreas relativas de uso del suelo en producción hortícola y ganadera?
 - b) ¿Cuál es la cantidad de carbono del suelo que se deja de perder por sedimento en la subcuenca bajo diferentes áreas relativas de uso del suelo en producción hortícola y ganadera?
- 4) Estimar el valor económico del carbono que se pierde y se deja de perder en el suelo, como base para un posible mecanismo de compensación por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono.
- a) ¿Cuál es el monto económico del carbono que se perdería y se pierde bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera?.
 - b) ¿Cuál es el monto económico del carbono que se dejaría y se deja de perder bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera y de compensación económica que deberían recibir los productores por la utilización de sistemas que tienen menos impacto en la degradación del suelo?.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 La erosión, la erosión hídrica y sus efectos

2.1.1 *El fenómeno de la erosión*

La erosión es un proceso de desgaste mecánico del suelo, generalmente lento, causado por algún agente físico que puede ser el viento o el agua. Las partículas segregadas continúan su proceso de disociación y son transportadas, ya sea por los mismos agentes que las liberaron, o por otros (Gómez Delgado 2002).

Las causas de la erosión del suelo son todavía poco conocidas. Aunque numerosas investigaciones, especialmente desde 1940, han dado como resultado un mejor conocimiento de los procesos mecánicos de la erosión y su relación con el medio físico, sólo actualmente se han abordado investigaciones sistemáticas sobre los factores sociales, económicos, políticos e institucionales que actúan donde y cuando se produce la erosión (Morgan 2007).

De acuerdo a Cubero (1996) la erosión del suelo es un proceso con dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase: su deposición.

La salpicadura es el agente más importante para el desprendimiento. Como resultado del golpeteo de las gotas de lluvia sobre la superficie de un suelo desnudo, las partículas del mismo pueden ser lanzadas por los aires a varios centímetros de distancia. La exposición continua a lluvias intensas debilita considerablemente el suelo. El suelo también se disgrega por procesos de meteorización: mecánicamente (alternancia de humectación y desecación, congelación y deshielo, acción del hielo) y bioquímicamente. Además, el suelo se altera por el laboreo y el pisoteo de hombres y ganado (Morgan 1997).

2.1.2 *La erosión hídrica*

La erosión hídrica, y en especial la erosión laminar y en surcos pequeños, es la forma de erosión que más afecta la agricultura por degradación y pérdida del horizonte A de los suelos, y la producción de sedimentos en los ríos. Al perder el horizonte A, el suelo disminuye su capacidad de retención de humedad, y probablemente también su capacidad de infiltración y si esto sucede habrá mayor escurrimiento y mayor riesgo de erosión (Cubero 1996).

Una de las formas más comunes para determinar las tasas de erosión laminar y en pequeños surcos es la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), desarrollada por Wischmeier y Smith para el oeste de los Estados Unidos de América (TRAGSA 1994).

2.1.2.1 Bases hidrológicas de la erosión

Los procesos de erosión hídrica están estrechamente relacionados con las rutas que sigue el agua en su paso a través de la cobertura vegetal y su movimiento sobre la superficie del suelo. Durante una tormenta, parte del agua cae directamente sobre el suelo, bien porque no hay vegetación, o bien porque pasa a través de los huecos de la cubierta vegetal. Esta fracción

de lluvia se denomina precipitación directa. Parte de la lluvia es interceptada por la cobertura vegetal, desde donde vuelve a la atmósfera por evaporación, o llega al suelo goteada por las hojas (drenaje foliar), o fluye hacia abajo por los tallos. La precipitación directa y el drenaje foliar son responsables de la erosión por salpicadura. La lluvia que llega al suelo puede almacenarse en pequeñas depresiones u hondonadas de la superficie o puede infiltrarse en el suelo contribuyendo al contenido de humedad en el suelo o por percolación, a recargar los acuíferos. Cuando el suelo es incapaz de almacenar más agua, el exceso se desplaza lateralmente por el interior del suelo y a favor de la pendiente, como flujo subsuperficial o flujo interno, o contribuye a la escorrentía superficial provocando erosión como flujo laminar o en regueros y cárcavas (Morgan 1997).

2.1.2.2 Flujo superficial o escorrentía

El flujo superficial o escorrentía se produce en las laderas durante una tormenta cuando se supera la capacidad de almacenaje en las depresiones de la superficie y cuando, ya sea por una lluvia prolongada o por lluvias de intensidad superior a la capacidad de infiltración del suelo, se supera su capacidad de retención. Es raro que el flujo presente una forma de lámina de agua de profundidad uniforme, sino que lo más frecuente es una masa anastomosada o trenzada de cursos de agua que no tienen canales marcados (Morgan 1997).

a) Características hidráulicas

Las características hidráulicas del flujo fueron definidas por Reynolds (Re) y de Froude (F), las cuales son:

$$\text{Re} = vr/u$$
$$\text{F} = v/(gr)^{1/2}$$

Donde:

Re = índice de turbulencia del flujo

v = velocidad del flujo

r = radio hidráulico

u = viscosidad cinética del agua

F = número de Froude

g = aceleración de la gravedad

Cuanto mayor es la turbulencia, mayor es el poder erosivo generado por el flujo. Un número de Reynolds menor de 500, significa régimen laminar, y valores superiores a 2000 significan flujos totalmente turbulentos. En el régimen laminar cada capa de fluido se mueve en línea recta con velocidad uniforme y no hay mezcla entre las capas, mientras que en el régimen turbulento hay un patrón complicado de remolinos, produciéndose fluctuaciones considerables en la velocidad puntual y un continuo intercambio de agua entre las capas. Los valores intermedios indican un flujo transitorio o flujo alterado, frecuentemente como consecuencia de turbulencias ocasionadas en el flujo laminar por impacto de la lluvia (Emmett 1970 citado en Morgan 1997).

El número de Froude (F) es un índice de la formación de olas en el flujo. Cuando el número de Froude es menor de 1,0, no se forman olas y el flujo siendo relativamente tranquilo, se denomina tranquilo o subcrítico. Números de Froude mayores que 1,0 denotan

flujos rápidos o supercríticos, caracterizados por olas con mayor poder erosivo y si el número de Froude es igual a 1,0 el flujo se denomina crítico (Morgan 1997).

b) Desprendimiento de partículas del suelo por el flujo

El factor principal en estas relaciones hidráulicas es la velocidad del flujo. Debido a la resistencia propia del suelo, la velocidad debe alcanzar umbral antes de que se inicie la erosión. Básicamente, el desprendimiento de una partícula de la masa del suelo se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo son superiores a las que mantienen la partícula unida al resto (Morgan 1997).

2.1.3 Tipos de erosión hídrica

La erosión hídrica constituye la mayor fuente de erosión en el mundo. En la erosión hídrica se dan los siguientes fenómenos:

- Erosión laminar
- Erosión en regueros o surcos
- Erosión en cárcavas
- Erosión por desprendimientos o deslizamientos

2.1.3.1 Erosión laminar

De acuerdo a Vahrson (1991a), la erosión laminar está directamente relacionada con la salpicadura de la lluvia, a lo que se puede agregar que en laderas más de la mitad de la salpicadura desciende por la misma. Si esta corriente se mantiene como una delgada lámina, el tipo de erosión que produce se conoce como erosión laminar. La erosión laminar y en surcos pequeños, es la forma de erosión que más afecta la agricultura por degradación y pérdida del horizonte A de los suelos, y a la vez afecta más significativamente a la producción de sedimentos en los ríos.

Es posible reconocer este fenómeno al observar manchas claras en el suelo, en las cuales se nota la pérdida de la capa superior que, por poseer generalmente mayor contenido de materia orgánica, es de color más oscuro. También revelan erosión laminar la presencia de plantas con las raíces al descubierto, la existencia de montículos de suelo, plantas específicas de suelos degradados y piedras en la superficie de naturaleza litológica, análogas a las localizadas en el interior del terreno (Gómez Delgado 2002).

Dependiendo de las características de las partículas de suelo: tamaño, densidad y forma, se ha estudiado el movimiento o desplazamiento que realizan, como función de la altura del flujo laminar. Se encontró que dicha altura es aproximadamente igual al diámetro de las partículas (FAO 1965).

2.1.3.2 Erosión en regueros o surcos

De acuerdo a Cubero (1996), los surcos se forman en dirección de la pendiente (hacia abajo) indicando las zonas de mayor concentración de agua. Estas acumulaciones de agua de escorrentía arrastran y transportan las partículas de suelo formando pequeñas zanjas o surcos. La formación de surcos ocurre especialmente durante aguaceros de gran intensidad, y es

propicia en zonas agrícolas con altas pendientes y suelos con elementos superficiales heterogéneos.

La erosión en surcos se caracteriza por los cauces pequeños y medianos (pueden llegar hasta el subsuelo) y su arrastre es mayor al ocasionado por la erosión laminar, pues la aceleración del agua en el surco es mayor, al estar disponible en mayores volúmenes. En este tipo de erosión el efecto de la salpicadura no es tan fundamental como el de abrasión producto del flujo de agua (Gómez Delgado 2002).

2.1.3.3 Erosión en cárcavas

Cubero (1996) menciona que este tipo de erosión se produce cuando existe mayor concentración en el escurrimiento debido a las irregularidades del terreno que permiten la conjunción de varios surcos. La erosión en cárcavas disecta tan profundamente el suelo que el terreno no puede nivelarse con instrumentos de labranza ordinarios.

Como cárcavas pueden clasificarse aquellas rutas del agua estrechas y poco profundas (0,6 a 0,9 m) o de grandes dimensiones (9 a 14 m de profundidad y 22 a 35 m de ancho). Se observan en sección transversal en forma de U (en zonas con suelos fácilmente erosionables) o V (los suelos tienen buena resistencia a la entalladura rápida, o presentan estratos cada vez más resistentes a medida que se profundiza la cárcava) (Gómez Delgado 2002).

De acuerdo a Marchamalo (2007) los factores que se consideran fundamentales en la generación de cárcavas son la cantidad de agua de escurrimiento, su velocidad y la propensión del suelo a segmentarse. El primer factor se relaciona con la extensión superficial de terreno y las características de producción de escurrimiento de este terreno. El segundo factor puede relacionarse con la capacidad de abrasión que tiene el agua según su velocidad, mientras que el tercer factor se relaciona con algunas características del suelo y subsuelo, como la consistencia relativa de los diferentes estratos, la estructura y la resistencia del suelo.

2.1.3.4 Erosión por desprendimientos o deslizamientos

De acuerdo a Gómez Delgado (2002) estos eventos se producen en forma de movimiento masivo de suelo, generalmente producto del peso del mismo cuando es saturado con agua durante una tormenta. En estos eventos las fuerzas resistentes que dan firmeza y cohesión al suelo no son suficientes para sostener el peso del bloque de suelo que, siguiendo una superficie de falla o de resistencia mínima, se desprende del resto del terreno. La erosión producto de este tipo de movimientos puede, si se presenta con cierta frecuencia, representar porcentajes significativos del total del tonelaje de material producido en una cuenca por concepto de erosión y es agudizado por el mal manejo de las laderas.

2.1.4 Factores que intervienen en la erosión causada por el agua

De acuerdo a Morgan (1997), los factores que determinan la tasa de erosión son la lluvia, la escorrentía, el viento, el suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación. La erosión y el cambio de uso del suelo están fuertemente relacionados. Las pérdidas de suelo aumentan rápidamente hasta niveles inaceptables, cuando

la tierra se usa mal. En esas condiciones, los efectos de fenómenos, tanto de magnitud moderada como alta, son muy fuertes.

2.1.4.1 Lluvia

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo, y en parte por la contribución de la lluvia a la escorrentía. Esta contribuye particularmente a la erosión por flujo superficial y en regueros, fenómenos para los que la intensidad de precipitación se considera, generalmente, la característica más importante. Tormentas de intensa y corta duración superan la capacidad de infiltración y las tormentas de larga duración y baja intensidad saturan el suelo (Morgan 1997).

2.1.4.2 Pendiente

De acuerdo a Morgan (1997) sobre una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas direcciones, mientras que en un terreno en pendiente, más partículas de suelo son salpicadas pendiente abajo que pendiente arriba, aumentando así la proporción en función de la inclinación de la pendiente. La relación entre erosión y pendiente se puede expresar por la ecuación:

$$E \propto \text{tg}^m \theta L^n$$

Donde:

E = pérdida de suelo por unidad de superficie

θ = ángulo de pendiente (°)

L = longitud de pendiente

m = exponente para la inclinación de la pendiente

n = exponente para la longitud de la pendiente

2.1.4.3 Suelo

A nivel de textura los suelos con alto contenido de limo son susceptibles a la erosión por motivo de la impermeabilización por el limo de los poros del suelo, disminuyendo la capacidad de infiltración y causando mayor escorrentía. Los suelos con alto contenido de arcilla y con baja capacidad de infiltración, son muy susceptibles a la erosión, en caso de aguaceros intensos. Los suelos arenosos tienen una gran capacidad de infiltración, absorbiendo la mayor parte del agua sin originar escorrentía superficial (Cubero 1996).

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Los factores que influyen en la tasa de infiltración son: condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, porosidad y conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el suelo (Chow et ál. 1994). De acuerdo a Gómez Delgado (2002), el contenido de humedad es un factor significativo en el proceso de infiltración, pues la capacidad de infiltración de un suelo tiende a disminuir si se da un aumento de humedad del mismo, como sucede cuando se produce una lluvia.

2.1.4.4 Cobertura vegetal

González (1998) sintetiza en cinco mecanismos, la forma en la cual la cubierta vegetal actúa contra la erosión. En primer lugar, la vegetación resta caudales de precipitación susceptible de golpear la superficie o de producir escorrentía mediante el fenómeno conocido como interceptación. En segundo lugar, la vegetación evita el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie, por lo que evita la dispersión del material y el encostramiento de la superficie. En tercer lugar, la vegetación favorece la infiltración del agua al estructurar el suelo. Como cuarto proceso de interferencia se cita el efecto que impone sobre las aguas superficiales, haciendo más difícil su concentración y restando velocidad. Y finalmente la vegetación aglutina el suelo con sus raíces.

La eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, principalmente de la altura y continuidad de la vegetación, y de la densidad de cobertura del suelo. La altura de la vegetación es importante porque las gotas de agua que caen desde 7 m pueden alcanzar más del 90% de su velocidad terminal. Más aún, las gotas de lluvia interceptadas por la cubierta pueden unirse a otras en las hojas aumentando de tamaño y haciéndose más erosivas (Morgan 1997).

De acuerdo a Elwell y Stocking (1976) citados por Morgan (1997) para una protección adecuada, al menos el 70% de la superficie debe estar cubierta, aunque también menciona que se puede obtener una protección aceptable con el 40% de suelo cubierto. Sin embargo, los efectos de la vegetación no son totalmente simples y, bajo determinadas condiciones, la erosión puede verse potenciada por la cobertura vegetal.

2.1.4.5 Actividad humana

Se manifiesta en las actividades que conllevan fenómenos como la degradación de las propiedades resistentes del suelo y el aumento de escorrentía superficial. Las prácticas inadecuadas de cultivo, la agricultura en terrenos inclinados, la deforestación, el sobrepastoreo y el mal diseño en la construcción de carreteras y caminos, entre otras obras civiles, son elementos que favorecen el fenómeno erosivo (Gómez Delgado 2002).

Debe mencionarse, como contraparte, la aplicación de todas aquellas técnicas que contribuyen al mejoramiento y protección de los suelos. Así, si se logra mejorar la capacidad de infiltración de los mismos y encauzar las aguas de escorrentía, de modo que no generen el lavado del suelo; se actúa de forma directa sobre el problema (Marchamalo 2007).

Dentro de la actividad humana se pueden citar prácticas mecánicas como las acequias de ladera, las terrazas individuales, las terrazas de huerto, prácticas agronómicas-culturales como la siembra en contorno, la rotación de cultivos, las barreras vivas y muertas y prácticas forestales-agrológicas, por ejemplo: el establecimiento de pastura con fines de protección, el manejo de vegetación natural, los sistemas agroforestales y el pastoreo sistematizado (Gutiérrez 1987). Estos sistemas de producción, favorecen la conservación de los suelos y al mismo tiempo mejoran la producción agrícola y ganadera, al aumentar la fertilidad del suelo.

2.1.5 Efectos de la erosión hídrica

Las consecuencias de la erosión del suelo se manifiestan tanto en el lugar donde se produce (*in situ*) como fuera de él (erosión difusa). Los efectos *in situ* son importantes en las tierras de uso agrícola, donde la redistribución y pérdida del suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes, llevan a la pérdida de espesor del perfil cultural y al descenso de la fertilidad. La erosión difusa, que se produce a consecuencia de la sedimentación aguas abajo o a sotavento, reducen la capacidad de transporte de ríos y acequias, aumentan el riesgo de inundaciones, ciegan los canales de riego y disminuyen la vida útil de los embalses y represas hidroeléctricas (Morgan 1997).

2.2 La ecuación universal de pérdida del suelo (USLE)

USLE es un método que utiliza seis factores: erosividad de la lluvia (R), susceptibilidad de erosión del suelo (K), largo de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P), para estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R, generalmente un año (Cuadro 1).

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Cuadro 1. Descripción de los factores de la USLE.

A	Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente toneladas (t) hectárea (ha) ⁻¹ año ⁻¹ .
R	El factor lluvia y escurrimiento, es el número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), más un factor para escurrimiento por derretimiento de nieve o aplicación de agua. El EI para una tormenta es el producto de la energía total de la tormenta (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I). Dimensionalmente (J.m ⁻² .cm.hora ⁻¹).
K	El factor susceptibilidad de erosión del suelo, es la tasa de pérdida de suelos por unidad EI para un suelo específico, medido en una porción de terreno estándar (22,13 m de largo, 9% pendiente, en barbecho y labranza continua). Dimensionalmente (t.m ² .hora/ha.J.cm).
L	El factor largo de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo de pendiente estándar (22,13 m).
S	El factor de magnitud de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los otros factores idénticos.
C	El factor cubierta y manejo, es la proporción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua.
P	El factor de prácticas de conservación, es la proporción de pérdida de suelo con una práctica de conservación como cultivo en contorno, barreras vivas, o cultivo en terrazas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente.

Fuente: FAO 1993.

La USLE fue desarrollado para:

- Predecir el movimiento promedio anual de suelos desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos.
- Orientar la selección de prácticas de conservación para localidades específicas.
- Estimar la reducción de pérdida de suelos que se puede lograr con cambios de manejo efectuados por el agricultor; y
- Determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado.

Las ventajas del USLE incluyen facilidad de uso, simplicidad y una base de datos amplia sobre la cual fue desarrollado. Sin embargo, tiene limitaciones, como por ejemplo: los seis factores no se encuentran disponibles en muchos lugares fuera de los Estados Unidos de Norteamérica. Su aplicación en praderas es limitada; está basada sobre el supuesto de pendiente de terreno, suelos, cultivo y manejo uniformes; es un procedimiento estadístico (empírico o "agrupado") que no contempla los procesos físicos de: separación, transporte y sedimentación en forma mecánica; y finalmente, no fue diseñado para estimar rendimientos de sedimentación en cuencas complejas (FAO 1993).

De acuerdo a Geler et ál. (2004), la USLE es un modelo cuantitativo empírico para predecir la cantidad de pérdida de suelo durante un largo período en circunstancias específicas, tales como las precipitaciones, la textura del suelo, la parcela agrícola y el sistema de ordenamiento de la tierra y los cultivos. Esta fórmula empírica predice las pérdidas anuales de suelo solo en lo que respecta a la erosión superficial y en cárcavas. La desventaja de este modelo empírico consiste en que es una generalización extrema del problema real para el cálculo de la erosión. También no incluye el cálculo de la deposición y acumulación de sedimentos.

2.2.1 Valor A “pérdida de suelo”

Es la pérdida de suelo por unidad de superficie, que se obtiene por el producto del resto de los factores: R, factor de lluvia, el número de unidades del índice de erosión EI_{30} , en el periodo considerado, y mide la fuerza erosiva de una lluvia determinada; K, factor erodabilidad del suelo, el valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial, para un suelo determinado en barbecho continuo, con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22,1 m; L, factor longitud del declive, la relación entre la pérdida del suelo para una longitud determinada y la pérdida para una longitud de 22,1 m del mismo tipo de suelo; S, factor pendiente, la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo; C, factor cultivo y ordenación, la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese suelo en barbecho continuo; P, factor prácticas de conservación del suelo, la relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en fajas y en terrazas, y las pérdidas de suelo correspondiente a un cultivo en surcos según la pendiente (TRAGSA1994).

2.2.2 Factor R “lluvia y escorrentía”

El índice de erosión pluvial, se define como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos.

La energía cinética se calcula por:

$$E = 210,2 + 89 \log_{10} I$$

Siendo:

E (Julios . m².cm⁻¹) = Energía cinética del aguacero

I (cm.hora⁻¹) = Intensidad de la lluvia en el periodo considerado

El índice de erosión pluvial R se define por:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log_{10} I_j) (I_j \cdot T_j) I_{30}}{100}$$

Donde:

R (J.m⁻².cm.hora⁻¹) = Índice de erosión pluvial

T_j = Periodo de tiempo (horas) para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero

I₃₀ = Máxima intensidad de lluvia durante el aguacero

J = Intervalos homogéneos del aguacero

n = Número de intervalos

De acuerdo a TRAGSA (1994), el valor de R correspondiente a un año será la suma de los valores de R de cada una de las lluvias registradas en ese tiempo. Así mismo también indican que para obtener un valor representativo de R es necesario computar un ciclo de al menos 10 años.

En estudio realizado por Vahrson y Cervantes (1991), para determinar las tasas de escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica, utilizó la USLE. La estación Puriscal tiene 2541 mm anuales de precipitación, calcularon el valor de la erosión anual promedio (factor R) de la misma estación fue calculado en 255 unidades, moderado para las condiciones climáticas de Costa Rica.

2.2.3 Factor K “erodabilidad del suelo”

Es una compleja propiedad que se la entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración. Los suelos generalmente llegan a ser menos erosivos con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente incremento de la fracción de arcilla o arena (Antezana 2001).

El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo y de las características del perfil del suelo en la pérdida de suelo. Los valores de K son asignados usando el Nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, % materia orgánica (MO), código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil. Suelos de textura fina con alto contenido de arcilla tienen bajos valores de K (0,05-0,15), porque ellos son resistentes al desprendimiento (Antezana 2001).

Suelos de textura gruesa tales como suelos arenosos, tiene valores bajos de K (0,05-0,2), debido al bajo escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles. Suelos de textura mediana (franco limoso) tienen valores de K moderados (0,25-0,4), porque son moderadamente susceptibles al desprendimiento y producen moderados escurrimientos (Antezana 2001).

La ecuación de regresión de Wischmeier, obtenida en 1971, del análisis de los datos proporcionados por simuladores de lluvia es la siguiente:

$$100K = 0,000271.M^{1,14} (12-a) + 4,20 (b-2) + 3,23 (c-3)$$

Donde:

M = Es el producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,1 mm de diámetro, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,2 mm de diámetro, o lo que es igual a la diferencia entre el 100% y el porcentaje de arcilla de la muestra de suelo.

a = Es el % de materia orgánica.

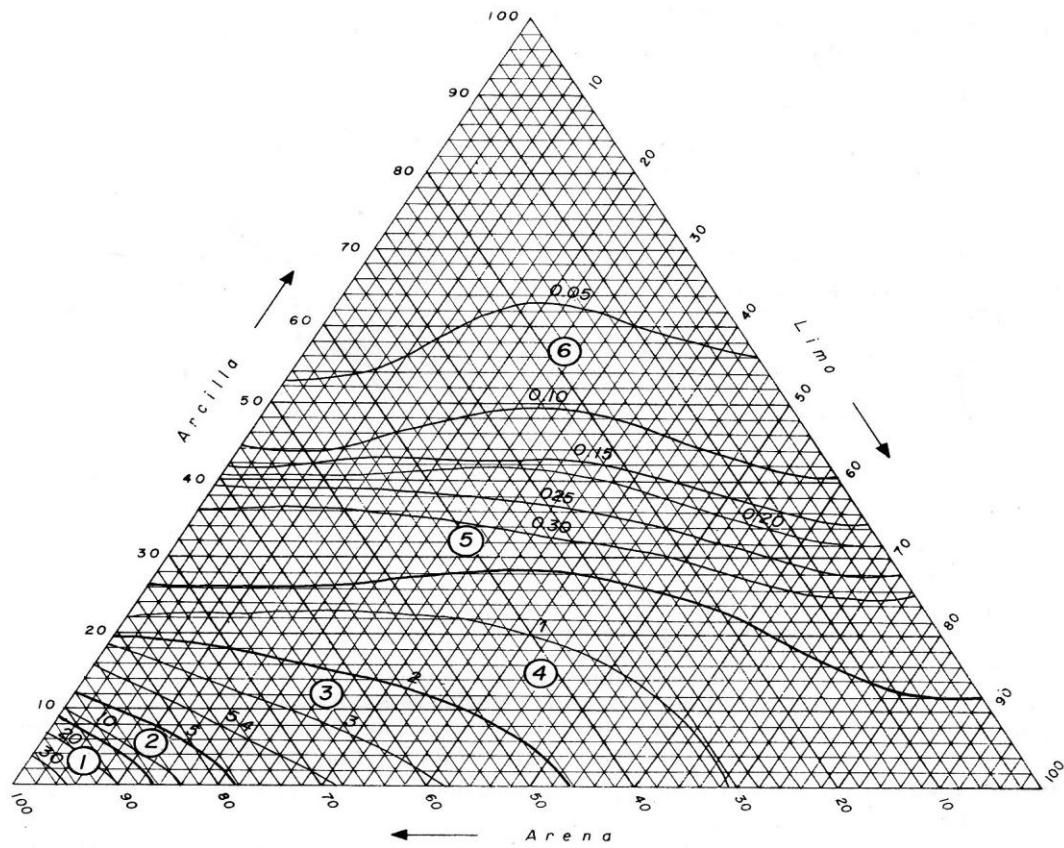
b = Es el número correspondiente a la estructura del suelo según la siguiente codificación.

- 1 – gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1mm)
- 2 – gránulo fino y grumo fino (1-2mm)
- 3 – gránulo y grumo medio (2-5mm) y gránulo grueso (5-10mm)
- 4 – gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (>10mm)

c = Clase de permeabilidad del perfil del suelo, según la codificación de la U.S.D.A.-*Soil Survey Manual*.

- 1 – rápida a muy rápida
- 2 – medianamente rápida
- 3 – moderada
- 4 – moderadamente lenta
- 5 – lenta
- 6 – muy lenta

Para la aplicación de esta codificación se utiliza el siguiente gráfico:



TAMAÑO DE LAS PARTICULAS EN mm.
 <math>< 0.002</math> Arcilla
 $0.002 - 0.05$ Limo
 $0.05 - 2.0$ Arena

Figura 1. Conductividad hidráulica a saturación (cm/h).

Posteriormente, Wischmeier y Smith en 1978, establecieron un nomograma para el cálculo de este factor, en que se incluyen los parámetros anteriores.

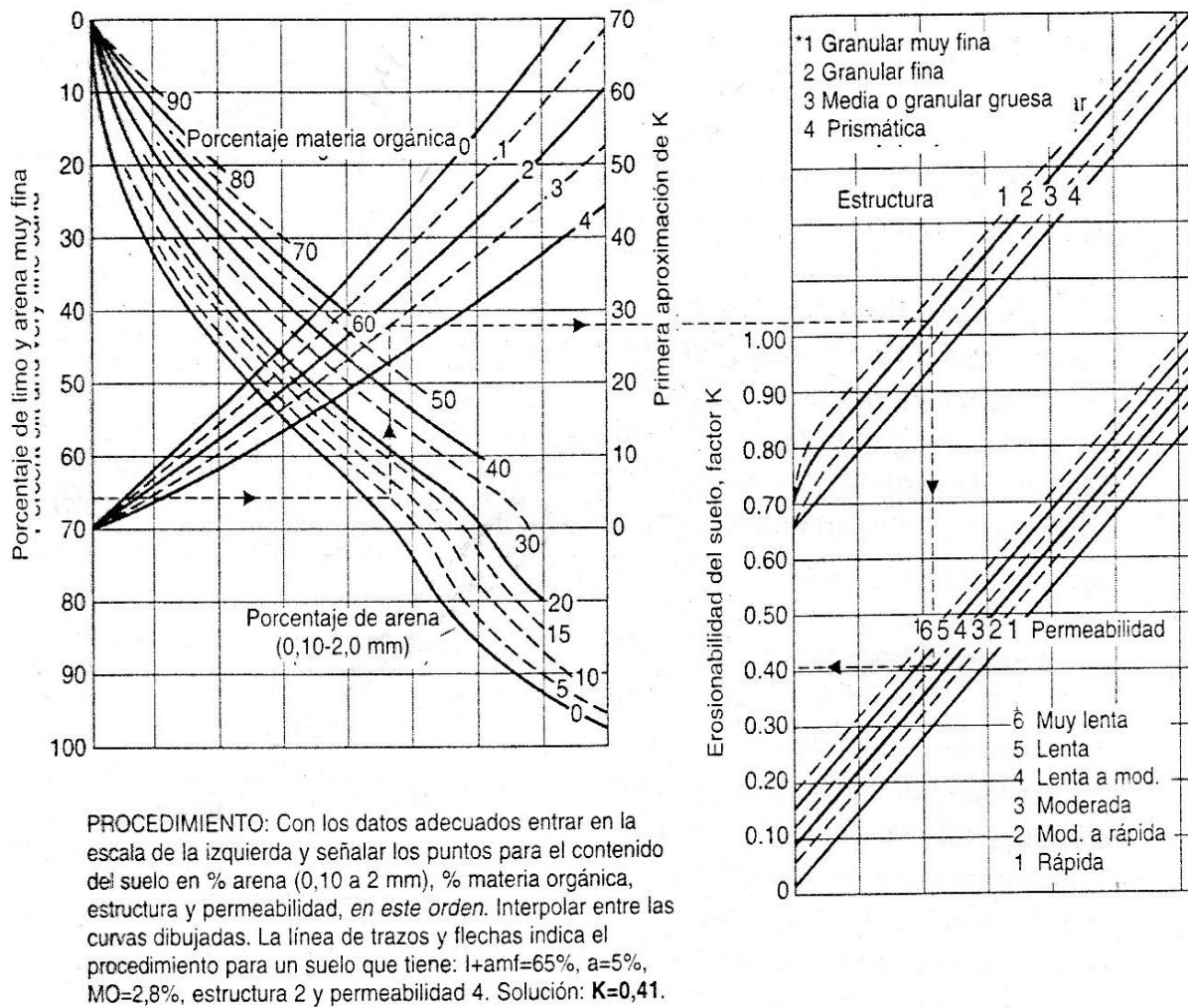


Figura 2. Nomograma para determinar el valor de K (unidades métricas) de erosionabilidad del suelo en la USLE (según Wischmeier, Johnson y Cross 1971). Dividir los valores por 1,3 para obtener el valor de K en unidades originales americanas.

Fuente: Morgan 1997.

2.2.4 Factor LS “topografía”

Este factor combina el factor, L, longitud de pendiente y el factor pendiente, S, resultando un valor que aumenta el valor final de las pérdidas de suelo, conforme aumenta la pendiente del terreno (García S/F).

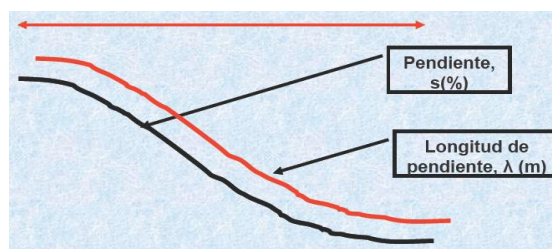


Figura 3. Factor y longitud de pendiente.

Fuente: García S/F.

En 1982 se da la última revisión del factor por McCool et ál. para laderas más o menos uniformes, resultando las expresiones siguientes:

-Para pendientes, $S < 9\%$ y longitudes de pendiente, $\lambda < 350$ m

$$LS = [\lambda/22,1]^{0,3} \cdot [0,43 + 0,30 \cdot S + 0,043 \cdot S^2 / 6,613]^{0,3}$$

-Para pendientes, $S > 9\%$ y cualquiera que sea la longitud de pendiente.

$$LS = [\lambda/22,1]^{0,3} \cdot [S/9]^{1,3}$$

2.2.5 Factor C “manejo y cobertura del suelo”

De acuerdo a Cubero (1996), los suelos bajo vegetación permanente como bosque natural, pasto bien manejado y cultivos perennes, son menos susceptibles a la erosión que los suelos bajo cultivos anuales, pues estos últimos tienen poca cobertura en contacto con el suelo durante un importante período del año, por ejemplo en época de barbecho y fases iniciales de desarrollo de las plantas (Figura 4).

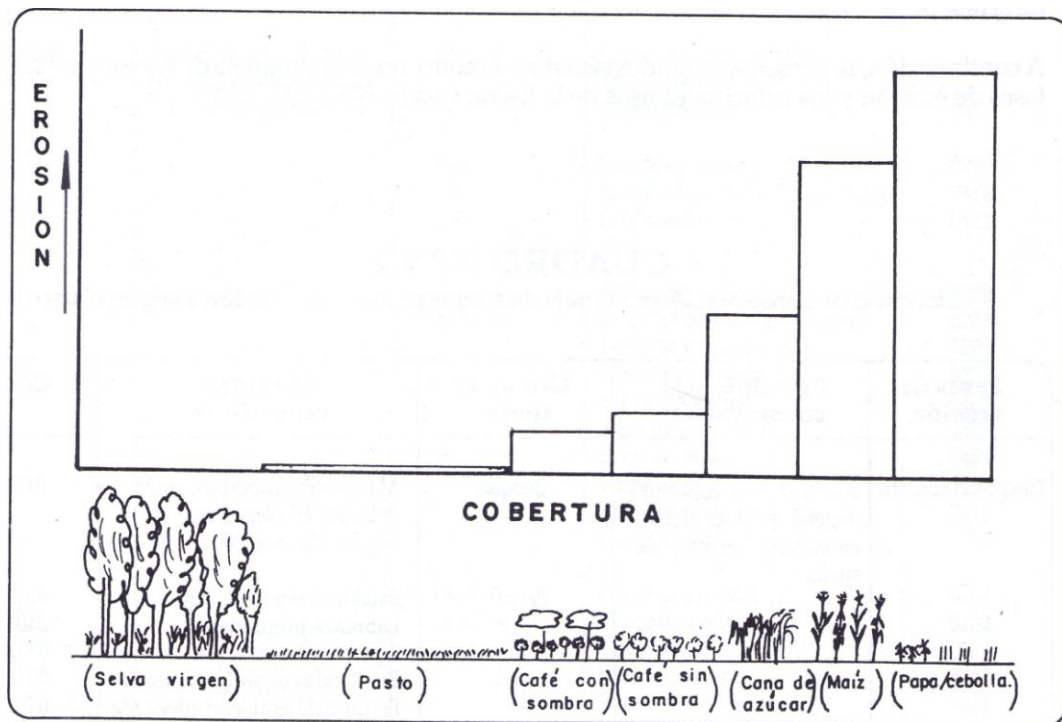


Figura 4. Aumento de la erosión en función del tipo de cobertura bajo condiciones análogas de capacidad de uso de la tierra.

Fuente: Cubero 1996.

El factor general de cobertura vegetal y manejo se define como el producto de tres factores, que a continuación se mencionan (Gómez Delgado 2002):

$$C = C_I \times C_{II} \times C_{III}$$

a) Tipo I: cubierta de resguardo o atenuación, factor C_I

Bajo este tipo, las ramas y hojas que no están en contacto directo con el suelo (conocido como dosel) generan la atenuación. Se interceptan las gotas de lluvia que caen, pero las gotas de agua que descienden de la cubierta misma pueden recuperar una velocidad apreciable, aunque no la velocidad que traían antes de la atenuación. Así, se produce una disminución de la energía erosiva de la lluvia, que depende de la altura y densidad de la cubierta (Gómez Delgado 2002).

A continuación se muestra el factor de cobertura, para alturas de 6, 1,8, 0,9, 0,3 y 0 m, que relacionan un porcentaje de terreno cubierto por el factor C_I (Figura 5).

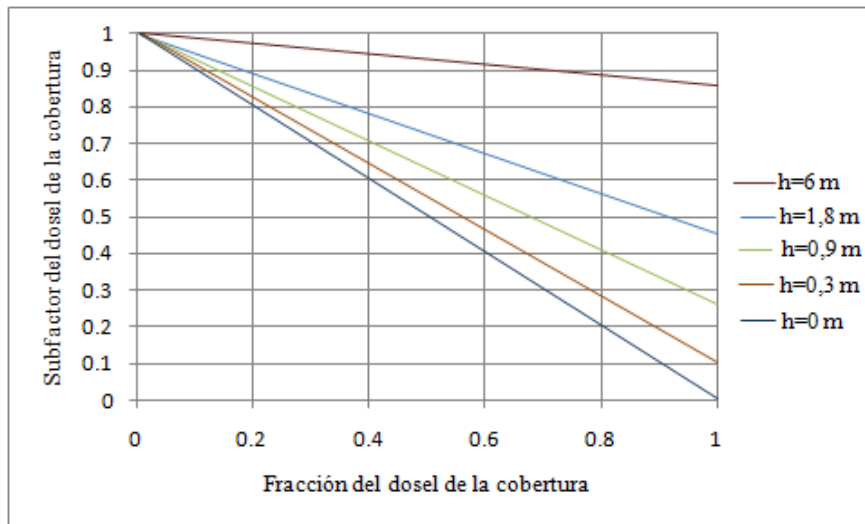


Figura 5. Influencia de la cubierta vegetal de altura en el factor EI efectivo.

Fuente: Simons 1982 citado en Gómez Delgado 2002.

b) Tipo II: efectos de una cubierta de hojarasca o vegetación densa en crecimiento, en contacto directo con la superficie del suelo, factor C_{II}

En este tipo, las gotas de lluvia no tienen una caída directa hacia el suelo, debido al amortiguamiento de la cubierta vegetal y no impactan el suelo en forma directa. Mientras más cercano se encuentre la cubierta vegetal sobre la superficie del suelo, existirá mayor contribución a la reducción de la velocidad de escorrentía que se traduce en: menor capacidad erosiva y arrastre de partículas (Gómez Delgado 2002).

c) Tipo III: cultivos y efectos residuales del uso de la tierra, factor C_{III}

Este tipo de factor se relaciona con los efectos residuales del uso de la tierra, como por ejemplo estructura, contenido de materia orgánica y densidad. También se incluyen la presencia o ausencia de cultivo, rugosidad y porosidad superficial, raíces y tallos subsuperficiales, efectos biológicos y otros (Gómez Delgado 2002).

El factor C mide como el potencial de pérdida de suelo que será distribuido en el tiempo durante la construcción de actividades, rotación de cultivos, y otros esquemas de manejo. El factor C está basado en el concepto de desviación estándar, siendo el estándar un área bajo

condiciones de barbecho con cultivo limpio. El valor de C para condiciones estándar es 1 (Antezana 2001).

2.2.6 Factor P “método de control de erosión”

Es la relación de pérdida de suelo con prácticas de soporte a la pérdida correspondiente con labranza en pendiente, la cual tiene un valor de 1. Estas prácticas de control (soporte) combate la erosión, puesto que modifica los patrones de flujo y el grado o dirección de superficie de escurrimiento. Para las prácticas de soporte de tierras cultivadas, generalmente incluye contorno, cultivos en faja, terraceo y drenaje subsuperficial (Miliarium S/F).

Las prácticas de conservación más comúnmente consideradas en el factor P son:

- Siembras en contorno: en estos casos el factor P depende de la altura del surco, su pendiente y la erosividad del clima.
- Terrazas: en las que influye fundamentalmente la pendiente a lo largo de la misma.
- Prácticas de conservación en terrenos forestales: el factor P se relaciona normalmente con cambios en la rugosidad superficial que puedan afectar a la reducción de la escorrentía.

El factor P es una variable independiente cuando se trata de las siguientes prácticas: cultivo a nivel, cultivo por fajas y terrazas. Otras prácticas conservacionistas como rotación con cultivos herbáceos, tratamientos fertilizantes, cubiertas artificiales, etc., se consideran dentro de los trabajos de cultivo y por lo tanto, su influencia en la pérdida de suelo se incluye dentro del factor C (TRAGSA 1994).

El factor P varía según la pendiente del terreno y sus valores pueden obtenerse del cuadro 2.

Cuadro 2. Factor P para distintas práctica de conservación y manejo.

Pendiente (%)	Cultivos a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas (1)	
			A	B
1-2	0,60	0,30	0,12	0,05
3-8	0,50	0,25	0,10	0,05
9-12	0,60	0,30	0,12	0,05
13-16	0,70	0,35	0,14	0,05
17-20	0,80	0,40	0,16	0,06
21-25	0,90	0,45	0,18	0,06

(1) a = Terrazas de desagüe encespedadas

b = Terrazas de infiltración con contrapendiente

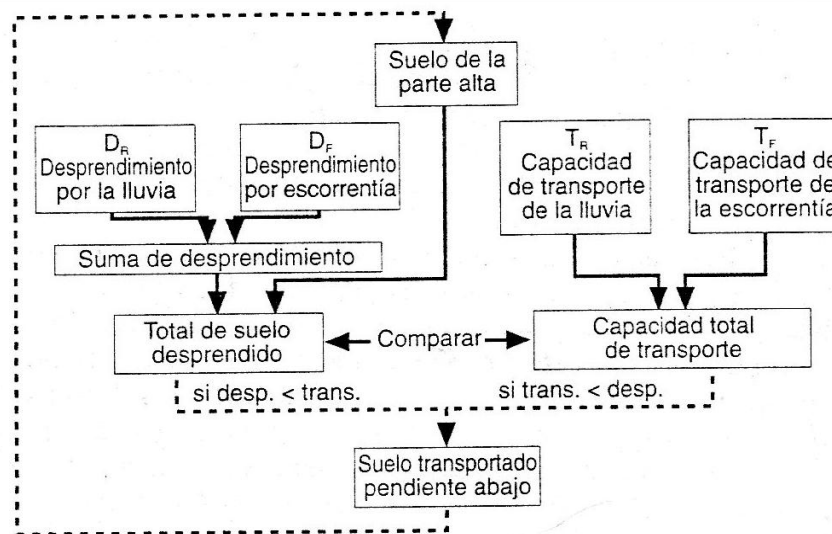
Fuente: TRAGSA 1994.

2.3 Modelos de erosión

El nivel de complejidad o sencillez de las decisiones que se deben tomar depende de los objetivos buscados. Por lo tanto, el punto de partida de toda modelización debe ser el establecimiento claro de los objetivos que pueden ser de explicación o predicción. Los

potenciales usuarios pueden tener distintos objetivos. Los directivos, planificadores y políticos necesitan una herramienta relativamente sencilla de predicción, aunque se refieren a sistemas bastante complejos, para justificar las decisiones tomadas (Morgan 1997).

De acuerdo a Morgan (1997), el modelo deberá formularse conceptualmente, representándolo por un diagrama de flujo. Ver el modelo de este modo, permite conocer la estructura del sistema, el orden lógico de transferencia de materia y energía a través del sistema, las variables y las interacciones que deben definirse entre las variables dentro del sistema. Es también, una buena prueba del nivel de conocimiento científico del sistema y del grado con que el modelo puede simplificarse por insuficiencia de conocimientos (Figura 6).



$$D_R = k_1 A I^2$$

$$D_F = k_2 A S^{2/3} Q_w^{2/3}$$

$$T_R = k_3 S I$$

$$T_F = k_4 S^{5/3} Q_w^{5/3}$$

Donde A = Área, I = Intensidad de lluvia, S = Pendiente del terreno (sen θ) y Q_w = Escorrentía.

Figura 6. Diagrama de flujo para modelizar los procesos de erosión hídrica (según Meyer y Wischmmier 1969).

Fuente: Morgan 1997.

A continuación se mencionan algunos modelos creados para evaluar la erosión, en la mayoría de los casos, también el transporte de sedimentos (Marchamalo 2007).

- a) AGNPS (*Agricultural Non-Point Source Pollution Model*)
- b) ANSWERS (*Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*)
- c) ALMANAC (*Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment*)
- d) BASIN
- e) BASINS (*Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*)
- f) CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*)
- g) EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*)

- h) KINEROS2 (*Kinematic Runoff and Erosion model*)
- i) OPUS (*integrated model for transport of nonpoint-source pollutants*)
- j) SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*)
- k) SWIM (*Soil and Water Integrated Model*)
- l) WEPP (*Erosion Prediction Model*)

2.4 Modelo CALSITE como herramienta de análisis

2.4.1 Caracterización del CALSITE

CALSITE es un programa para la simulación de la "Calibración de la erosión transportada". Permite la predicción de la erosión del suelo dentro de una cuenca y la estimación de la cantidad de material transportado, que contribuye a la producción de sedimentos (Bradbury 1995).

CALSITE hace uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el mapa de la erosión del suelo de las fuentes de producción de sedimentos. Es concebido como un instrumento de gestión y planificación de cuencas hidrográficas, para identificar las fuentes actuales de la erosión y la producción de sedimentos y predecir los efectos de los cambios en la gestión de la tierra sobre la erosión y sedimentación (Bradbury 1995).

Un enfoque "ráster" del SIG es utilizado por CALSITE por el cual un área de captación es subdividida en celdas de cuadrícula rectangular o "píxeles", generalmente de 50 por 50 metros de tamaño. CALSITE utiliza el IDRISI SIG para el pre-proceso y visualización digital de datos del mapa. Por ejemplo mapa de información sobre la topografía, suelos, uso de la tierra y la lluvia puede ser digitalizado mediante IDRISI o cualquier otro programa de digitalización, que permita luego convertir a formato ráster (Bradbury 1995).

Las siguientes operaciones se realizan en secuencia una vez que el conjunto de datos es preparado:

- a) Cálculo de la erosión total del suelo (erosión potencial), para cada uno de los píxeles.
- b) Determinación de la relación de la entrega de sedimento y flujo de la escorrentía.
- c) La calibración de los sedimentos estimados con datos observados de mediciones en campo.
- d) Cálculo de la producción de sedimentos o la "erosión transportada" para cada uno de píxel.

CALSITE está diseñado para su uso en una IBM PC/AT compatible corriendo bajo MS-DOS. Un mínimo de 2 Mbytes de memoria RAM es necesario, 512 Kbytes de memoria convencional tiene que estar disponible para ejecutar CALSITE (Bradbury 1995).

El modelo tiene, como atributo trascendente, el uso de tasas de entrega de sedimentos, estimadas para cada uno de las celdas, utilizando la elevación digital y los datos de precipitación. Adicionalmente se puede calibrar un estimado del sedimento de campo, usando medidas de sedimento en suspensión para subcuencas dentro del área en estudio. Al identificar las fuentes principales de sedimentos dentro de la cuenca, es posible promover la conservación de los suelos y valorar implicaciones de los cambios en el manejo de la tierra (Gómez Delgado 2002).

2.4.2 *Justificación para la elección del CALSITE*

De acuerdo a diferentes investigaciones realizados por Gómez Delgado (2002) utilizando el programa CALSITE y USLE las deficiencias asociadas a la representación de una característica en una zona grande, por medio del valor en un solo punto, ahora se superan utilizando los sistemas de información geográfica que pueden dar valores individuales a pequeñas unidades de áreas, dentro de la cuenca que se analiza. Así por ejemplo el programa IDRISI (base del CALSITE) puede generar valores de pendiente a cada unidad constitutiva (que puede llegar a ser tan pequeña como el valor del área total entre el valor 10485769), eliminando de ese modo el enorme error de estimar una pendiente típica para zonas de varios kilómetros cuadrados. Es notable la rutina de flujos que incorpora CALSITE con el fin de mejorar el cálculo de la longitud de pendiente (cuyo factor de la USLE también se solía tomar constante para grandes áreas). El resultado es un valor de factor LS mucho más preciso y detallado para el área de trabajo.

Así mismo también Olmos y Jégat (2001) en un análisis que realizaron utilizando el modelo CALSITE para la cuenca del río Grande en Venezuela, determinaron algunas ventajas y desventajas de este modelo, que se mencionan a continuación:

Ventajas

En la simulación:

- Permite observar el fenómeno de erosión y producción de sedimentos espacialmente.
- Calibra y define las zonas productoras de sedimentos, a través del factor de entrega.
- Tiene la posibilidad de calcular una longitud de la pendiente variable.
- Permite calibrar hasta ocho subcuencas, para las cuales debe haber datos medidos a la salida.
- Cuando se trabaja con carácter predictivo puede usarse valores estimativos para calibrar.
- La mayoría de sus fórmulas han sido calibradas para climas tropicales.
- Tiene la posibilidad de calcular el factor R a partir de la lluvia anual.

En el uso :

- Permite obtener los parámetros promedios de otros modelos rápidamente, usando como base las imágenes del modelo y las funciones para SIG del programa IDRISI.
- La información requerida es factible de conseguir o producir en un tiempo aceptable y a bajo costo.
- Se puede simular y evaluar espacialmente distintos escenarios en poco tiempo y a costo reducido.

Desventajas

En la simulación:

- No evalúa el tránsito de los sedimentos.

En el uso:

- Funciona solamente bajo el sistema operativo DOS y requiere de un alto porcentaje de memoria disponible para su funcionamiento.
- Tiene límites en la cantidad de filas y columnas de las imágenes.
- Es imprescindible tener conocimientos de sistemas de información geográfica.

- Se necesita estar familiarizado con el programa IDRISI, ya que el modelo trabaja en su ambiente versión 4.0 o 4.1 y por ende sus formatos son específicos del mismo.

Otras de las bondades del CALSITE es que suministra una serie de ecuaciones propuestas para estimar la tasa de producción de sedimentos, que se basan en parámetros de relieve de la cuenca, longitud de la cuenca, área de la cuenca, relación relieve/longitud, radio de bifurcación, pendiente del canal del río principal, número de curva SCS, escurrimiento anual y densidad de cárcavas. Además de su flexibilidad en cuanto a los requerimientos de información, el programa permite modelar diversos escenarios con extrema facilidad, de modo que se puede analizar la posible reducción en la erosión y sedimento de campo en caso de reforestar o aplicar diversas prácticas de manejo (Gómez Delgado 2002).

El modelo CALSITE ha sido aplicado en Costa Rica por lo que los resultados obtenidos pueden ser comparados con otros estudios realizados (Gómez Delgado 2002, Marchamalo 2004).

2.5 Estimación de la erosión en Costa Rica

La República de Costa Rica cuenta, al igual que varios otros países en las zonas tropicales, con un rápido aumento de las actividades agrícolas, las cuales se desarrollan no solamente en zonas aptas con tradición agrícola, sino frecuentemente en zonas marginales, con pendientes fuertes y suelos muy susceptibles a la erosión hídrica u otros tipos de degradación (FAO 1989).

En investigación realizada por FAO (1989) utilizando la USLE estima la erosión hídrica para la Región Atlántica (13165 km²). Los datos obtenidos en porcentaje son: el 90% se encuentra en la categoría 1 (tolerable), el 6% se encuentra en la categoría 2 (moderada), el 3% se encuentra en la categoría 3 (severa) y el 1% del territorio se encuentra en la categoría 4 (muy severa).

En CATIE (2003), se aplicó CALSITE estimando para la subcuenca del río Birrís una erosión de 50 t/ha/año y un aporte de sedimentos de 38 t/ha/año, es decir, el 16% de sedimentos del total de la gran cuenca del río Reventazón, aunque representa sólo un 5% de la superficie total. Esto muestra el deterioro al que está expuesta la subcuenca del río Birrís ya que aporta un alto porcentaje de sedimentos al embalse de Angostura.

Gómez Delgado (2002), quien tras una calibración del sedimento de la cuenca del Reventazón estimó para la subcuenca del río Birrís que el sedimento entregado por esta subcuenca a la red hidrográfica asciende a 61 t/ha/año.

Marchamalo (2004), aplicando CALSITE estimó una erosión promedio de 42 t/ha/año y un aporte de sedimentos de 61 t/ha/año, de la subcuenca del Birrís a la cuenca del río Reventazón. La causa de este desfase entre la erosión modelizada y el sedimento estimado en campo es que éste último incluye todos los sedimentos producidos en la cuenca, entre ellos los arrastrados por erosión en sistemas agrarios, los producidos en los márgenes de las infraestructuras sin protección, los provenientes de movimientos en masa y otras fuentes importantes de sedimentos, como la minería y extracción de áridos. Se estimó que el 67% de la cuenca tiene erosión baja (<10 t/ha/año), el 5% moderada (10-50 t/ha/año), un 24% severa (50-200 t/ha/año) y un 4 % tiene problemas de erosión muy severa (>200 t/ha/año). Así la

superficie cultivada de la cuenca (33%) coincide prácticamente con el área con erosión estimada superior a 10 t/ha/año.

Se estima que la erosión potencial de la subcuenca alcanza las 52 t/ha año, con una tasa de entrega media del 92%. El sedimento estimado en su desembocadura asciende a 61 t/ha año, lo que constata, como ya lo han hecho los estudios comentados anteriormente, que la subcuenca del río Birrís es una de las cuencas críticas respecto a la producción de sedimentos en la cuenca del río Reventazón (Marchamalo 2007).

2.6 Carbono orgánico en el suelo

De acuerdo al IPCC (2001) la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm en 1750 a 367 ppm en 1999 (31% de incremento) como consecuencia de las emisiones antropogénicas de alrededor de 405 ± 60 Gt de carbono (C) hacia la atmósfera. Este incremento fue el resultado de la combustión de combustible fósil y la producción de cemento (67%) y el cambio en el uso de la tierra (33%). Actuando como sumideros de carbono, los ecosistemas marinos y terrestres han absorbido el 60% de estas emisiones, mientras que el 40% restante ha dado como resultado el incremento observado en la concentración atmosférica de CO₂ (FAO 2007b). La figura 7 muestra las diferentes fuentes y flujos de carbono del balance global de este elemento.

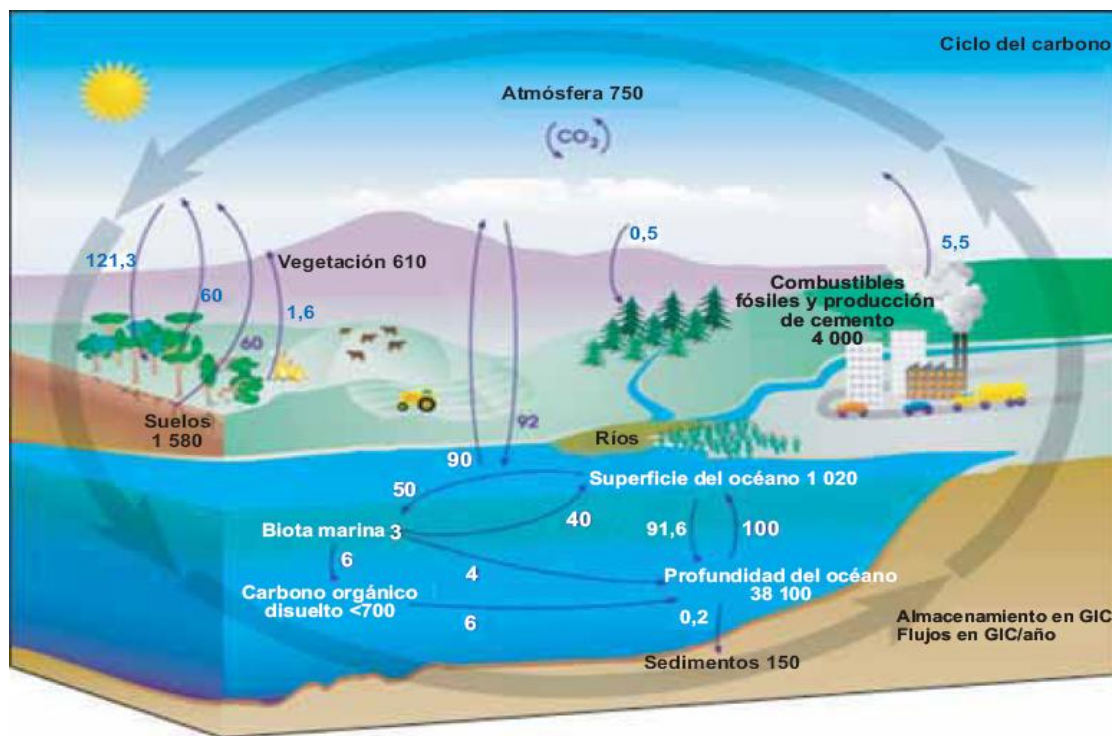


Figura 7. Principales depósitos y flujos del balance global del carbono

Fuente: FAO 2007b.

El ciclo mundial de carbono se caracteriza por largos y variables flujos naturales entre la atmósfera, los océanos y la vegetación; comparativamente, este almacenamiento temporal es pequeño. En la actualidad, el 30% del carbono emitido, “el carbono desaparecido”, se disipa

en los ecosistemas terrestres, pero no se sabe todavía cuanto tiempo se mantiene este secuestro de carbono, o si solamente es un efecto transitorio (Jandl S/F).

El ciclo de carbono necesita algunas claras definiciones para evitar malentendidos. La productividad primaria bruta (PPB) incluye todo el carbono asimilado. La productividad primaria neta (PPN) es la PPB menos la respiración de las plantas. La productividad neta del ecosistema (PNE) es la PPN menos la respiración del suelo, es decir la respiración de los microbios y las raíces; estos procesos son razonablemente regulares y se pueden predecir. Al final, la productividad neta del bioma (PNB) disminuye la PNE por pérdidas irregulares no-respiratorias como fuegos o talas (IGBP-TC-WG 1998 citado en Jandl S/F).

La forestación y las plantaciones de bioenergía pueden restaurar las tierras degradadas, gestionar la escorrentía hídrica, retener el carbono del suelo y beneficiar a las economías rurales, pero podrían competir con la producción alimentaria y afectar negativamente la biodiversidad si no se diseñan adecuadamente (IPCC 2007).

El carbono orgánico presente en los suelos naturales representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción (1%) del que ingresa (55 Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg/año) (Robert 2002) citado en Ramos 2003).

2.6.1 El ciclo terrestre del carbono

Para entender el concepto de secuestro de carbono, la figura 8 muestra un diagrama simplificado del balance de carbono en los ecosistemas terrestres. La entrada principal del C en la biosfera es a través del proceso de fotosíntesis o productividad neta primaria (PNP), o sea es la absorción de C de la atmósfera por las plantas. Parte de este C se pierde en varios procesos: a través de la respiración de las plantas (respiración autotrófica); como resultado de la descomposición de los desechos y la materia orgánica del suelo (respiración heterotrófica) y como consecuencia de pérdidas adicionales causadas por fuegos, sequía, actividades humanas, etc. (FAO 2007b).

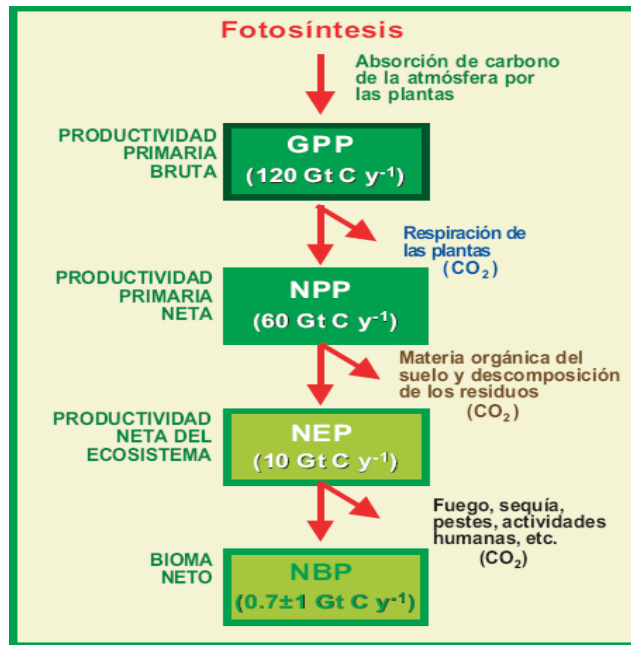


Figura 8. Balance terrestre global del carbono (simplificado).

Fuente: FAO 2007b.

Actualmente, la biosfera constituye un sumidero de carbono que absorbe alrededor de 2,3 Gt de C por año, lo cual representa alrededor del 30% de las emisiones de combustible fósil. El incremento de la concentración atmosférica de CO_2 estimula el proceso de fotosíntesis (actualmente limitada en sustrato) y consecuentemente el crecimiento de las plantas, como lo ha demostrado la investigación experimental (IPCC 2000). El grado de esta estimulación varía de acuerdo con diferentes estimaciones, siendo mayor para los bosques (hasta 60%) y menor para los pastos y cultivos (alrededor del 14%). La evidencia científica actual sugiere que los bosques más antiguos actúan como sumideros de carbono activo, secuestrando el C a tasas de hasta 6 t/ha/año (para bosques boreales o templados) (Valentín et ál. 2000 citados en FAO 2007b).

2.6.2 Los suelos y el secuestro de carbono

Los suelos contienen mucho más C (1500 Pg de C a 1 m de profundidad y 2500 Pg de C a 2m) del que contiene la vegetación (650 Pg de C) y dos veces la cantidad que contiene la atmósfera (750 Pg de C). El almacenamiento de carbono en los suelos es el balance entre la incorporación de material vegetal muerto (desecho de hojas y raíces) y las pérdidas de los procesos de descomposición y mineralización (respiración heterotrófica) (Figura 9). Bajo condiciones aeróbicas la mayor parte del C que se incorpora a los suelos es lábil y, por lo tanto, es devuelta a la atmósfera a través de los procesos conocidos como respiración del suelo o flujo de CO_2 (el resultado de la respiración de las raíces –la respiración autotrófica– y la descomposición de la materia orgánica -respiración heterotrófica) (FAO 2007b).

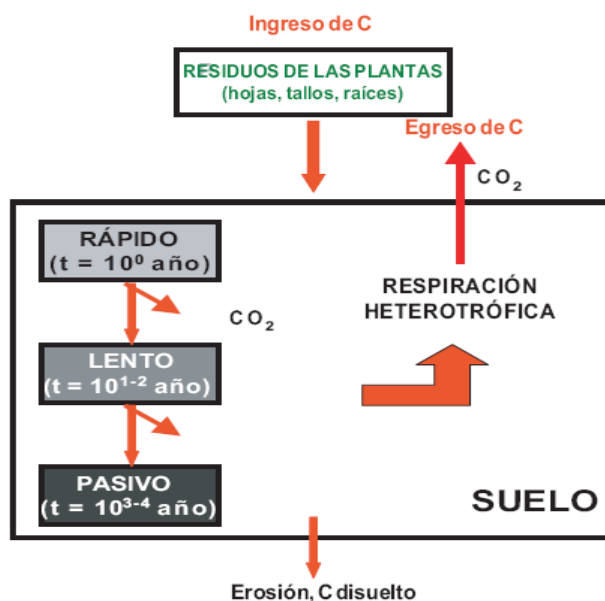


Figura 9. Balance del carbono del suelo.

Fuente: FAO 2007b.

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, ya que a causa del secuestro de carbono mejora la productividad de las plantas y la biodiversidad. La materia orgánica del suelo es un factor determinante en la actividad biológica del suelo, la cual a su vez, tiene un impacto primordial sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (Robert 1996 citado en FAO 2007b). El incremento de la materia orgánica del suelo puede mejorar la agregación y la estabilidad de la estructura del suelo, la tasa de infiltración, la retención del agua y la resistencia a la erosión.

De acuerdo a Llanderal (2006) el factor más importante en la incidencia del almacenamiento de carbono, es la cantidad de hojarasca que se deja en el suelo. La labranza cero y la labranza mínima incrementan la producción de hojarasca, incorporan hojarasca en el suelo y por consiguiente, incrementan la cantidad de carbono en el suelo. Así mismo este investigador expone la fórmula para el cálculo del almacenamiento del carbono en el suelo, que es la siguiente:

$$\text{Carbono en suelo (tC/ha)} = \text{CC} * \text{DA} * \text{P}$$

Donde:

P = profundidad de muestreo en cm

CC = Contenido de Carbono (%)

DA = Densidad aparente (g/cm³)

Según Lal (2005a) el cambio de uso de la tierra, en particular la conversión a sistemas agrícolas, agota las reservas de C del suelo. Así degradados, los suelos agrícolas tienen menos valores de carbono orgánico del suelo (COS) que su capacidad potencial. La tasa de secuestro de COS, la magnitud y la calidad de las reservas de C del suelo dependen de la compleja

interacción entre el clima, suelos, especies arbóreas, y la composición química de la hojarasca, determinado por las especies arbóreas dominantes.

En otras investigaciones, el mismo autor vuelve a mencionar de que el agotamiento de C del suelo se ve afectada por la degradación del suelo, agravados por el uso indebido y su mal manejo. Por lo tanto, mediante la adopción de medidas de restauración y manejo de prácticas de uso de la tierra (RMP), los suelos agrícolas pueden reducir la tasa de enriquecimiento a la atmósfera de CO₂ al mismo tiempo tener un impacto positivo sobre la seguridad alimentaria, la agroindustria, la calidad del agua y del medio ambiente.

2.6.3 Pérdida de carbono orgánico del suelo por erosión hídrica

Aparte de los factores climáticos, principalmente la temperatura, los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. La lixiviación del carbono orgánico e inorgánico es otro mecanismo importante de pérdida de carbono en el suelo.

La energía cinética de las gotas de lluvia afectan, junto con la fuerza de la escorrentía, a los agregados de la materia orgánica dispersándolos y exponiéndolos a las fuerzas del agua, el viento y otros procesos pedológicos. La materia orgánica está concentrada en la superficie del suelo y es de baja densidad, por lo que fácilmente es retirado por la escorrentía superficial (Lal 2003).

El control más importante de la cantidad de materia orgánica en el suelo sigue siendo la erosión y la forma del manejo de la tierra, pero también tiene influencia el cambio de la vegetación. El carbono del suelo es un subsistema bastante complicado; hay componentes que son utilizados en horas, como los carbohidratos con energía abundante y partes oxidadas de los cuales los microorganismos no pueden captar casi ninguna energía (Jandl S/F).

El material desplazado por la erosión es redistribuido y depositados en los sitios más bajos de la cuenca. El alto contenido de COS en sitios bajos se atribuye a la deposición, con sedimentos enriquecidos por COS. El impacto de la erosión en el desplazamiento de COS puede depender del proceso específico involucrado, por ejemplo, la separación o el depósito (Lal 2005b).

La mayoría de los modelos climáticos también indican que los sumideros terrestres de carbono aumentarán durante la primera mitad del presente siglo debido a una expansión en la cobertura forestal. En el sector de uso de la tierra y bosques se han identificado dos estrategias principales para acumular carbono. La primera es aumentar la fijación de carbono al crear o mejorar sumideros. La segunda es prevenir o reducir la tasa de liberación del carbono ya fijado en sumideros existentes. Estas estrategias pueden denominarse “fijación de carbono” y “no emisión de carbono”, respectivamente. Actividades de fijación de carbono pueden incluir tratamientos silviculturales para aumentar el crecimiento, agroforestería, aforestación, reforestación, y restauración de áreas degradadas. La “no emisión” puede incluir actividades de conservación de biomasa y suelo en áreas protegidas, manejo forestal sostenible, protección contra fuegos y promoción de quemadas controladas (Márquez 2000).

2.6.4 Labranza y la dinámica del carbono del suelo

Similar a la erosión del suelo y la dinámica del carbono, el impacto de la labranza en los depósitos y flujo de COS es también una cuestión discutible. Algunos edafólogos y agrónomos consideran que la eliminación de la labranza conduce a secuestro de COS. En cambio, otros argumentan que la labranza aumenta la retención del carbono del suelo (Lal 2005b). En la figura 10 se muestra el proceso del suelo afectado por la erosión acelerada, la redistribución y sitios de deposición del COS.

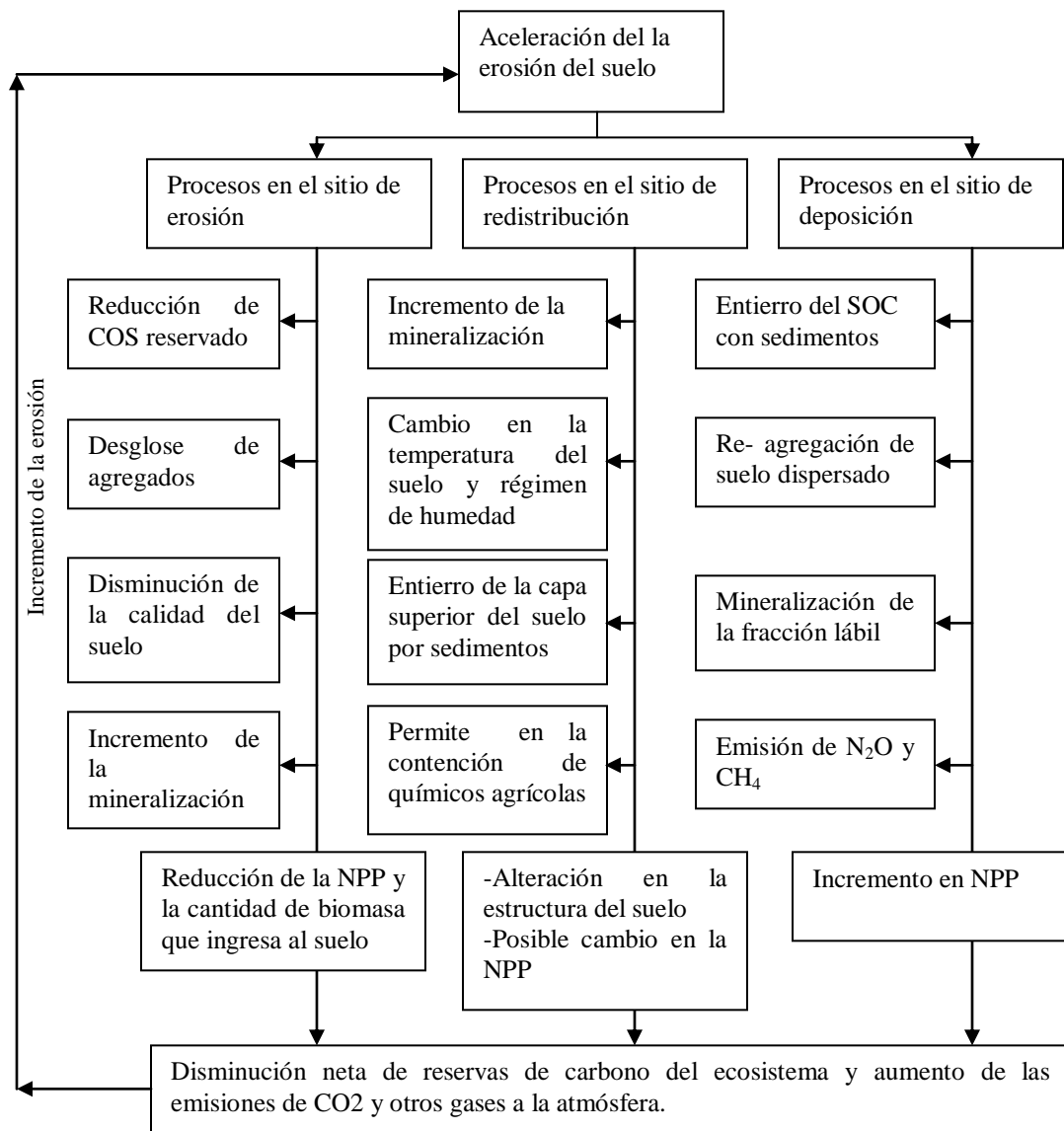


Figura 10. Procesos del suelo afectado por la erosión acelerada, la redistribución y sitios de deposición.

Fuente: Lal 2005b.

La erosión del suelo es un complejo proceso de cuatro etapas: desprendimiento, transporte, redistribución y deposición. Balance de masa de los depósitos de COS es necesario a cada etapa para calcular el destino y los sitios de depósitos de COS transportados por la

erosión. El COS transportado por procesos erosionables y en los cuales eventualmente llegan a los sitios deposicionales (componiendo pendientes cóncavas, inundaciones planas) y es enterrado en ecosistemas acuáticos, protegida contra la mineralización (Lal 2005b).

De acuerdo a la FAO (2001), el secuestro de carbono en los suelos agrícolas de labranza de conservación y otros métodos de mejora de la gestión de la tierra puede ser permanente mientras los agricultores siguen utilizando estas prácticas. La agricultura de conservación se ha extendido, donde los agricultores se han convencido por la experiencia de sus beneficios. Una vez que el sistema ha sido adaptado, demostrado y económicamente validado en campos de los agricultores, una financiación adecuada a través de contratos con agricultores de secuestro de carbono podría ser una posible manera de estimular la rápida adopción de las prácticas recomendadas por la mayoría de los agricultores.

Las praderas también tienen un gran potencial de captura de carbono. Especialmente las tierras degradadas o sobrepastoreadas pueden ser restauradas a un nivel de mayor productividad, aplicando algunas medidas como la siembra en fajas de leguminosas que cubran una pequeña parte del total de la superficie, fertilizando con fosfatos en las fajas y alternando el pastoreo con períodos de reposo de la tierra. El incremento de la productividad primaria inicia así un ciclo con una mejor cobertura y una mayor masa de raíces en el suelo, más bioporosidad y una tasa mayor de infiltración, reducción de la escorrentía y la erosión y más humedad disponible para la vegetación (FAO 2001).

Las tierras de pastoreo están incluidas en el Artículo 3.4 del protocolo de Kyoto y, como los bosques, juegan un papel importante en el secuestro de carbono. En primer lugar, las tierras de pastoreo, según la FAO, ocupan 3 200 millones de hectáreas y almacenan entre 200 y 420 Pg en el ecosistema total, una gran parte del mismo debajo de la superficie y, por lo tanto, en un estado relativamente estable. El carbono del suelo en las tierras de pastoreo es estimado en 70 t/ha, cifra similar a las cantidades almacenadas en los suelos forestales (Trumbmore et ál. 1995, Balesdent y Arrouays 1999 citados en FAO 2002).

Johnson (1995) citado en Martínez et ál. (2008) modeló el comportamiento del COS bajo escenarios de manejo en el tiempo, basado en una relación de producción/ descomposición (P/D) de residuos orgánicos (Figura 11). Cuando el cociente P/D es igual a la unidad, el COS se encuentra en estado de régimen estacionario. Si el suelo se perturba, por ejemplo por inclusión a la agricultura convencional, el sistema actúa en forma transiente y el P/D disminuye, debido a que la descomposición es mayor a la producción de C. El estado transiente perdura hasta alcanzar un nuevo nivel basal de COS, produciéndose un nuevo estado de equilibrio o régimen estacionario. En este estado el suelo no pierde más COS debido a la presencia de formas altamente recalcitrantes resistentes a la mineralización. Si en este nivel el suelo es manejado con prácticas conservacionistas, se induce a una nueva reacumulación de COS (nuevo estado transiente) y el cociente P/D crece por sobre la unidad. El nuevo estado transiente perdura hasta alcanzar un nuevo nivel de equilibrio.

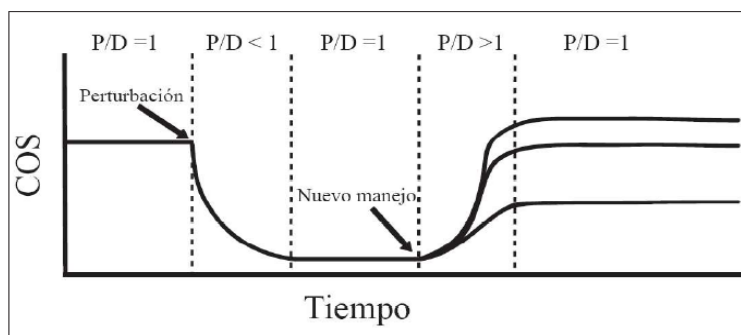


Figura 11. Cambios en el carbono orgánico del suelo inducidos por perturbación y posterior reacumulación por aplicación de manejo de conservación. Modificado de Johnson, 1995.

Fuente: Martínez et ál. 2008.

Los agricultores no siempre son sensibles a los problemas de la calidad del suelo, salvo que haya otras ventajas más tangibles. La conservación del suelo y la prevención de la degradación de la tierra se están percibiendo cada vez más como beneficios concretos (Figura 12). La materia orgánica del suelo es también equivalente a una cierta cantidad de nutrientes y puede retener agua suplementaria.

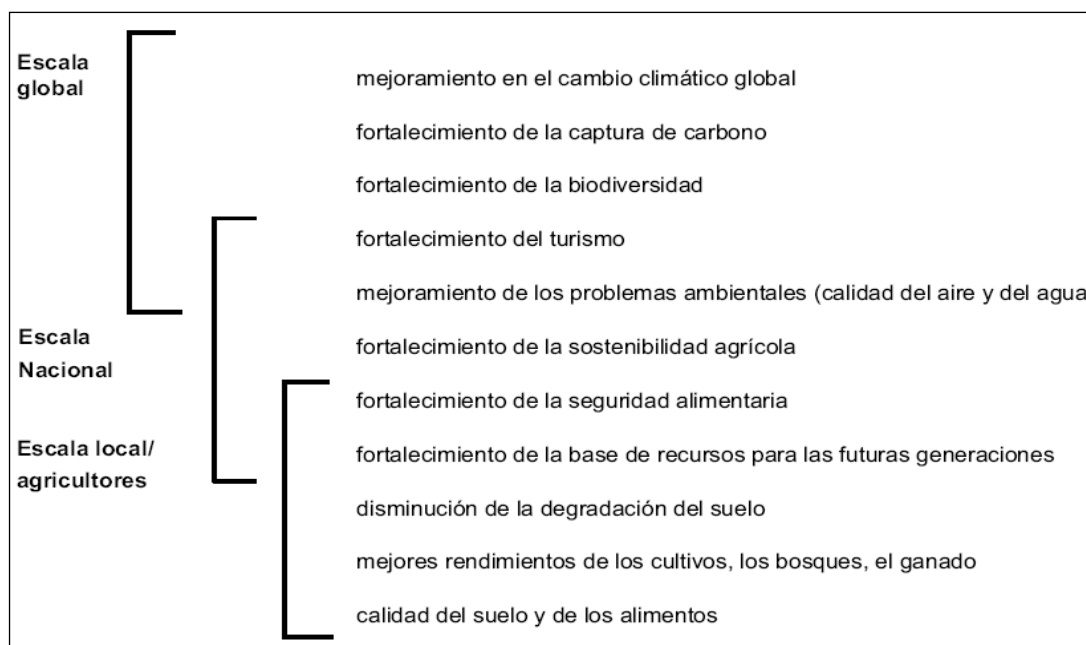


Figura 12. Principales beneficios del manejo sostenible del carbono del suelo en varias escalas espaciales (de Izac 1997).

Fuente: FAO 2002.

2.7 Pago por servicios ambientales: fijación y almacenamiento de carbono en suelos

La captura de carbono es la absorción y el almacenamiento a largo plazo de carbono atmosférico en biomásas leñosas y suelos con respecto de alguna situación basal –a menudo reabastecimiento después de una degradación anterior. El crecimiento arbóreo y los usos de suelo que secuestran cantidades netas de CO₂ atmosférico pueden contribuir a las reducciones netas en las emisiones de este gas de invernadero, dependiendo de los efectos de otros gases

de efecto invernadero. El principal interés de los compradores del mercado de carbono deriva del acuerdo internacional de la Convención Marco sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (UNFCCC), particularmente el protocolo de Kyoto, el cual se hizo obligatorio legalmente en febrero 16 de 2005. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), de dicho protocolo crea oportunidades para que los países con altas emisiones de CO₂ puedan alcanzar sus objetivos de reducción de emisiones, respaldando el desarrollo limpio en naciones en desarrollo (Swallow et ál. 2007).

De acuerdo con CIFOR (2005) la idea central del PSA es que los beneficiarios externos de los SA paguen de manera directa, contractual y condicionada a los propietarios y usuarios locales por adoptar prácticas que aseguren la conservación y restauración de ecosistemas. Actualmente, se destacan cuatro tipos de SA:

1. Secuestro y almacenamiento de carbono
2. Protección de la biodiversidad
3. Protección de cuencas hidrográficas
4. Belleza escénica

Haciendo énfasis al punto 1, se menciona lo siguiente. Los recursos naturales como los bosques y otros tipos de vegetación han desempeñado un papel importante al absorber grandes cantidades de carbono de la atmósfera, ayudando a prevenir el calentamiento global. Por lo tanto, los gobiernos, organizaciones no gubernamentales y el sector privado estarían dispuestos a pagar a los protectores de bosques y reforestadores por la provisión de sus servicios (Khan 2005 citado en OEA 2008a). Por ejemplo, actualmente existe un mercado voluntario en continuo crecimiento que se concentra en pagar por bosques en crecimiento como la mejor alternativa para reducir los efectos negativos de los gases de efecto invernadero, y dentro del Protocolo de Kyoto el MDL prevé la incorporación de proyectos de reforestación para cumplir con las obligaciones de reducir las emisiones de carbono en los países en desarrollo (OEA 2008a).

Según Ecosystem Marketplace (2010), los mercados mundiales de carbono se pueden dividir en dos segmentos: los mercados voluntarios (*Voluntary Carbon Standard*, VCS) y los reglamentados (de cumplimiento) o mercados MDL. Los mercados voluntarios de carbono incluyen todas las operaciones de crédito de carbono que no son requeridos por los reglamentos. Bajo este sistema voluntario se tienen dos operadores: el *Chicago Climate Exchange* (CCX), voluntario, pero jurídicamente vinculante de limitación y comercio del sistema, y la más amplia de mercado no vinculante: “*Over-the-Counter*” (OTC).

La gran mayoría de los créditos en el mercado voluntario OTC vienen de proyectos de compensación (en oposición a los subsidios estandarizados). Los proyectos de compensación se distribuyen en todo el mundo y varían de la destrucción de gases industriales a la conservación de los bosques para proyectos de energía renovable. En comparación con el CCX o el *European Union Emission Trading Scheme* (EU-ETS), donde los clientes compran una reducción de GEI de consumo general, para los mercados OTC de carbono voluntario, el énfasis sigue siendo los créditos históricos (Ecosystem Marketplace 2010).

El cuadro 3 muestra el desglose del volumen de transacciones y el precio promedio, por tipo de proyecto, en 2009.

Cuadro 3. Volumen transado en Mt CO₂eq y precio promedio en US\$/t CO₂eq, en 2009.

Tipo de proyecto	Volumen transado Mt CO ₂ eq	Volumen transado (%)	Precio promedio US\$/t CO ₂ eq
Energía Solar	---	---	33,8
Biomasa	0,4	0,9	12,3
Metano – otros	0,8	1,8	9,6
Eficiencia energética	0,6	1,4	9,2
Eólicos	3,4	7,8	8,7
Gestión forestal	1,4	3,2	7,3
Rellenos sanitarios	13,7	31,5	6,8
Energías renovables (RE) – otros	0,4	0,9	6,7
Transferencia de combustibles	1,1	2,5	6,6
Manejo de ríos	---	---	5,8
Ganadería	1,8	4,1	5,7
Minas de carbón	1,7	3,9	5,5
Agroforestales	0,6	1,4	5,2
Forestación y reforestación	4,3	9,9	4,6
Aguas residuales	---	---	3,6
Deforestación evitada (REDD)	2,8	6,4	2,9
Secuestro geológico & Gas industrial	1,7	3,9	2,4
Grandes centrales hidroeléctricas	3,2	7,4	1,7
Suelo agrícola	1,2	2,8	1,2
Otros, basados en tierras	0,1	0,2	0,8
Subsidio	1,4	3,2	0,2
Otros	---	---	6,7
No especificados	2,9	6,7	8,6
Total	43,5	100	

Fuente: Ecosystem Marketplace 2010.

En el cuadro anterior se puede observar que los proyectos de relleno sanitario, forestación, reforestación y eólicos, son los de mayor volumen transados durante el 2009, 13,7 t CO₂eq (31,5%), 4,3 t CO₂eq (9,9%) y 3,4 t CO₂eq (7,8%), respectivamente. Si bien estos volúmenes fueron altos, el precio promedio de estos proyectos se mantuvo en un rango medio de 4,6 – 8,7 US\$/t CO₂eq. En cuanto al precio promedio, caben destacar los proyectos de energía solar, biomasa y metano, con un precio promedio de 33,8 US\$/t CO₂eq, 12,3 US\$/t CO₂eq y 9,6 US\$/t CO₂eq, respectivamente. Su difícil producción de estos proyectos quizás haga que estos tengan un precio elevado y una producción baja.

Si bien estos precios en estos últimos tiempos han tendido a la baja, debido a la recesión económica global, una señal de precios de carbono eficaz podría redundar en un importante potencial de mitigación en todos los sectores. Los estudios de modelización indican que un aumento mundial de los precios del carbono hasta los 20-80 US\$/t CO₂eq de aquí a 2030 es

coherente con una estabilización en torno a 550 ppm de CO₂eq de aquí a 2100. Para ese mismo nivel de estabilización, el cambio tecnológico inducido podría reducir esas horquillas de precios hasta los 5-65 US\$t CO₂eq en 2030 (IPCC 2007).

Bajo esta premisa, conociendo los precios mundiales de COS, se ha revisado los PSA legalmente reconocidos en Costa Rica, que quizás alguno de ellos se pudiera aplicar con el apoyo nacional en la compensación a los agropecuarios. De acuerdo con la OEA (2008b) son:

- a) Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (reducción, absorción, fijación y almacenamiento de carbono)
 - Reforestación: plantaciones, regeneración natural (MDL, US\$ 840 ha/año)
 - Conservación de bosques (REDD US\$ 64 ha/año)
- b) Protección de agua para uso urbano, rural o hidroeléctrico, cuencas, acuíferos
- c) Protección de la biodiversidad para conservarla y uso sostenible científico y farmacéutico, investigación y mejoramiento genético, protección de ecosistemas y formas de vida.
- d) Belleza escénica natural para fines turísticos y científicos
- e) Conservación y uso sostenible del suelo
 - Agricultura orgánica
 - Agricultura sostenible

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio “Subcuenca río Birrís”

3.1.1 Localización

El área de estudio fue la subcuenca del río Birrís, perteneciente a la cuenca alta del río Reventazón, la cual queda insertada en la región geográfica denominada Vertiente Atlántica (Figura 13), y ubicada entre las coordenadas que se indican en el cuadro 4.

Cuadro 4. Coordenadas UTM y geográficas de la subcuenca del río Birrís (Marchamalo, 2004).

UTM	X	515308 – 523765
	Y	1093209 – 1103258
Geográficas	Latitud Norte	9,89° - 9,98°
	Longitud Oeste	83,78° - 83,86°

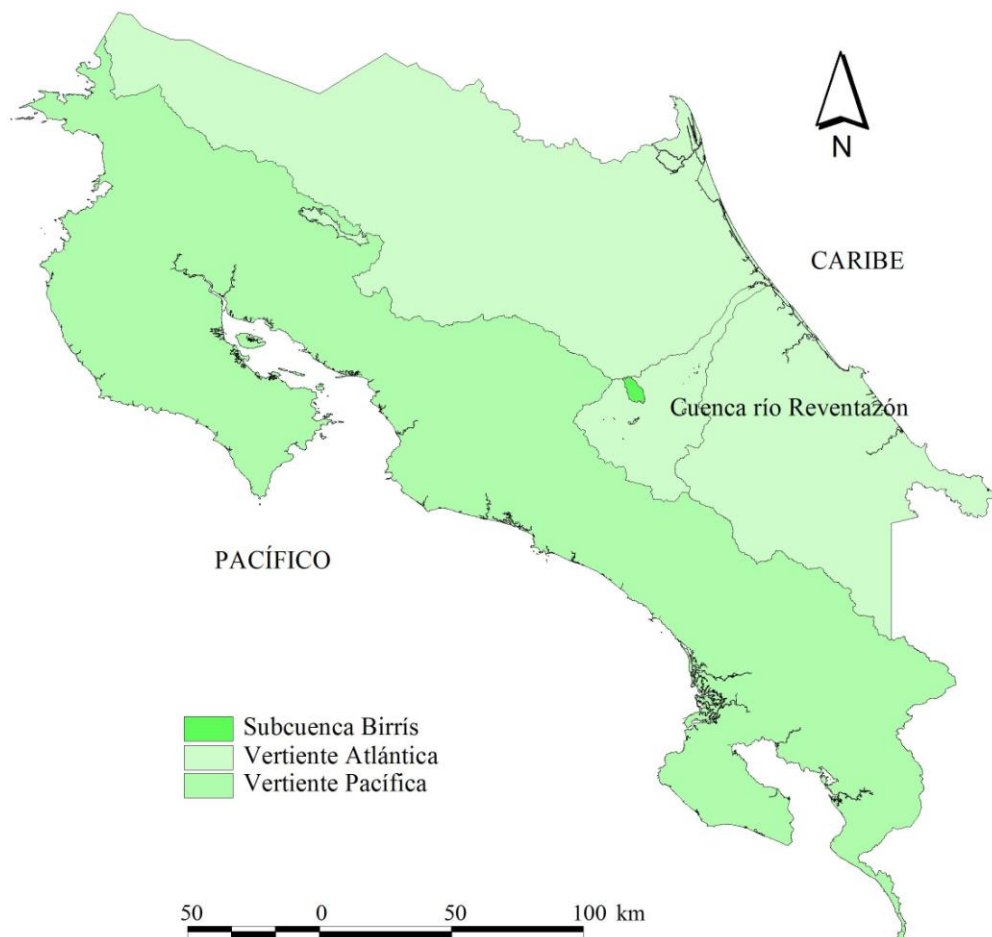


Figura 13. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Birrís en Costa Rica.

La subcuenca tiene una superficie de 4838 ha, y se extiende desde su nacimiento, en el Cerro Noche Buena, en las faldas del volcán Irazú hasta el embalse donde se encuentra la planta hidroeléctrica Birris III, de la empresa hidroeléctrica JASEC. En relación con la altitud, se sitúa entre los 1245 m.s.n.m. y los 3432 m.s.n.m. El río Birris se caracteriza por una gran densidad de afluentes, siendo el principal la Quebrada Pacayas. Se constituye como el principal de los mismos. La subcuenca pertenece a la provincia de Cartago, abarcando parte de los cantones de Alvarado, Oreamuno y Paraíso, siendo Pacayas el centro poblacional más importante (Figura 14).

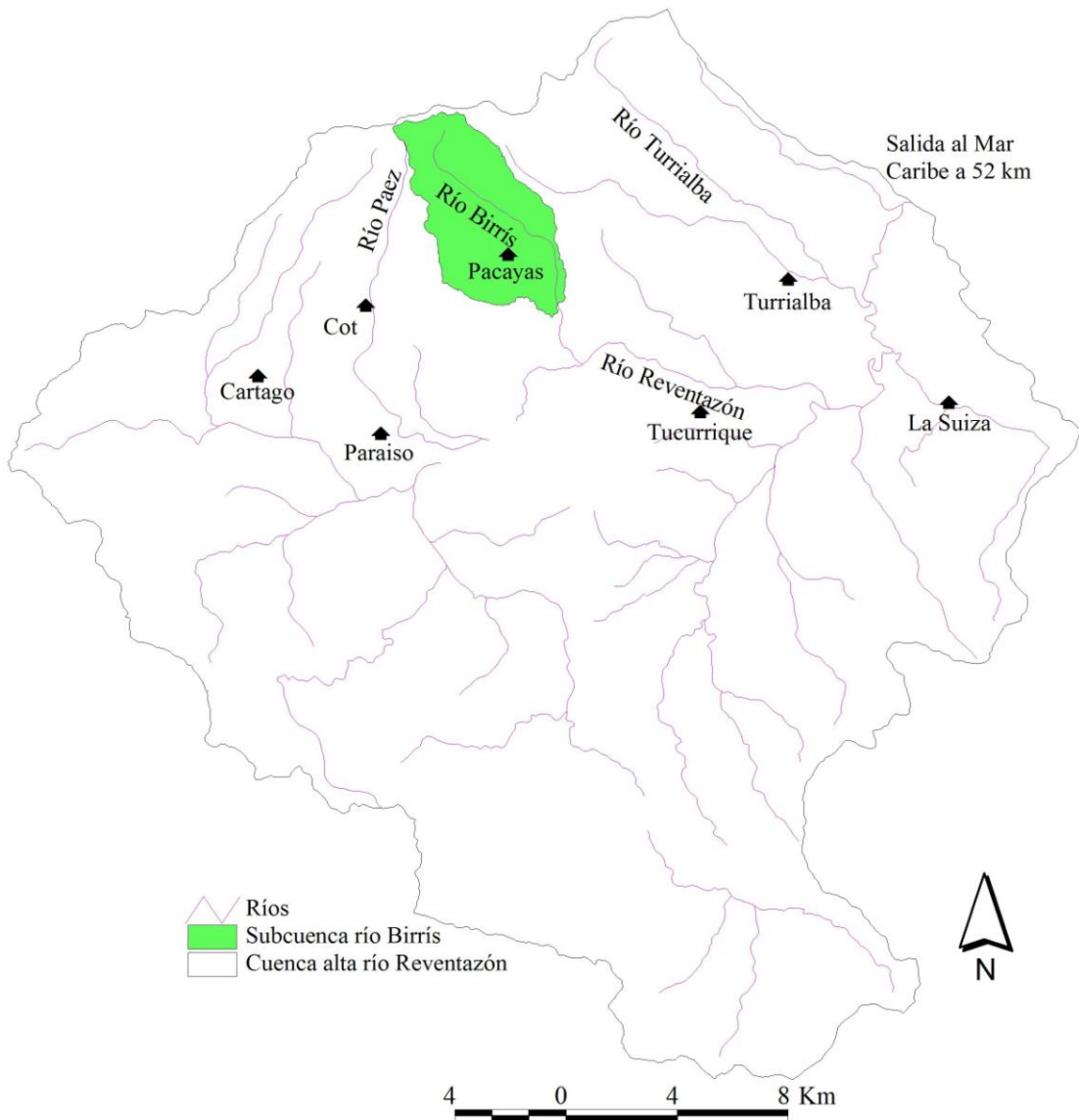


Figura 14. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Birris (4838.68 ha) en la cuenca alta del río Reventazón (153 100,85 ha).

3.1.2 Geología

La subcuenca del río Birris se encuentra ubicada en las laderas del volcán Irazú, que es un estratovolcán complejo que forma parte de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. El

grupo Irazú es característico de una zona volcánica joven (del Pleistoceno a la actualidad) (Fernández et ál. 1998 citado en Marchamalo 2007).

En la parte alta de la subcuenca se presentan coladas de lava andesítica, augítica y porfídica y menores cantidades de autobrecha vesicular, de color gris claro a intermedio, de grano muy fino. En la parte media y baja domina la formación Andesitas Poás, constituida por lavas andesíticas intercaladas con material piroclástico (ceniza, lapilli, brechas, aglomerados y lahares), de edad desde Pleistoceno al Reciente (Krushensky 1972 citado en Marchamalo 2007).

El Birrís está formado de cuatro a cinco flujos de lava andesítica porfirítica de color gris claro a oscuro. Cada flujo de lava presenta una delgada capa de escombros con hematita de color rojo oscuro, de 15 a 60 cm de espesor. En zonas de afloramiento la erosión ha eliminado estas capas y la lava presenta una superficie enlazada característica (Pizarro 1984).

En la subcuenca media y baja del Birrís se presenta inestabilidad de las pendientes por la presencia de lahares meteorizados, además de las características geofísicas de los cañones del río Birrís, quebrada Pacayas y afluentes, que han inestabilizado las laderas y bordes de los taludes y pequeños cañones que forman las quebradas que desembocan en estos ríos. Esta inestabilidad se refleja en deslizamientos, avalanchas de lodo y arrastre de materiales por los ríos en poblados como Pacayas, parte alta de Capellades y Cervantes, los cuales han generado gastos económicos en la rehabilitación de carreteras y caminos rurales, reubicación y construcción de casas y se han cobrado vidas humanas (Marchamalo 2007).

3.1.3 Red hidrográfica

La cabecera del río Birrís se caracteriza por una fuerte pendiente, tanto en los afluentes como en el cauce principal, así como una elevada densidad de drenaje. La quebrada Pacayas es el principal afluente del río Birrís. La red de drenaje de la cuenca presenta seis cursos de agua principales, numerosos subafluentes y una complicada red de pequeñas quebradas y acequias, además de cursos de aguas de régimen no permanente que no llevan agua en la época seca. El cuadro 5 muestra la distribución de los principales afluentes de la cuenca del río Birrís y la altitud a la que nacen.

Cuadro 5. Red de drenaje de la subcuenca del río Birrís, afluentes y altitud de nacimientos (entre paréntesis).

Río Birrís (3910m)		
Afluentes primarios	Q. Pacayas: afluentes secundarios	Q. Presidio: afluentes terciarios
Quebrada González	Q. Carís	Q. Lajas (2070m)
Q. Central (3060m)	Q. Plantón	Q. Fortuna (1736m)
Q. Roscaván (2860m)	Q. Presidio	Q. Pascón (1876m)
Q. Laguna Tapada (3120)		
Q. Patalillo (1820m)		
Q. Pacayas (2820m)		

Fuente: CATIE 2003.

3.1.4 Clima

Según Lianes (2008), la subcuenca del río Birrís es influenciada por la presencia de los vientos alisios en dirección NE-SO; predomina un flujo de viento por el paso Coliblanco que genera nubosidad y lluvias débiles y persistentes en la parte alta. El promedio anual de precipitación es 2325 mm; la media mensual varía de 65 mm en marzo a 278 mm en octubre. La precipitación convectiva es la que tiene mayor influencia en el aumento del caudal del río Birrís. En los meses de enero, febrero, marzo y abril, las lluvias disminuyen en esta parte de la gran cuenca del Reventazón. En los meses de mayo a diciembre, se concentra la mayor cantidad de precipitación (el 82,8% de la precipitación media total anual) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Variables climáticas de la subcuenca del río Birrís (Otárola 2007 citado en Lianes 2008)

Variable climática	Valor medio
Temperatura media anual	16,7 °C
Evapotranspiración potencial media	3 mm/día
Insolación relativa media	< 35%
Duración media del brillo solar	4,5 h/día
Humedad relativa media	88%
Precipitación media anual	2325 mm
Precipitación época seca (enero-abril)	27,20%
Precipitación época húmeda (mayo-dic)	82,80%

Fuente: Lianes 2008.

La temperatura disminuye cerca de 0,7° C por cada 100 metros de aumento en la altitud, aunque por las características de relieve se presentan muchos microclimas. En la estación meteorológica Pacayas, ubicada a 1735 m.s.n.m. se observa una temperatura promedio de 16,7 °C, mientras que en la estación Irazú a 3400 m.s.n.m., la temperatura promedio es de 7,2 °C. La evapotranspiración potencial de la zona es bastante baja (menos de 3 mm/día) debido a que el déficit de saturación del aire es bajo, al igual que la radiación solar y la temperatura del aire. También las características de relieve de la zona no favorecen en la mayoría de los sitios vientos de gran velocidad lo que reduce la contribución aerodinámica a la evapotranspiración (Lianes 2008).

3.1.5 Tipo de suelo

La subcuenca del Birrís presenta suelos de origen volcánico, clasificados como andisoles (USDA 2003 citado en Marchamalo 2004). Son suelos frágiles, vulnerables a manejos inadecuados, bastante fértiles, oscuros y profundos derivados de cenizas volcánicas, de textura granular, con alto contenido en materia orgánica y tendencia ácida, que requieren de prácticas de manejo y conservación para evitar su degradación y pérdida por erosión hídrica y eólica. La subcuenca presenta los siguientes tipos de suelo, tras su análisis espacial, según la clasificación de la USDA *Soil Taxonomy* de 2003 (USDA 2003 citado en Marchamalo 2004):

- Udivitrands (Iv): son suelos volcánicos, de texturas moderadamente gruesas a gruesas, poco fértiles, bajo un régimen climático usualmente húmedo. Por la posición que ocupan cerca de los cráteres volcánicos, tienen poca importancia agropecuaria.
- Hydrudands (Ih): son suelos volcánicos oscuros, profundos, bien drenados, permeables, de texturas medias a moderadamente gruesas, moderadamente fértiles, pero que presentan arcillas de secado irreversible, por lo que son muy frágiles a prácticas de cambio de uso de la tierra distintos a vegetación permanente, por su alto riesgo de erosión.
- Hapludands (Ix): son los suelos derivados de cenizas volcánicas más importantes dentro de la subcuenca, por su distribución geográfica. Son muy profundos, oscuros, muy ricos en materia orgánica, bien estructurados, bien drenados, permeables y moderadamente fértiles.

En algunos sectores (alrededores de Cervantes) ocurren fases pedregosas de estos suelos. Todos estos suelos tienen un régimen de humedad alto, lo que implica que no requieran riego generalmente (Lianes 2008).

3.1.6 Uso del suelo y sistemas de producción

El CATIE (2003) usando de referencia los datos del ICE (1999), los de la ASA del MAG de Pacayas, y observaciones realizadas en el campo, describe dos sistemas de producción agropecuaria predominantes en la subcuenca del río Birrís:

- La actividad agrícola, con cultivo anual, en el que destaca el cultivo de la papa, aunque existen cultivos de menor importancia como el de hortalizas, mini vegetales, coliflor y brócoli. También cabe mencionar que el cultivo de zanahoria está incrementándose en toda la subcuenca.
- La actividad ganadera, principalmente para producción de leche.

Actualmente en la subcuenca se están comenzando a desarrollar programas de conservación de los recursos naturales, acompañados con programas de incentivos. En agricultura, ciertas prácticas tecnológicas sostenibles están siendo aplicadas por algunos productores dentro de la subcuenca, gracias al apoyo técnico y económico que se viene realizando por la experiencia generada por la UMCRE - MAG – JASEC, desde el año 2000. Se espera que se pueda transmitir esta tecnología a los demás productores con el propósito de mejorar las condiciones productivas y socioeconómicas, para disminuir los procesos de degradación que afectan al recurso hídrico (CATIE 2003).

Las tierras de la subcuenca se dedican mayoritariamente a la producción agrícola y en baja escala se desarrollan actividades de comercio y servicios en los poblados. Los cultivos principales son papa, zanahoria, repollo, coliflor y otras hortalizas. Casi todo el territorio de la subcuenca está ocupado por fincas cuya extensión se encuentra en el rango de 5 a 20 ha, en las que se observa la diversidad de cultivos como estrategia de las familias para lograr la subsistencia y adaptarse a las demandas del mercado (CATIE 2003).

En el sector de Pacayas, en la parte media de la subcuenca, se registran arrendatarios de tierra, en su mayoría trabajadores de las fincas ganaderas, quienes siembran hortalizas y papas a cambio de la participación en las utilidades del cultivo con el propietario de la hacienda. En

la parte norte de la subcuenca (sectores de Santa Rosa, San Martín, San Gerardo, y San Pablo) predominan algunas fincas de gran extensión, utilizadas en ganadería de leche, con algunas siembras de hortalizas por parte de los peones, y algunas fincas con una extensión de menos de 5 ha, utilizadas para la producción de hortalizas (CATIE 2003).

3.1.7 Población

La subcuenca del río Birrís está integrada por los distritos Pacayas, Cervantes, parte de Capellades del cantón Alvarado y parte de los distritos Santa Rosa y Cipreses del cantón Oreamuno. En la parte superior de la subcuenca se localizan el Parque Nacional Volcán Irazú, y la Reserva Forestal Cordillera Volcánica Central, ocupando el 7% de su territorio; y en el sector inferior, las Plantas Hidroeléctricas Birrís III de la JASEC (Marchamalo 2004).

De acuerdo con las estimaciones de población, para 1997 la cuenca tenía 15078 habitantes y una densidad demográfica de 179 hab/km². Según las proyecciones elaboradas para el año 2015 se espera que la cuenca esté habitada por 23725 personas y una densidad esperada de 281 hab/km², lo que equivaldrá al 4% de la población total de la cuenca del río Reventazón (Cuadro 7). El crecimiento demográfico y la demanda habitacional que lo acompaña, hacen esperar un aumento de la presión sobre los suelos agrícolas y forestales. Las expectativas de mantener una población joven en la cuenca favorecen la introducción de cambios tecnológicos y productivos, pero a su vez una mayor demanda de fuentes de empleo y una presión hacia el mayor fraccionamiento de las fincas, como consecuencia de la conformación de nuevos hogares (Marchamalo 2004).

Cuadro 7. Comunidades en la subcuenca del río Birrís, número de habitantes, extensión y población (hab/km²) (Otárola 2007 citado en Lianes 2008).

Comunidad	Población (habitantes)	Extensión (km ²)	Población (hab/km ²)
Pacayas	4600	13,34	344,83
Capellades	2025	39,75	50,94
San Rafael Irazú	600	7,2	83,33
San Pablo	765	1,4	546,43
Santa Rosa	2825	9,04	312,50
Cipreses	2533	8,5	298,00
TOTAL	13348	79,23	168,47

Fuente: Lianes 2008.

3.2 Recolección y análisis de la información

3.2.1 Planteamiento de escenarios de producción hortícola y ganadera

Para el planteamiento de los escenarios se partió de dos coberturas de uso de suelo. La primera, parte de cultivos hortícolas y la segunda de pastizales o potreros dedicados a la actividad ganadera. Estos dos usos actualmente son de mayor predominio en la subcuenca 32,9% y 22,6%, respectivamente, las condiciones biofísicas favorecen la producción hortícola

y ganadera en la zona, de ahí su importancia socioeconómica, productiva y de esta investigación.

A partir de estos dos usos de suelo a nivel subcuenca, se plantearon seis escenarios. La variación de estos escenarios está en función de la conversión de las actividades hortícolas (cultivos) y ganaderas (potreros o pastizales), hacia otros usos y la asignación respectiva del valor “factor C” de la USLE, a cada uso establecido en la subcuenca.

Los escenarios planteados a partir de la conversión de tres usos de suelo (cultivo, cultivo – pasto y potrero) se mencionan a continuación:

Cuadro 8. Escenarios de producción hortícola y ganadera

Escenarios	Conversión del uso del suelo
Escenario base1_1	Ninguno
Escenario 1_2	Conversión cultivo-pasto a potrero
Escenario 1_3	Conversión cultivo a potrero
Escenario 1_4	Conversión potrero a cultivo
Escenario 1_5	Conversión cultivo-pasto a cultivo
Escenario 1_6	Conversión cultivo a sistemas agroforestales y potrero a sistemas silvopastoriles

Todos los escenarios parten del escenario base. Este escenario base proviene del mapa de uso de suelo de la investigación que realizó Marchamalo (2004) para la ordenación territorial y producción de servicios ambientales hídricos, con fines de cuantificar el potencial de conservación de suelo y agua en la subcuenca del río Birrís. A partir de esto se plantearon los demás escenarios. Estos escenarios muestran estimaciones de erosión potencial, sedimentación y pérdida de carbono a causa de los cambios en el uso del suelo, además se trata de presentar de cuáles serían los escenarios óptimos o dónde se pierde menos y se retiene más COS.

Marchamalo (2004) para realizar el mapa de uso de suelos, analizó fotos aéreas a color de la serie TERRA, a escala 1:40 000. Para ello, realizó el proceso de ortogeoreferenciación de las mismas con el programa ORTHOENGINE de GEOMATICA. La digitalización de los usos del suelo la realizó con MAPINFO para unidades mayores o iguales a 1 hectárea.

A partir del escenario base se tienen los otros; en el escenario 1_2, se convierte el uso de suelo cultivo – pasto (cultivo mixto) a potrero o también llamado pastizal en esta investigación, incrementándose de esta manera el área de potrero. En este escenario desaparece el uso mixto, los demás usos se mantienen tal cual están, con sus respectivos valores del factor C de la USLE.

En el escenario 1_3, se convierte toda el área del uso de suelo cultivo a potrero, incrementándose, de igual forma, el área de pastizales ó potreros. En este escenario desaparece en toda la subcuenca el uso cultivo, manteniéndose únicamente potrero y los demás usos de suelo, con sus respectivos valores del factor C.

El escenario 1_4, es contrario al anterior escenario, donde toda el área del uso potrero pasa a convertirse a cultivo, incrementándose, de esta manera, el área de cultivos. En este escenario

desaparece de toda la subcuenca el uso potrero, manteniéndose únicamente cultivo de lo estudiado y los demás usos de suelo, con sus respectivos valores de factor C.

En el escenario 1_5, se convierte el uso de suelo cultivo – pasto (cultivo mixto) a cultivo. Se entiende como cultivo – pasto o mixto, a aquellas fincas o áreas donde se tiene cultivos hortícolas y potreros; el área de este uso a nivel subcuenca es relativamente pequeña. En este escenario desaparece el uso mixto, los demás usos se mantienen como están, así como sus respectivos valores de factor C.

En el escenario 1_6, se trata de reducir la erosión laminar, mediante la implementación de sistemas agroforestales en usos de cultivo y sistemas silvopastoriles en usos de potrero, a nivel subcuenca. Entonces aquí los usos de cultivos y potreros son mejorados a través de sistemas que a priori disminuirían la erosión laminar, pero que esta hipótesis será verificada con la estimación de la erosión. Los demás usos se mantienen con sus respectivos factor C.

Estos escenarios fueron seleccionados para la simulación por el grado de incidencia que puede tener el productor sobre cada uno de ellos. Por ejemplo, las actividades agropecuarias pueden ser implementadas y manejadas con diversas técnicas de manejo y conservación de suelo. Esta implementación muchas veces se la realiza en áreas donde la capacidad de uso de suelo no es la adecuada, en pendientes muy pronunciadas o en áreas no aptas para la agricultura y la ganadería, incumpliendo en algunos casos, los regímenes legales de uso y conservación de los recursos naturales.

3.2.2 Estimación de la erosión potencial y sedimento en diferentes escenarios

Se estimó la erosión potencial laminar y sedimento para cada uno de los escenarios planteados según el acápite anterior. Para la ejecución de estos escenarios en el modelo CALSITE, se procedió primeramente a estimar la erosión potencial laminar y luego se estimó el sedimento, mediante la calibración. A continuación se describe el procedimiento para estimar la erosión potencial y sedimento, la misma está dividida en tres fases: generación de los datos de entrada, modelización y calibración.

3.2.2.1 Alimentación del programa

Es muy importante crear un archivo de información del proyecto, que contenga los nombres de todas las imágenes de insumo y otros datos necesarios para que CALSITE realice sus rutinas. Todos los mapas que CALSITE utiliza deben ser listados, con el nombre de acuerdo a la función en la rutina. Las imágenes que se generen también deben tener establecido un nombre. A continuación se mencionan las imágenes de entrada que se utilizaron en la modelización con el CALSITE:

- a) Imagen factor R
- b) Imagen factor K
- c) Imagen factor CP
- d) Imagen de cobertura
- e) Imagen MED
- f) Imagen pendiente
- g) Imagen de precipitación
- h) Imagen ríos

i) Imagen subcuenca

a) Imagen del factor R

El mapa del factor R se obtuvo a partir de los datos del factor R para 32 estaciones de la cuenca alta del río Reventazón, calculados y analizados por Gómez Delgado (2002).

Para obtener los factores R, según el método de Wischmeier y Smith (1978), denominado método de EI₃₀, Gómez Delgado (2002) desarrolló el programa Lluvias Erosivas, en conjunto con el Área de Apoyo Informático del C.S. Estudios Básicos del Instituto Costarricense de Electricidad.

El programa toma como insumo las alturas de precipitación (mm) y el tiempo asociado (min) que se encuentran tabuladas en la base de datos de un sistema hidrológico (ICE). Los registros de precipitación se consideran instantáneos (en tormentas muy intensas se cuenta con un dato cada minuto). A partir de esta información se calcula la intensidad instantánea I (mm/hr) para cada lapso registrado y su respectiva energía instantánea E_c (MJ/ha mm), por medio de la ecuación expuesta anteriormente:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \times \log_{10}(I)$$

El proceso continúa al multiplicar cada energía por la correspondiente altura de precipitación *h*. Posteriormente todas las energías dentro de una tormenta se suman, con lo que se determina la energía total de la lluvia E (MJ/ha).

$$E = \sum E_c \times h$$

Para el cálculo de la erosividad es necesario conocer el lapso de intensidad máxima de precipitación en 30 minutos. El programa Lluvias Erosivas hace cálculos de intensidad con base en ese lapso, tomando como momento de inicio cada uno de los registros de manera iterativa. Al finalizar de evaluar todos los lapsos de 30 minutos posibles dentro de una tormenta, el programa conserva la mayor intensidad I₃₀ (mm/h) que se calculó.

El producto de E por I₃₀ dividido entre 100 produce el valor del índice EI₃₀ para esa tormenta (en MJ·mm/ ha h). El factor R es de plazo anual, por lo que todas las erosividades de las lluvias escogidas deben agregarse para luego promediarlas y obtener un factor R anual.

Gómez Delgado (2002) analizó 5167 tormentas con características erosivas para la cuenca del río Reventazón; con estos valores realizó una interpolación geoestadística por “kriging” para la cuenca alta del río Reventazón. De esta manera aseguraba la estabilidad de los datos en el ámbito de la subcuenca del río Birris. Luego extrajo el ráster de valores de Factor R correspondiente a la subcuenca para su evaluación en el modelo.

El programa CALSITE requiere que la imagen esté en formato byte, real o entero. El formato entero se puede utilizar si los valores de R no superan 32767, en este estudio se utilizó el formato entero. Los valores del factor R van de 9000 a 27001 y están en Mj mm/ha h año.

b) Imagen del factor K

Este factor se obtuvo de Marchamalo (2004) quien con base en un mapa de suelos 1:50000, proporcionado por el ICE (1999), y muestreo de 11 calicatas, determinó el factor K. De estos 11 muestreos de suelos 9 corresponden a Hapludand (situados en la parte central y occidental de la cuenca) y 2 a Hydrudand (situados al este). No se dispuso de calicatas de suelos Udivitrand, característicos de las cercanías al cono volcánico del Irazú.

Para el cálculo del factor K, Marchamalo (2004) aplicó las siguientes fórmulas en base a los datos de las 11 calicatas:

- Nomograma de Foster (1981)

$$K = 10^{-7} \times 2.8 \times M^{1.14} (12 - a) + 4.3 \times 10^{-3} (b - 2) + 3.3 \times 10^{-3} (c - 3)$$

Donde:

$$\frac{t}{ha} \cdot \frac{ha \cdot h}{MJ \cdot mm}$$

K = factor de erodabilidad en

M = (porcentaje de limo + porcentaje de arena muy fina) · (100 - porcentaje de arcilla)

A = porcentaje de materia orgánica

B = código de la estructura del suelo (1: granular muy fina, 2: granular fina; 3: granular media/gruesa y 4: masiva, bloques o laminar)

c = código de la permeabilidad del suelo (1: rápido; 2: moderado a rápido; 3: moderado;

4: lento a moderado; 5: lento; 6: muy lento)

-Ecuación de El-Swaify y Dangler para suelos volcánicos en Hawaii (1977):

$$K = -0,03970 + 0,00311 x_1 + 0,00043 x_2 + 0,00185 x_3 + 0,00258 x_4 - 0,00823 x_5$$

Donde:

$$\frac{t}{acre} \cdot \frac{acre \cdot h}{100 ft \cdot t \cdot inch}$$

K = erodabilidad en

x₁ = fracción de agregados inestables menores de 0,250 mm (%)

x₂ = (limo modificado) x (arena modificada)

x₃ = % saturación de bases en el suelo

x₄ = limo (%)

x₅ = arena modificada (%)

- Ecuación de Romkens et ál. (1986)

$$K = 0,0035 + 0,0388x \exp \left[-0,5x \left(\frac{\log D_g + 1,519}{0,7584} \right)^2 \right]$$

Donde:

D_g = es la media geométrica de los diámetros de las partículas

Para el CALSITE la imagen del factor K puede ser creado a partir de la imagen de suelos mediante el uso de “*reclass Idrisi*” o cualquier otro programa que permita realizar este procedimiento. Alternativamente un formato byte puede ser utilizado por la imagen suelo como imagen del factor K, pero un archivo LUT debe ser creado para convertir los códigos de las clases de suelos en valores del factor K. Esta imagen puede estar en formato “*byte*” o real. En la presente investigación, este mapa está en formato real y sus valores son: 0,009 (Udivitrand), 0,011 (Hydrudand) y 0,019 (Hapludand), sus unidades son t ha h / ha Mj mm, en el sistema internacional.

c) Imagen del factor CP

En la actualidad se cuenta con tablas calibradas localmente, similares a las elaboradas por los mismos Wischmeier y Smith, que permiten asignar valores de *C* para diversos usos del suelo características de la zona. Pero en la presente investigación se utilizó los valores propuestos por Lianes (2008) para la subcuenca del río Birrís, la misma se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9. Valores del factor C para la subcuenca del río Birrís.

Cobertura		Factor C
Bosque	Bosque natural	0,003
	Bosque degradado	0,037
Pastos	Pasto de corta o pasto de siega	0,012
	Potrero carga normal	0,002
	Potrero degradado	0,002
	Potrero muy degradado	0,016
Cultivos permanentes	Potrero o pasto de diente	0,013
	Árboles frutales	0,003
Cultivos anuales	Papa-brócoli	0,260
	Papa-zanahoria	0,300
	Papa-zanahoria-papa	0,390
	Papa-papa-brócoli	0,390
	Papa-zanahoria-brócoli	0,360

Fuente: Lianes 2008.

Para calcular el factor C, Lianes (2008) utilizó tres coberturas principales: arbolados, pastos y cultivos. En total muestreó 20 parcelas, realizando cinco réplicas en cada parcela, para un total de 100 puntos de muestreo.

Estos tres tipos principales de cobertura, los caracterizó bajo los siguientes subtipos:

a) Cobertura arbórea

-Bosque natural

-Bosque degradado

b) Cobertura con pastos

-Pasto de corta

-Potrero o pasto de diente

c) Cobertura con cultivos

- Cultivo recién sembrado o plantado
- Cultivo después del aporcado
- Cultivo en plena cobertura
- Cultivo posterior a la cosecha

Para cada subtipo de cobertura vegetal, calculó los subfactores del factor C del modelo RUSLE, según la formulación de Renard et al (1997). Estos subfactores son: cubierta aérea (CC), cubierta del suelo (SC), rugosidad de superficie (SR), humedad del suelo (SM) y subfactor uso previo de la tierra (PLU). Los valores adimensionales de estos subfactores oscilan entre 0 y 1 y se multiplican para obtener el valor de relación de pérdida de suelo (SLR):

$$SLR = PLU * CC * SC * SR * SM$$

Posteriormente Lianes (2008) estimó el factor C promedio para cada uso de suelos, bajo la expresión de (Renard et ál. 1997):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} SLR_i \cdot EI_i}{EI_t}$$

Donde:

C = valor anual promedio del factor C

SLR_i = valores de la relación de pérdida de suelos para el período i

EI_i = porcentaje de erosividad anual que ocurre durante este período

n = número de períodos considerados

EI_t = erosividad total anual (R)

Para los usos sistemas agroforestales y silvopastoriles, se le asignó un factor C de 0,086 y 0,002 respectivamente. El uso cultivo-pasto, también es mejorado con la combinación de estos dos sistemas, donde el factor C 0,044 resulta del promedio de ambos. Los valores del factor C para cada uso de suelo Lianes (2008),

El CALSITE requiere que esta imagen esté en formato “byte” o real y los valores oscilan entre 0 y 1. En el presente estudio este mapa está en formato real, utiliza un “LUT” diferente para cada escenario, para convertir los códigos de los usos de suelo en factor CP.

A falta de información espacial sobre la extensión de las prácticas de conservación de suelos en la subcuenca del río Birrís, se asignó un valor unitario al factor P para todos los usos en el área de estudio.

d) Imagen de cobertura

Este mapa se obtuvo de marchámalo (2004). La cobertura de suelos se utiliza para proporcionar información sobre el cultivo (C) y prácticas de conservación (P) para el cálculo de la erosión del suelo. Esta imagen produce el factor CP.

e) Imagen del Modelo de Elevación Digital (MED)

La imagen del MED 30 Crtm se la obtuvo del atlas de Costa Rica (2008), el cual se procesó en el programa Arcview 3.3, para luego trasladarlo al Idrisi formato CALSITE. Este mapa se transformó a formato “byte” para ser aplicado posteriormente. El rango de elevación en metros en toda la cuenca va de 1255 a 3404 m y en formato “byte” de 0 a 255.

f) Imagen de pendiente

El mapa de pendiente resulta del MED anterior, de igual forma se trabajó en el Arcview 3.3, para luego ser trasladado al Idrisi formato CALSITE. Este mapa pendiente se trabajó en % y puede estar en formato real, entero o “byte” para ser aplicado en el CALSITE. En la presente investigación este mapa se trabajó en formato real y el rango de pendiente va de 0 a 188,7%, pero en el CALSITE como “pendiente máxima” se aplicó 100%.

g) Imagen de precipitación

El mapa de precipitación se obtuvo de Marchamalo (2007) en formato real. Este mapa es necesario para la estimación de volúmenes de flujo de suelo como parte de los cálculos del índice de entrega (DI).

Este mapa se obtiene a partir del mapa de isoyetas, previa transformación en el programa *Idrisi Intercon*. Si los datos de precipitación consiste únicamente en los registros de estaciones meteorológicas, existe entonces la posibilidad de crear una imagen de precipitación a partir de *Idrisi Interpol* o *Thiessen*

La imagen final de precipitación en mm debe estar en formato real o entero. En la presente investigación este mapa se trabajó en formato entero y los valores de precipitación en la subcuenca varían de 1059 a 2382 mm.

h) Imagen de ríos

Esta imagen fue obtenida igualmente de Marchamalo (2007). Esta imagen se utiliza para la determinación de la capacidad de transporte mínimo inicial de flujo, hasta llegar a un arroyo. Esta imagen es fijado a un valor de 1.

i) Imagen de subcuenca

CALSITE permite la calibración de hasta ocho subcuencas. Estas subcuencas se pueden anidar, es decir cuando una subcuenca se encuentra dentro de otra, puede ser separado de captación dentro de la cuenca principal. La imagen de captación consiste en un archivo de mapa “bits”, en donde el número de pixeles indica el número de subcuencas. La cuenca es un todo, debe ser siempre la primera zona que figuran en la información de archivo de proyecto y debe tener un valor de 1.

3.2.2.2 Modelización con CALSITE

Una vez definidos los datos de entrada, se procede secuencialmente a la simulación de la erosión y sedimento, con respecto a las opciones que ofrece CALSITE. La figura 15 muestra los principales componentes del menú de simulación.

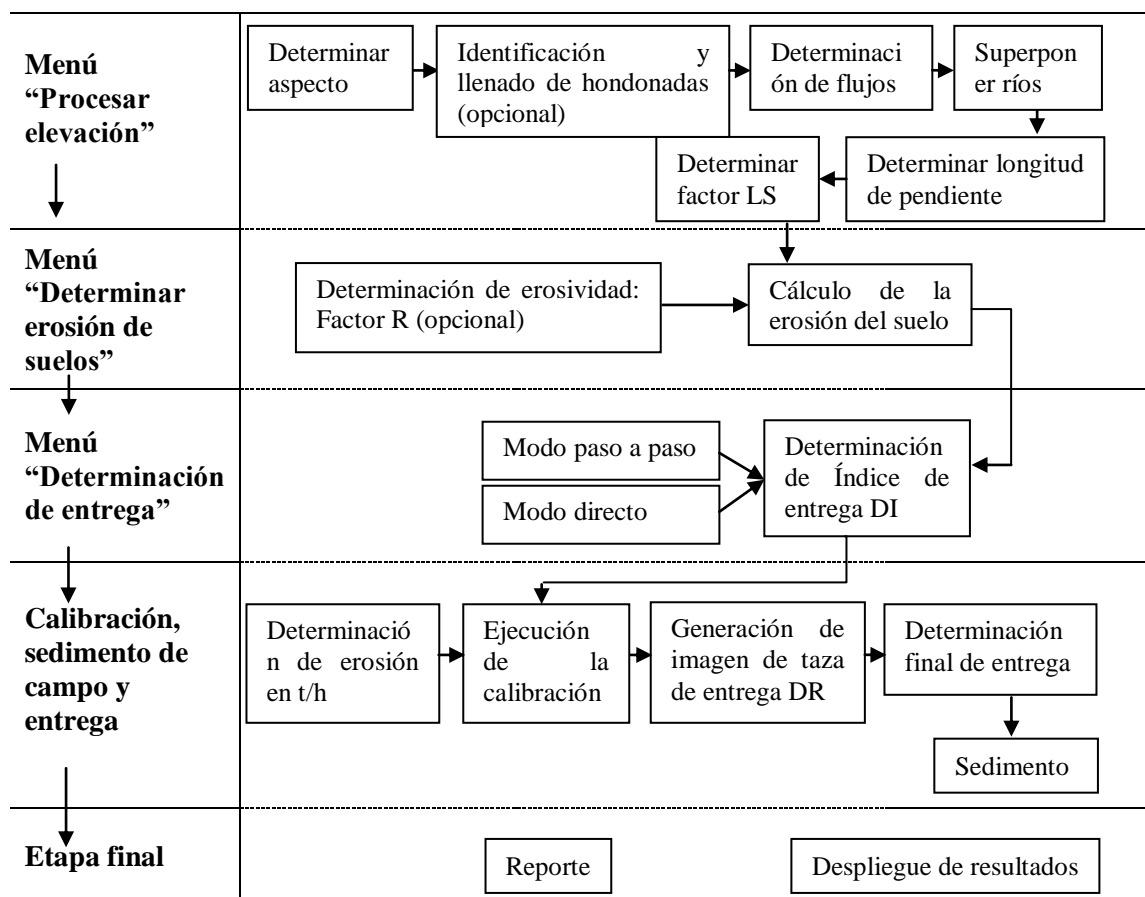


Figura 15. Diagrama de flujo de rutinas del programa CALSITE

El menú de procesamiento de elevación (*Process Elevation Menu*) permite la creación de las imágenes de aspecto, acumulaciones de flujo, longitud de pendientes y factor LS, así como la utilización de técnicas para identificar y llenar automáticamente las hondonadas o barrancos en la imagen de elevación. Todo lo anterior se genera tomando como base el modelo de elevación digital.

a) Obtención del mapa del factor LS

El mapa del factor LS se obtiene a partir del procesamiento del MED, que incluye seis pasos:

- Determinación de imagen de aspectos
- Identificación de hondonadas (vacíos)
- Determinación de flujos
- Sobreposición de ríos
- Determinación de la longitud de la pendiente
- Determinación del factor LS

a.1) Determinación del aspecto

De acuerdo a Bradbury (1995) el aspecto de cada píxel es definida en base a la elevación de las cuatro esquinas de ese píxel. La imagen de aspecto, creado a partir de la imagen del MED, ofrece una medida el aspecto de cada píxel usando la ecuación:

$$\text{ASPECTO} = \frac{\text{valor del píxel} - 128}{30}$$

Donde:

ASPECTO está expresado en radianes

a.2) Determinación de la imagen de flujos

Las rutas de flujo para cada píxel se determinan utilizando la imagen de aspecto para crear una imagen que muestra el número de la convergencia de los flujos en cada lugar de píxeles. La imagen de los flujos se utiliza para dos fines: en primer lugar como un medio para estimar la longitud de la pendiente, en segundo lugar, es necesaria para el cálculo del índice de entrega (Bradbury 1995).

El algoritmo para determinar el flujo utiliza el aspecto de un píxel para determinar el punto de salida del flujo a lo largo de uno de los píxeles de cuatro lados. Entonces repetidamente calcula los puntos de entrada para cada píxel sobre el que posteriormente pasa el flujo (Bradbury 1995).

a.3) Sobreposición de los ríos

Se realiza a fin de tener en cuenta sobre las corrientes que terminan a lo largo de valles en suaves pendientes de las corrientes digitalizados. Esta operación debe ser realizado antes de determinar la longitud de la pendiente y el índice de entrega (Bradbury 1995).

a.4) Determinación de la longitud de la pendiente

La longitud de la pendiente que contribuye al flujo de tierra encima de cada píxel tiene que ser estimado en el cálculo de la erosión del suelo de ese píxel. Un píxel en la cima de una colina, es probable que tengan las tasas de erosión del suelo más bajo que píxeles en la parte inferior de un cerro, debido a la mayor erosión de un riachuelo, asociada con un mayor flujo de tierra. La longitud de la pendiente es difícil determinar a partir de mapas topográficos. Algunos investigadores prefieren asumir como una constante la longitud de la pendiente para realizar mapas de riesgos de erosión. CALSITE tiene la opción de asumir una longitud constante de la pendiente en la determinación del factor LS de la USLE (Bradbury 1995).

El método utilizado para estimar la longitud de la pendiente se basa en el tamaño de la zona de contribuyentes. Los valores de la imagen de las acumulaciones de flujo muestra el número de píxeles cuyo flujo ruta convergen en este punto. Así, un valor de 50 indica que el tamaño de la zona que contribuye es de 50 píxeles (Bradbury 1995).

La fórmula para el cálculo de la longitud de la pendiente es:

$$L = \frac{(FXY)^{0.5}}{\pi}$$

Donde:

L = Longitud de la pendiente en metros

F = Número de rutas de flujo contribuyente

X = Dimensión Este – Oeste de los píxeles en metros

Y = Dimensión Norte – Sur de los píxeles en metros

El algoritmo de CALSITE requiere de una pendiente máxima permisible, que es asumida y fijada por el usuario. En esta investigación se asumió como una longitud máxima permisible de 179,8 m, que fue fijada por CALSITE. También se considera esta longitud como el término promedio donde el flujo puede tener la capacidad de arrastrar el suelo erosionado, por estabilización de la variación en pendiente y topografía en la subcuenca de estudio.

a.5) Determinación del factor LS

El factor LS de la USLE se basa en dos imágenes: la longitud de la pendiente (factor L), y la gradiente de la pendiente (factor S), un factor constante de longitud de la pendiente puede ser utilizada de modo que sólo la imagen de la pendiente se utiliza para determinar la imagen de los factores LS. Un porcentaje de pendiente máxima permisible se puede establecer en el cálculo del factor LS, a fin de excluir pendientes muy pronunciadas, que pueden presentarse en el MED (Bradbury 1995).

El factor LS se calcula mediante las ecuaciones:

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right)^{0.5} \times ((10.8 \cdot \text{sen} \theta \oplus 0,03)) \text{ para } \theta < 5.143^\circ$$

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right)^{0.5} \left(\frac{\text{sen}(\theta)}{\text{sen}(5.143^\circ)} \right)^{0.6} ; \text{ para } \theta \geq 5.143^\circ \text{ o } 9\%$$

Donde:

L = Longitud de la pendiente en m

θ = Ángulo de la pendiente en grados

Una vez que se cuenta con el factor LS, se procede a seleccionar las opciones en el Menú de Erosión de Suelo (*Soil Erosion Menu*). Este incluye, entre sus opciones más importantes, la determinación de la erosividad de la lluvia y la determinación de la erosión de suelo. La última función se encargará de generar el valor A, o sea, la erosión de suelos en la subcuenca de estudio, en t/ha, con base en la USLE, que tiene la siguiente fórmula :

$$A = R \times K \times LS \times CP$$

El siguiente menú que debe emplearse, dentro de la secuencia básica de CALSITE, es el de determinación de entregas (*Delivery Determination Menu*). En esta opción es indispensable contar con las siguientes imágenes: flujos, pendiente, precipitación, erosión de suelo y subcuenca.

El proceso de modelización con CALSITE incluye las siguientes fases (Figura 16):

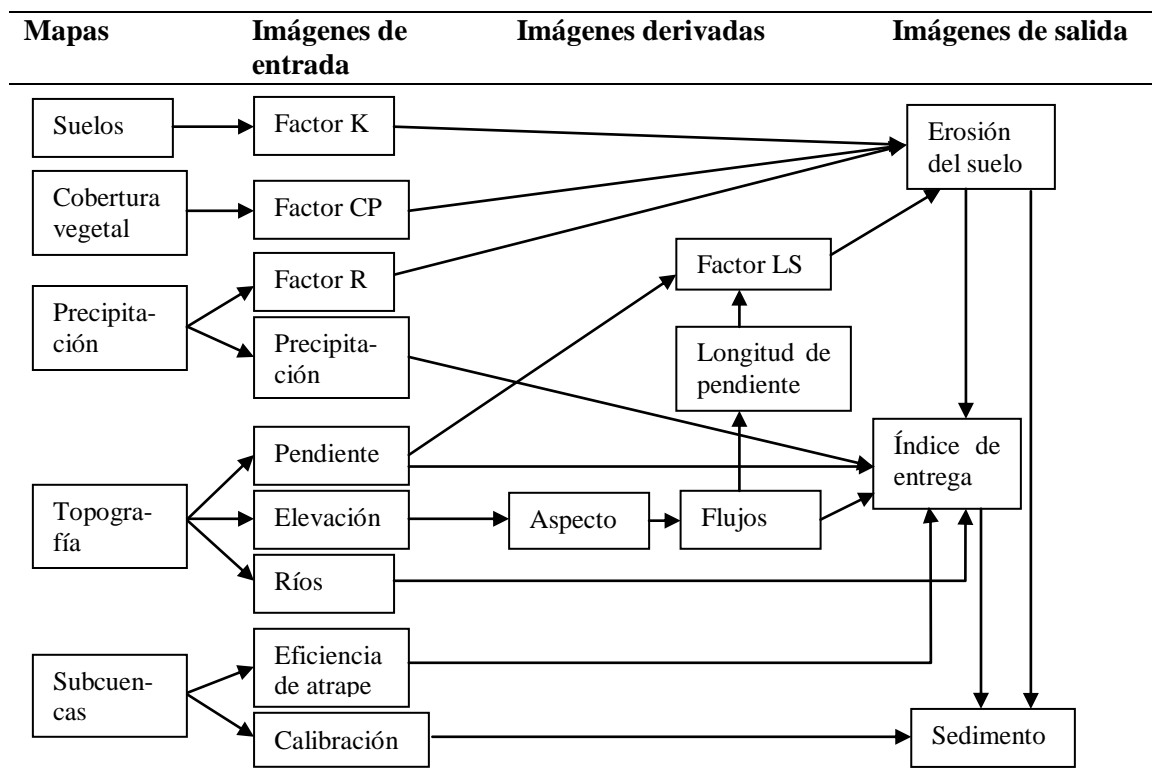


Figura 16. Diagrama de flujo de CALSITE

3.2.2.3 Calibración y estimación de sedimento

Se procede una vez que la erosión del suelo y las imágenes de índice de entrega se han creado. Así, el menú de calibración (*Calibration Menu*) permite la ejecución de esta rutina, generando un archivo LUT de índice de entrega con el fin de convertir estos valores en una imagen de tasa de entrega, necesarios para el cálculo del sedimento de campo.

En la presente investigación para la calibración, se utilizó como sedimento observado (sedimento de campo) el valor de 48,8 t/ha/año. Este dato se tomó de la investigación de Marchamalo (2007) quien tomó previamente los datos de sedimentos de la cuenca del río Reventazón de la tesis de Gómez Delgado (2002) y luego de probar diversos escenarios en los que suponía diversos porcentajes de sedimentos masivos y laminares (0:100, 10:90, 20:80), llegó a una calibración satisfactoria suponiendo que el 20% del valor propuesto inicialmente (61 t/ha/año) provenía de movimientos masivos. Entonces, el otro 80% menciona proviene de fuentes laminares: esos son las 48,8 t/ha/año que se utilizó en esta investigación y es solamente sedimento de campo producido por erosión laminar, los otros restantes tipos de erosión de suelos como surcos, cárcavas y deslizamientos no incluyen en esta calibración ni en esta investigación en su conjunto.

La calibración se la realizó únicamente en el escenario base; para los otros escenarios se trabajó solo con el mapa de tasa de entrega (DR). Este mapa, a través de la tasa de entrega, estimó la producción de sedimento para los siguientes escenarios y ya no se realizó la calibración.

Una vez que se realiza la calibración, CALSITE crea un reporte, que contiene un valor de Chi cuadrado (χ^2), como resultado de dicho proceso. Entre menor sea el χ^2 , mejor la

estimación. Este valor deberá utilizarse en una tabla dada por los fabricantes del programa, en la cual, para un número dado de cuencas de calibración (n) y un valor de χ^2 se indica en qué proporción de casos P, ese χ^2 será excedido. Un valor P igual o mayor que 0,05 indica que la relación establecida puede considerarse significativa y el ajuste es bueno, y si P es igual o menor que 0,01 indica que no hay relación entre los valores observados y estimados y el ajuste es pobre (Cuadro 10).

Cuadro 10. Valores de referencia χ^2 .

Ajuste	Muy bueno	Bueno	Moderado	Pobre
n	P = 0,10	0,05	0,02	0,01
1	2,71	3,84	5,41	6,63
2	4,60	5,99	7,82	9,21
3	6,25	7,82	9,84	11,34
4	7,78	9,49	11,67	13,28
5	9,24	11,07	13,39	15,09
6	10,65	12,59	15,07	16,81
7	12,02	14,07	16,62	18,48
8	13,36	15,51	18,17	20,09

Fuente: Bradbury 1995.

Al finalizar el uso de todos los anteriores menús y la calibración, la opción Determinar Sedimento de Campo (*Determine Sediment Yield*) se aplicó para determinar el sedimento producido y su ecuación es:

$$SY = DR \times A$$

Donde:

SY = Sedimento de campo (t/ha/año)

DR = Tasa de entregas (valor adimensional comprendido entre 0 y 1)

A = Tasa de erosión del suelo (t/ha/año)

3.2.3 Estimación de la pérdida de COS por erosión potencial y sedimento en diferentes escenarios

Se estimó el contenido, pérdida y la retención de COS en 10 cm de profundidad de suelo para cada uno de los escenarios planteados. Para la ejecución de estos escenarios en el modelo CALSITE, se procedió primeramente a estimar la erosión, sedimento y luego se estimó el contenido del COS, para estimar su pérdida y su retención en cada uno de los escenarios planteados de los sistemas de producción hortícola y ganadera. Si bien el modelo estima la pérdida potencial de suelo por erosión laminar, sedimento y a partir de esta información se calcula el COS que también se pierde, el resultado que interesa en la simulación es el COS que

se deja de perder (retiene), bajo diferentes escenarios de manejo de la cobertura de suelo en los dos sistemas de producción (hortícola y ganadera), ya que servirá de fundamento para un posible incentivo o pago por servicio ambiental carbono, por contribuir a su almacenamiento en el suelo. A continuación se describe el procedimiento para estimar el COS, desde el levantamiento de muestras, análisis en laboratorio, hasta su estimación.

3.2.3.1 Marco muestral

Generalmente, las concentraciones de carbono orgánico del suelo son más altas en su capa superior y disminuyen exponencialmente conforme aumenta la profundidad. Se recomienda medir el depósito de carbono del suelo a profundidades de por lo menos 30 cm, dividiendo esta en tres horizontes (0-10, 10-20, 20-30 cm) (Rügnitz et ál. 2009). Pero en esta investigación solo se evaluará de 0-10 cm, debido a que en este horizonte es donde se encuentra el mayor depósito de carbono y además es donde se produce la mayor tasa de erosión hídrica laminar y por consiguiente la pérdida de carbono.

Para estudio a nivel de detalle y tratar de que exista mayor representatividad y variabilidad a nivel subcuenca en la toma de muestras, se realizó un muestro estratificado con base a la pendiente del relieve, estratificándose en siete rangos de pendientes en coberturas cultivo y potrero. Esta estratificación se la realizó mediante la reclasificación del mapa de pendiente en porcentaje, con base al Decreto N° 23214-MAG-MIRENEM de la Metodología de determinación de la Capacidad de Uso de Tierras de Costa Rica, donde el número de muestras por rango proviene de la multiplicación de la cobertura versus la pendiente reclasificada en el Arcview. En el siguiente cuadro 11 se muestra el procedimiento para estimar el número de muestra.

Cuadro 11. Procedimiento para la estimación del número de muestras.

Cobertura	Pendiente (%)	Área (ha)	Área (%)	Nº muestras
Cultivo	0-3	10,16	0,64	0,26
	3-8	1,39	0,09	0,04
	8-15	6.51	0,41	0,16
	15-30	178,72	11,31	4,52
	30-50	567,48	35,90	14,36
	50-75	417,01	26,38	10,55
	> 75	397,31	25,13	10,05
Potrero	0-3	2,71	0,25	0,07
	3-8	0,59	0,05	0,02
	8-15	3,12	0,29	0,09
	15-30	77,24	7,07	2,12
	30-50	309,85	28,37	8,51
	50-75	345,60	31,64	9,49
	> 75	351,49	32,18	9,65

En este cuadro se puede observar que cada rango o clase de pendiente tiene su respectiva área en ha y en %, en relación al área total de cada cobertura; de ahí surge el número de muestra por clase de pendiente. El área total a nivel subcuenca en formato “*shape*” de la

cobertura cultivos es de 1580,87 ha y de potrero es de 1092,18 ha. A continuación se menciona el procedimiento del cálculo para determinar el número de muestras del cultivo y potrero:

$$N^{\circ} \text{ muestra (cultivo)} = \frac{\% \text{ área} \times 40}{100}$$

$$N^{\circ} \text{ muestra (potrero)} = \frac{\% \text{ área} \times 30}{100}$$

Donde:

40 = Número de muestras de cultivos, fijado por factores económicos y tiempo

30 = Número de muestras de potrero, fijado por factores económicos y tiempo

Como se puede observar en el cuadro anterior, las tres primeras clases de pendiente es decir, 0-3%, 3-8% y 8-15% no alcanzan a la unidad para la toma de muestras. Teniendo esta situación se decidió compensar las clases superiores, para poder llegar a la unidad de las clases mencionadas, quedando sus números de muestras de las clases superiores reducidas en uno. En el cuadro 12 se menciona el número de muestras definitivas, con la cual se procedió al levantamiento de las muestras de COS en campo.

Cuadro 12. Número de muestras tomadas en función de la pendiente del relieve.

Cobertura	Clasificación de pendiente en %							N° muestras
	0 – 3	3 – 8	8 - 15	15 – 30	30 - 50	50 – 75	>75	
Cultivos	1	1	1	4	13	10	10	40
Potreros	1	1	1	2	8	8	9	30
Total	2	2	2	6	21	18	19	70

Donde:

1. Plano o casi plano = 0 a 3%
2. Ligeramente ondulado = 3 a 8%
3. Moderadamente ondulado = 8 a 15%
4. Ondulado = 15 a 30%
5. Fuertemente ondulado = 30 a 60%
6. Escarpado = 60 a 75%
7. Fuertemente escarpado = Más de 75%

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, se tomaron 70 muestras compuestas de manera sistemática para determinar COS, 30 en fincas dedicadas a la ganadería de leche y 40 en fincas dedicadas a la producción hortícola. Cada muestra fue compuesta de 10 submuestras (Figura 17) extraídas de forma sistemática dentro de las fincas de producción hortícola y ganadera. Este muestreo sistemático de fincas dentro de la subcuenca asegura abarcar toda la variabilidad existente en la misma. El muestro sistemático produce los mismos errores estándar que el muestro aleatorio simple cuando no hay patrón de distribución, e incluso menor error estándar si hay un gradiente, suposición lógica por tratarse de una subcuenca.

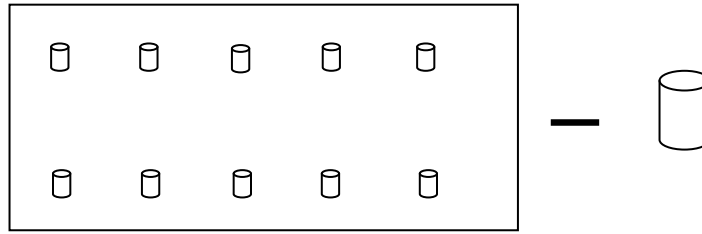


Figura 17. Finca de producción (hortícola o ganadera) para muestreo de COS.

De acuerdo a Mostacedo y Fredericksen (2000) el muestreo sistemático permite detectar variaciones espaciales y puede realizarse a partir de un punto determinado al azar, del cual se establece una cierta medida para medir los subsiguientes puntos. Este tipo de muestreo, a diferencia del muestreo aleatorio, se puede planificar en el mismo lugar donde se realizará el estudio y la aplicación del diseño es más rápida.

3.2.3.2 Estimación del COS en laboratorio

Luego de recolectadas las muestras, fueron adecuadamente identificadas, manejadas y trasladadas al laboratorio de análisis de suelo, tejidos vegetales y aguas del CATIE, para la determinación del COS. Para determinar el contenido de COS, el laboratorio utilizó el método de combustión total. Este método se desarrolla de la siguiente manera:

- Previo al análisis se digiere con HCl 1+1 para la eliminación de carbonatos.
- Se seca la muestra a 70 °C y se realiza el análisis de carbono total.
- El dato que se reporta como % CO corresponde al valor de % MO dividido por un factor de 1,724.

$$\% \text{ CO} = \frac{\% \text{ MO}}{1,724}$$

Donde:

%CO = Contenido de carbono orgánico en %

%MO = Contenido de materia orgánica en %

1,724 = Factor de Van Bemmelen, el cual considera que la materia orgánica contiene un promedio del 58% de carbono.

3.2.3.3 Estimación del contenido, pérdida y retención de COS

Una vez determinado la erosión potencial y sedimento de cada escenario, los cálculos de contenido, pérdida y retención de COS se estimaron por regla de tres simples, considerando tres valores: mínimo, medio y un máximo de %COS, determinado en las muestras tomadas en las fincas de producción hortícola y ganadera. En cuanto al análisis estadístico para determinar los valores de %COS mínimo, promedio y máximo de las muestras analizadas en laboratorio, se realizó una análisis de varianza ANOVA en el Infostat, bajo la teoría de los modelos mixtos, donde al 95% de nivel de confianza, se encontró de que sí hay diferencias

significativas en el %COS entre las coberturas cultivo y pasto, con una probabilidad de ($F_{5,1,28}=19,69$, $p<0.0001$) y los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 13. Porcentaje COS por cobertura.

Cobertura	% COS (mínimo)	% COS (promedio)	% COS (máximo)
Cultivo	5,1	5,66	6,21
Potrero	7,09	8,73	10,38

Una vez que se determinó los valores mínimo (límite inferior), promedio y máximo (límite superior), se procedió a estimar el contenido, pérdida y retención del COS a través de una regla de tres simples. Estos se estimaron a nivel subcuena de las coberturas en estudio (cultivo y potrero) en t/año y a nivel hectárea, siempre de las coberturas en estudio (cultivo y potrero) en t/ha/año. A continuación se menciona el procedimiento para los cálculos.

a) Contenido de COS

Teniendo como base que se muestreó COS hasta 10 cm de profundidad, entonces se calculó el contenido de COS para esa profundidad; para ello se utilizó un factor de densidad aparente para suelos andisoles. Este dato se recopiló de la investigación que realizó Alvarado et ál. (2005), donde estimó la variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica, donde obtuvo como promedio una densidad aparente de $0,87 \text{ g/cm}^3$. Con este dato y utilizando la fórmula de Llanderal (2006) se estimó el contenido de COS mínimo, promedio y máximo para el uso de suelo cultivo y potrero en cada escenario.

$$\text{Carbono en suelo (tC/ha)} = \text{CC} * \text{DA} * \text{P}$$

Donde:

P = profundidad de muestreo en cm

CC = Contenido de carbono (%)

DA = Densidad aparente (g/cm^3)

Los cálculos se realizaron, como se mencionó anteriormente, a nivel subcuena de las coberturas en estudio (cultivo y potrero) en t/año y a nivel hectárea siempre de las coberturas en estudio (cultivo y potrero) en t/ha/año.

b) Pérdida de COS

La pérdida de COS se estimó por regla de tres simples utilizando también el valor mínimo, promedio y máximo del %COS. Se estimó para cada escenario la pérdida de COS por sedimento a nivel subcuena en t/año y lo que se pudiera perder por erosión potencial también a nivel subcuena en t/año, luego se calculó a nivel hectárea para ambos casos (sedimento y erosión potencial) siempre de las coberturas en estudio (cultivo y potrero) en t/ha/año. Para ello se emplearon las siguientes fórmulas:

Fórmula para COS perdido por sedimento a nivel subcuenca:

$$\text{COS (t/año) que se pierde} = \frac{\text{sedimento (t/año)} \times \text{COS (\%)}}{100\%}$$

Fórmula para COS que se pudiera perder por erosión laminar a nivel subcuenca:

$$\text{COS (t/año) que se pudiera perder} = \frac{\text{Erosión (t/año)} \times \text{COS (\%)}}{100\%}$$

Fórmula para COS perdido por sedimento a nivel hectárea:

$$\text{COS (t/ha/año) que se pierde} = \frac{\text{sedimento (t/ha/año)} \times \text{COS (\%)}}{100\%}$$

Fórmula para COS que se pudiera perder por erosión laminar a nivel hectárea:

$$\text{COS (t/ha/año) que se pudiera perder} = \frac{\text{Erosión (t/ha/año)} \times \text{COS (\%)}}{100\%}$$

c) Retención de COS

La retención o COS que queda después de la pérdida por sedimento y erosión potencial, no es nada más que la diferencia entre el contenido y la pérdida de COS. Se estimó también utilizando el valor mínimo, promedio y máximo del % COS. Se estimó para cada escenario la retención de COS por sedimento a nivel subcuenca y lo que se pudiera retener por erosión potencial también a nivel subcuenca en t/año, luego se calculó a nivel hectárea para ambos casos (sedimento y erosión potencial) siempre de las coberturas en estudio (cultivo y potrero) en t/ha/año. Se procedió con base a la siguiente relación:

Relación para COS retenido y que se pudiera retener a nivel subcuenca (total):

$$\text{COS (t/año)} = \text{CCOS (t)} - \text{COS (t/año) que se pierde y que se pudiera perder}$$

Relación para COS retenido y que se pudiera retener a nivel hectárea:

$$\text{COS (t/ha/año)} = \text{CCOS (t/ha)} - \text{COS (t/ha/año) que se pierde y que se pudiera perder}$$

Donde:

CCOS = contenido de COS a 10 cm de profundidad en coberturas cultivos y potreros

Que se pierde = COS que se pierde con sedimentos

Que se pudiera perder = COS que se podría perder con erosión potencial

3.2.4 Estimación del valor económico del COS que se dejaría y se deja de perder por erosión potencial y sedimento respectivamente, en diferentes escenarios

Se investigó los precios actuales en el mercado internacional por tonelada de CO₂eq, para estimar cuál sería el valor económico del contenido, pérdida, que se pudiera perder, retenido y que se pudiera retener del COS de las coberturas en estudio en cada escenario. El resultado de este cálculo permitió estimar cuál sería la compensación económica que debería de recibir por

hectárea, cada productor en función al manejo de sistemas de producción que más favorezcan el almacenamiento de carbono en el suelo (correspondientes a aquellos donde la erosión sea menor).

En la actualidad, existen dos vías disponibles para la acreditación de carbono: a) el mercado del carbono voluntario, y 2) el Mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) del Protocolo de Kioto. Cada vía tiene sus propias condiciones de elegibilidad y procesos de implementación de actividades que pueden luego obtener créditos de carbono.

Para la presente investigación se decidió acreditar carbono bajo los estándares del mercado voluntario no vinculante (OTC), por ser este flexible con las exigencias de mercado y además por la facilidad de que un propietario o grupos de propietarios pueden acceder directamente al mercado del carbono. Este mercado voluntario de carbono se refiere a todas las compras de créditos de carbono que no se rige por una disposición cumplimiento de las regulaciones existentes. Esto incluye las transacciones relativas a créditos creados específicamente para los mercados voluntarios (por ejemplo, reducciones de emisiones verificadas de carbono o de instrumentos financieros), así como transacciones en las que los proveedores venden créditos de regulación del mercado (como Reducciones Certificadas de Emisiones) a los compradores que buscan compensar voluntariamente sus emisiones (Ecosystem Marketplace 2010).

En el siguiente cuadro, se mencionan los precios por t CO₂eq en el mercado voluntario – OTC, que fue obtenido de Ecosystem Marketplace (2010) para las coberturas de cultivos hortícolas (suelo agrícola), potreros (ganadería) y sistemas agroforestales. Para el sistemas silvopastoril no se encontró un precio establecido, por lo tanto se decidió tomar el mismo precio que el de ganadería. Estos precios reflejan el promedio en que han sido transados en el 2009.

Cuadro 14. Precio promedio en US\$/t CO₂eq, en 2009.

Tipo de proyecto	Precio promedio US\$/t CO₂eq
Ganadería	5,7
Suelos agrícolas	1,2
Sistemas Agroforestales	5,2
Sistemas silvopastoriles	5,7

Fuente: Ecosystem Marketplace 2010.

Se estimó el valor económico (US\$) mínimo, promedio y máximo con base a los precios en US\$/t CO₂eq para el contenido, perdido (sedimento) o que se pudiera perder (erosión potencial), retenido (sedimento) o que se pudiera retener (erosión potencial), tanto a nivel subcuena y hectárea. Esto se estimó para cada escenario de producción hortícola y ganadera.

Las fórmulas empleadas se mencionan a continuación:

Fórmula para estimar el valor económico en US\$ del contenido de COS en 10 cm de profundidad, a nivel subcuena.

$$\text{Valor económico (US\$)} = (\text{CCOS t} \times 3,67) \times \text{Precio US\$}$$

Fórmula para estimar el valor económico en US\$/ha del contenido de COS en 10 cm profundidad, a nivel hectárea.

$$\text{Valor económico (US\$/ha)} = (\text{CCOS t/ha} \times 3,67) \times \text{Precio US\$}$$

Fórmula para estimar el valor económico en US\$ de COS perdido por sedimento y que se pudiera perder por erosión potencial a nivel subcuenca:

$$\text{Valor económico (US\$/año)} = (\text{COS t/año} \times 3,67) \times \text{Precio US\$}$$

Fórmula para estimar el valor económico en US\$ de COS perdido por sedimento y que se pudiera perder por erosión potencial a nivel hectárea:

$$\text{Valor económico (US\$/ha/año)} = (\text{COS t/año/ha} \times 3,67) \times \text{Precio US\$}$$

Fórmula para estimar el valor económico en US\$ de COS retenido por sedimento y que se pudiera retener por erosión potencial a nivel subcuenca:

$$\text{Valor económico (US\$/año)} = (\text{COS t/año} \times 3,67) \times \text{Precio US\$}$$

Fórmula para estimar el valor económico en US\$ de COS retenido por sedimento y que se pudiera retener por erosión potencial a nivel hectárea:

$$\text{Valor económico (US\$/ha/año)} = (\text{COS t/año/ha} \times 3,67) \times \text{Precio US\$}$$

Donde:

$$1 \text{ t COS} = 3,67 \text{ t CO}_2\text{eq (relación de peso molecular de CO}_2=44 / \text{C}=12)$$

CO₂eq: unidad comparativa entre los gases en relación con sus respectivos potenciales de calentamiento global. Como los gases de efecto invernadero afectan al clima de forma diferente, se creó el CO₂ equivalente como una “moneda de normalización”. El CO₂eq se calcula multiplicando la cantidad de emisiones de un determinado gas por su efecto en el clima. Por ejemplo: el metano tiene un impacto en el clima 21 veces mayor que el CO₂. Por lo tanto, 1 tonelada de metano corresponde a 21 toneladas de CO₂ equivalente. El Óxido Nitroso (N₂O) tiene un aporte al efecto invernadero (EI) de 310 veces superior al del CO₂.

Estas diferencias hicieron necesaria una forma de comparar el efecto de la reducción de emisiones de distintos GEI. Para esto se creó el concepto de CO₂ equivalente. Según esto, las emisiones de GEI distintos al CO₂ se calculan como la cantidad de CO₂ necesaria para producir un efecto similar (FAO 2002).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Uso de suelo de los escenarios de producción hortícola y ganadera

4.1.1 Escenario base 1_1: uso de suelo actual

Escenario base, se denomina al uso actual existente en la subcuenca (Figura 18). En este contexto, se ubica con mayor área actual, el uso de suelo cultivo con 1595,9 ha (33%), seguido por el uso bosque con 1394,5 ha (29%) y el uso potrero con 1096 ha (23%) (Cuadro 15).

La preparación del suelo y el establecimiento de las condiciones de producción del cultivo hortícola hasta su cosecha, se realiza en su mayor parte de forma mecanizada, sin o con escasas medidas de conservación de suelos. En cuanto al uso de suelo ganadero (potrero), el mismo está dedicado, principalmente, a la ganadería de leche. Este uso de suelo, al igual que la anterior, carecen de medidas que ayuden a la producción ganadera de manera sostenible, y de esta manera, traten de contrarrestar las causas que llevan al deterioro de los suelos, como el sobrepastoreo y la falta de cortinas arbóreas en curvas a nivel.

Los usos mencionados en el párrafo anterior, forma parte del estudio de COS, y los restantes cinco usos no forman parte, pero sí se estimó la erosión potencial y sedimento de cada uno de ellos. El uso de suelo bosque, corresponde principalmente, a bosque secundario y se ubica a los largo de las riberas de los ríos, manantiales y en zonas de mayor pendiente, donde no es posible cultivar. El charral se denomina al bosque secundario o bosque en regeneración, que también se ubica en áreas donde el cultivo o el pastoreo de ganado no es posible. Las áreas urbanas son los poblados existentes en la subcuenca. El cultivo-pasto son áreas donde se tienen establecidos ambos sistemas de producción, son áreas pequeñas. Las cenizas son las que se ubican en las faldas del volcán Irazú, sin actividades humanas.

Para los usos: cultivo, cultivo-pasto y potrero, se consideró el factor C para la etapa fenológica madura, o sea, no se consideró la etapa de establecimiento de las coberturas, en las que el comportamiento hidrológico del sistema puede ser muy variable.

Cuadro 15. Uso de suelos y áreas del escenario 1_1.

Uso de suelo	Área (ha)	Área (%)	Factor CP
Bosque	1394,52	28,82	0,003
Charral	47,12	0,97	0,037
Potrero	1096,24	22,66	0,013
Area urbana	78,88	1,63	0,002
Cultivo-pasto	619,76	12,81	0,040
Cultivo	1595,88	32,98	0,340
Cenizas	6,28	0,13	0,900
Total	4838,68	100,00	

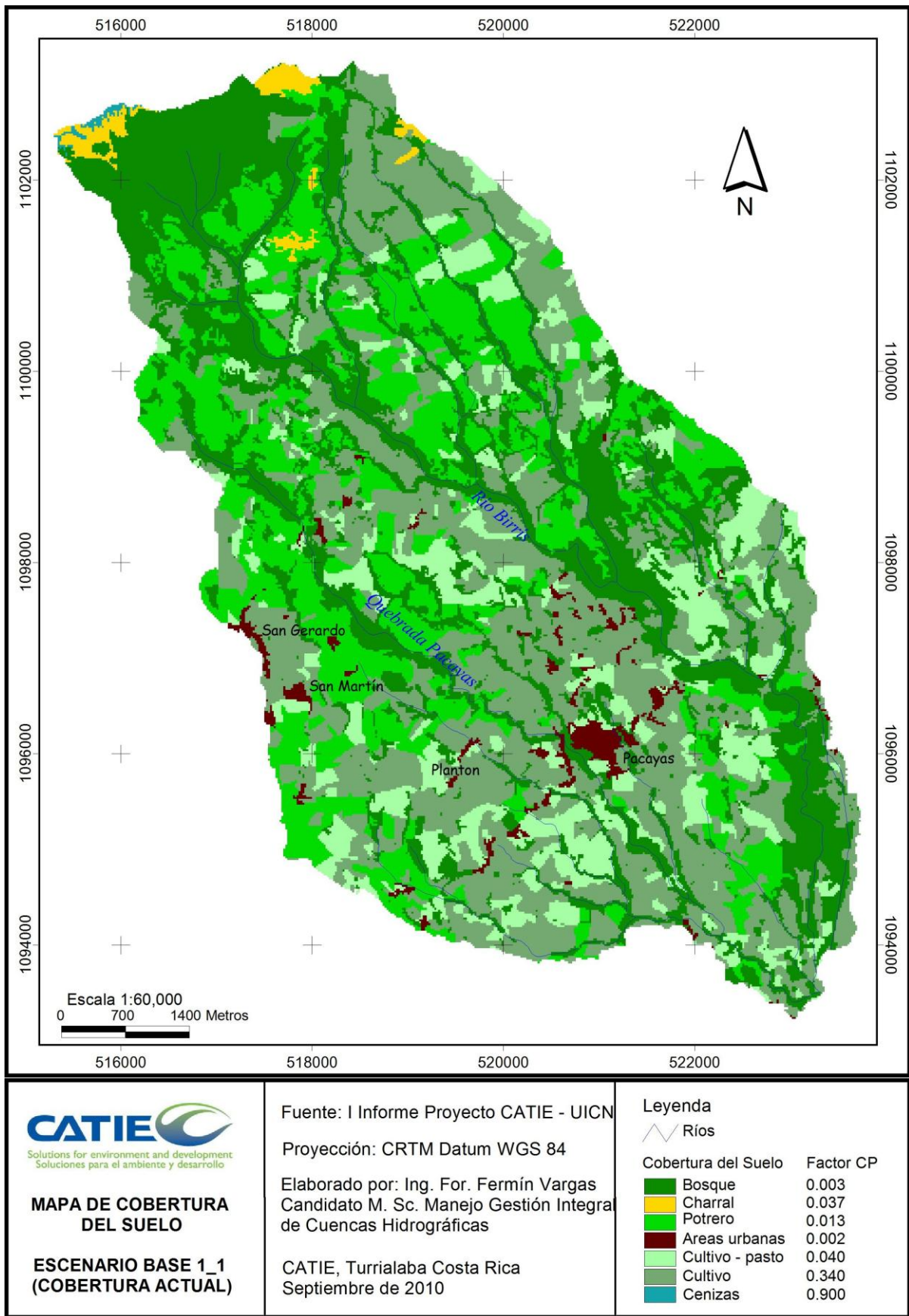


Figura 18. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_1.

4.1.2 Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero

En este escenario el uso de suelo cultivo – pasto (mixto), pasa a convertirse en el uso de suelo potrero y a ocupar el mismo factor C. Los demás usos como son: bosque, charral, áreas urbanas, cultivo y cenizas se mantienen con sus respectivas áreas y factor C (Figura 19).

Se incrementa el uso de suelo potrero de 1096 ha (23%) en el escenario base a 1716 ha (35%) del área total de la subcuenca (Cuadro 16). El incremento se debe a la conversión de cultivo – pasto a potrero que tenía 619,8 ha (13%) en el escenario base.

Cuadro 16. Uso de suelos y áreas del escenario 1_2.

Uso de suelo	Área (ha)	Área (%)	Factor CP
Bosque	1394,52	28,82	0,003
Charral	47,12	0,97	0,037
Potrero	1716,00	35,46	0,013
Area urbana	78,88	1,63	0,002
Cultivo-pasto	0,00	0,00	0,013
Cultivo	1595,88	32,98	0,340
Cenizas	6,28	0,13	0,900
Total	4838,68	100,00	

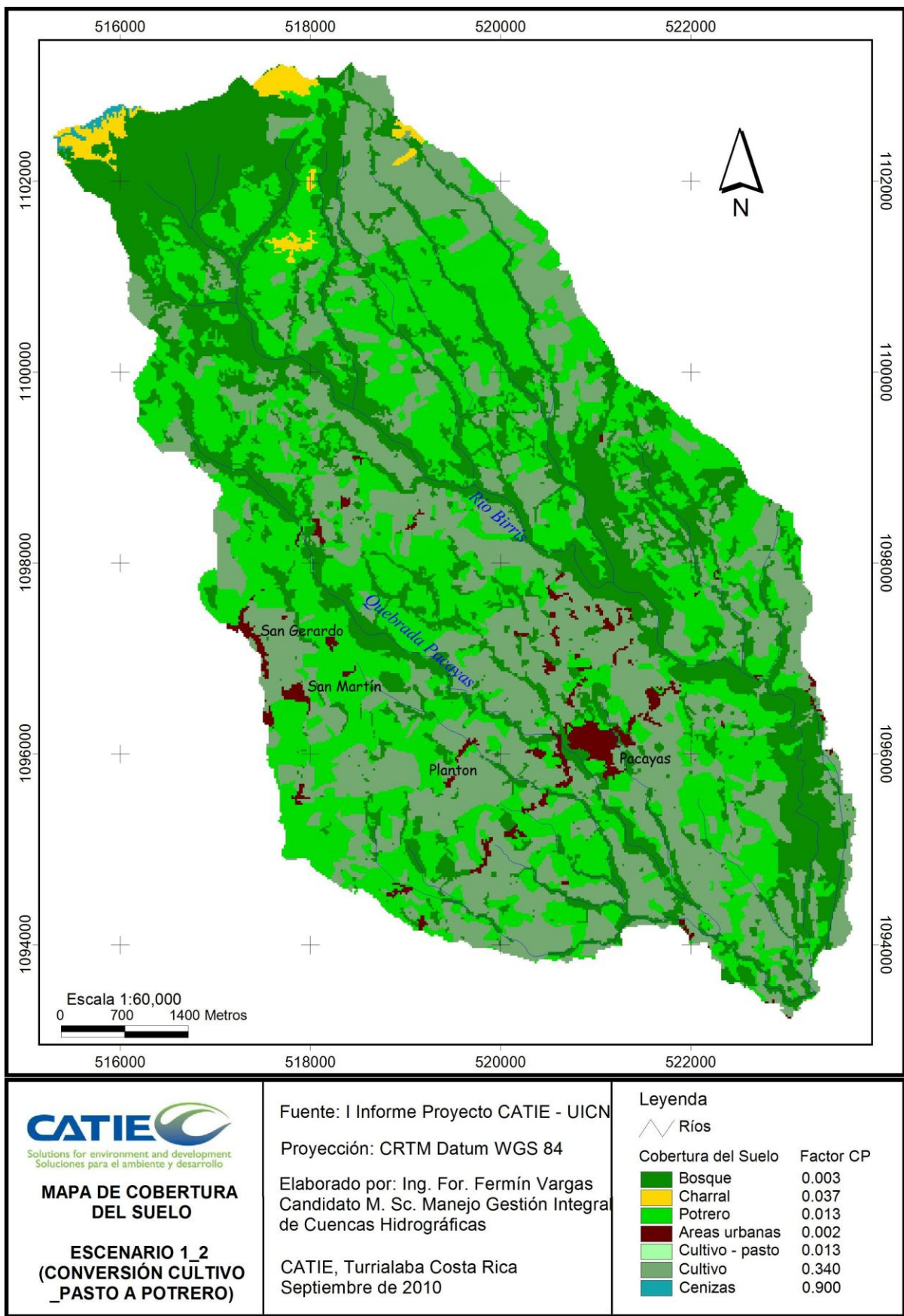


Figura 19. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_2.

4.1.3 Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero

En el presente escenario, el uso de suelo cultivado, pasa a convertirse en el uso de suelo potrero y a ocupar el mismo factor C. Los demás usos como son: bosque, charral, áreas urbanas, cultivo-pasto y cenizas se mantienen con sus respectivas áreas y factor C (Figura 20).

Se incrementa el uso de suelo potrero de 1096 ha (23%) en el escenario base a 2692 ha (56%), ocupando más de la mitad del área total de la subcuenca (Cuadro 17). El incremento se debe a la conversión de cultivo a potrero que tenía 1595,9 ha (33%) en el escenario base.

Cuadro 17. Uso de suelos y áreas del escenario 1_3.

Uso de suelo	Área (ha)	Área (%)	Factor CP
Bosque	1394,52	28,82	0,003
Charral	47,12	0,97	0,037
Potrero	2692,12	55,64	0,013
Area urbana	78,88	1,63	0,002
Cultivo-pasto	619,76	12,81	0,040
Cultivo	0,00	0,00	0,013
Cenizas	6,28	0,13	0,900
Total	4838,68	100,00	

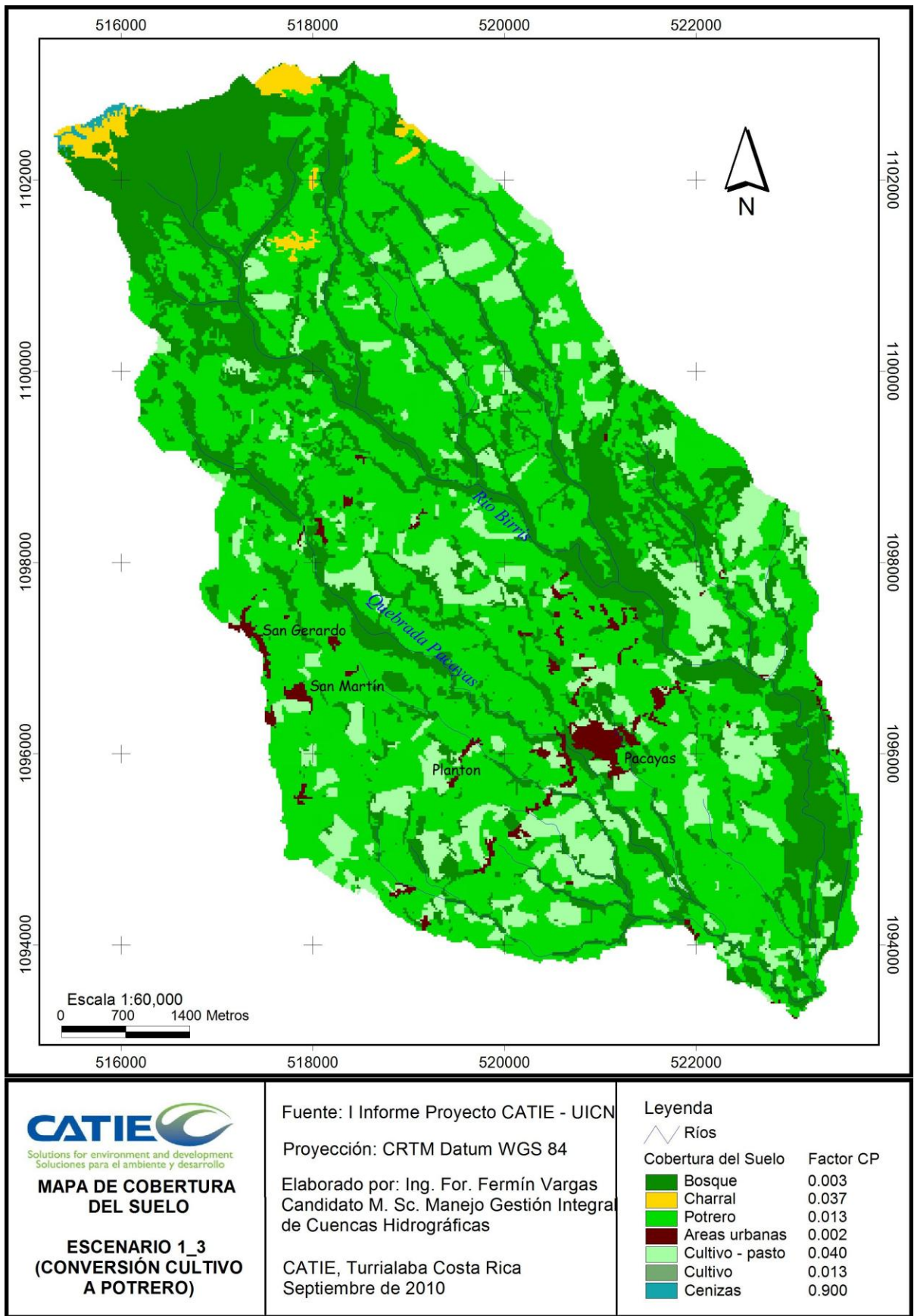


Figura 20. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_3.

4.1.4 Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo

Contrario al anterior, en este escenario se convierte el uso potrero a cultivo y pasa a ocupar el mismo factor C del cultivo. Los demás usos: bosque, charral, áreas urbanas, cultivo-pasto y cenizas se mantienen con sus respectivas áreas y factor C (Figura 21).

La superficie del uso de suelo cultivo, se incrementa de 1595,9 ha (33%) en el escenario base a 2692 ha (56%), ocupando más de la mitad del área total de la subcuenca (Cuadro 18). El uso potrero, tenía una superficie de 1096 ha (23%) en el escenario base.

Cuadro 18. Uso de suelos y áreas del escenario 1_4.

Uso de suelo	Área (ha)	Área (%)	Factor CP
Bosque	1394,52	28,82	0,003
Charral	47,12	0,97	0,037
Potrero	0,00	0,00	0,340
Area urbana	78,88	1,63	0,002
Cultivo-pasto	619,76	12,81	0,040
Cultivo	2692,12	55,64	0,340
Cenizas	6,28	0,13	0,900
Total	4838,68	100,00	

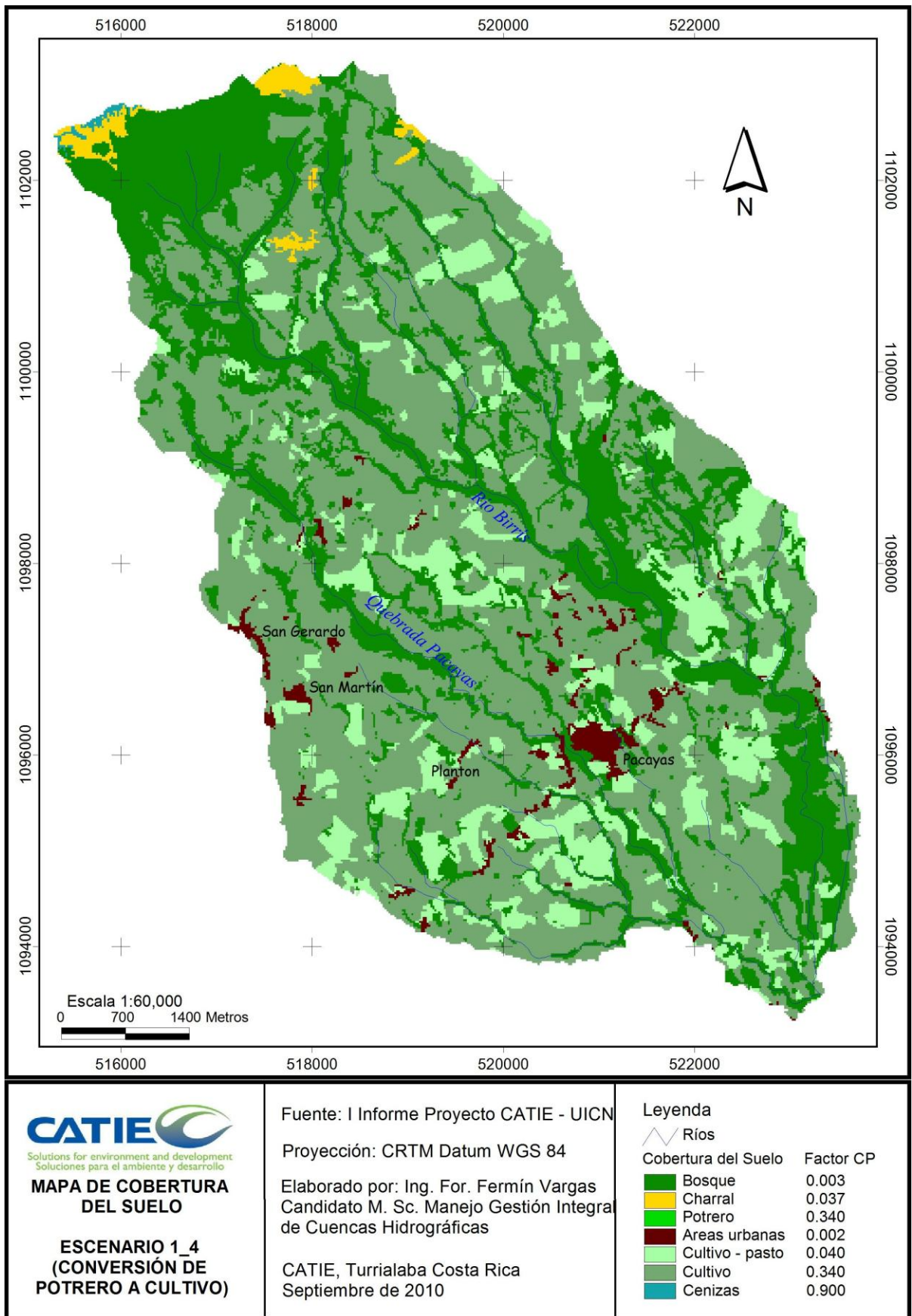


Figura 21. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_4.

4.1.5 Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo

En el presente escenario el uso de suelo cultivo – pasto (mixto), pasa a convertirse en el uso de suelo cultivo y a ocupar el mismo factor C. Si bien el área de este escenario es relativamente pequeña como para poder influir notablemente en la estimación de la erosión, lo que se trata es de uniformizar este uso como se hizo en el escenario 1_2 donde se uniformizó a potrero y en este caso a cultivo, con el fin de obtener un resultado único de erosión y sedimento. Los demás usos como son: bosque, charral, áreas urbanas, cultivo y cenizas se mantienen con sus respectivas áreas y factor C (Figura 22).

Se incrementa entonces el uso de suelo cultivo de 1595,9 ha (33%) en el escenario base a 2215,6 ha (46%), llegando a ocupar casi la mitad del área total de la subcuenca (Cuadro 19). El incremento se debe a la conversión de cultivo – pasto a cultivo que tenía 619,8 ha (13%) en el escenario base.

Cuadro 19. Uso de suelos y áreas del escenario 1_5.

Uso de suelo	Área (ha)	Área (%)	Factor CP
Bosque	1394,52	28,82	0,003
Charral	47,12	0,97	0,037
Potrero	1096,24	22,66	0,013
Area urbana	78,88	1,63	0,002
Cultivo-pasto	0,00	0,00	0,340
Cultivo	2215,64	45,79	0,340
Cenizas	6,28	0,13	0,900
Total	4838,68	100,00	

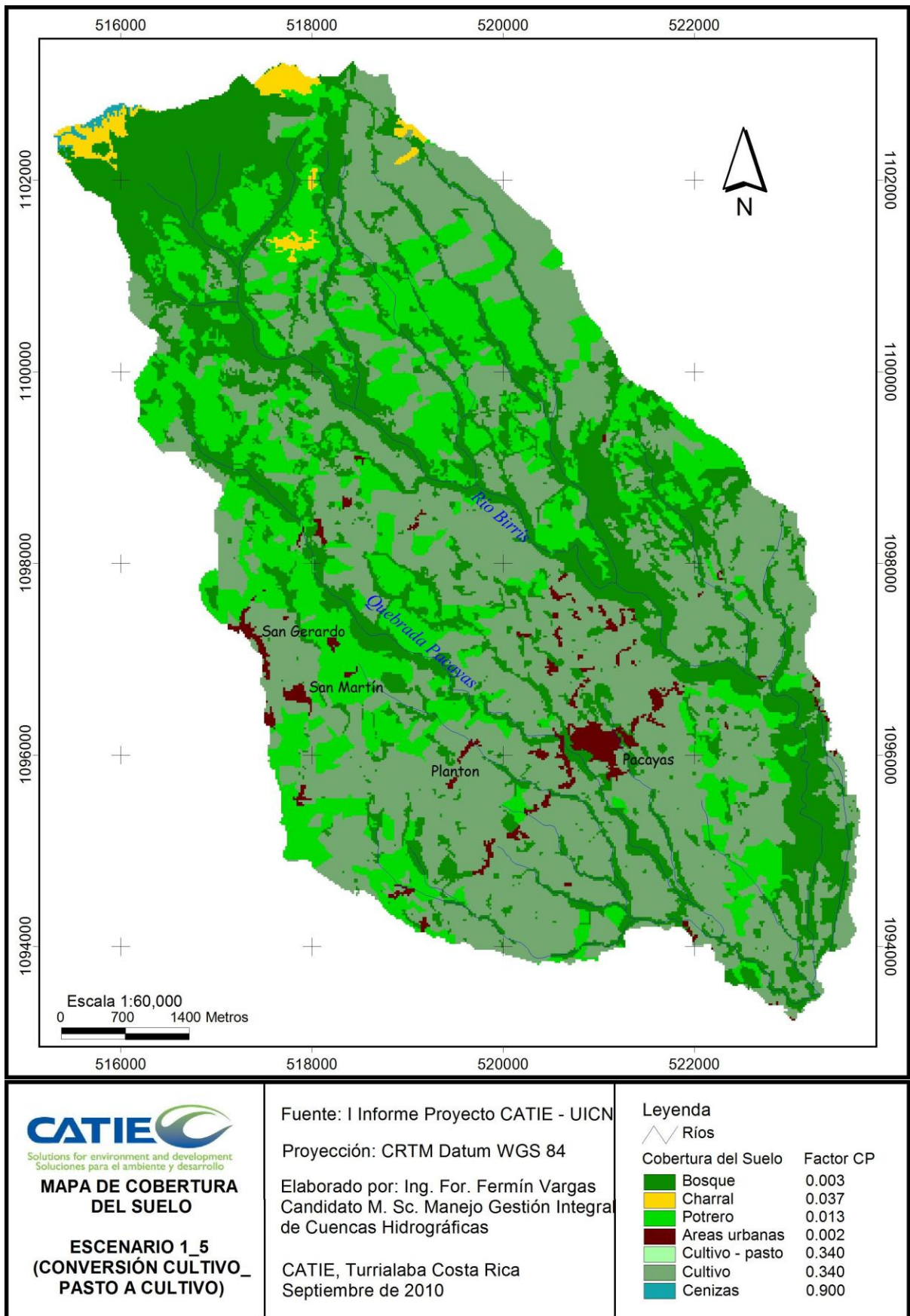


Figura 22. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_5.

4.1.6 Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles

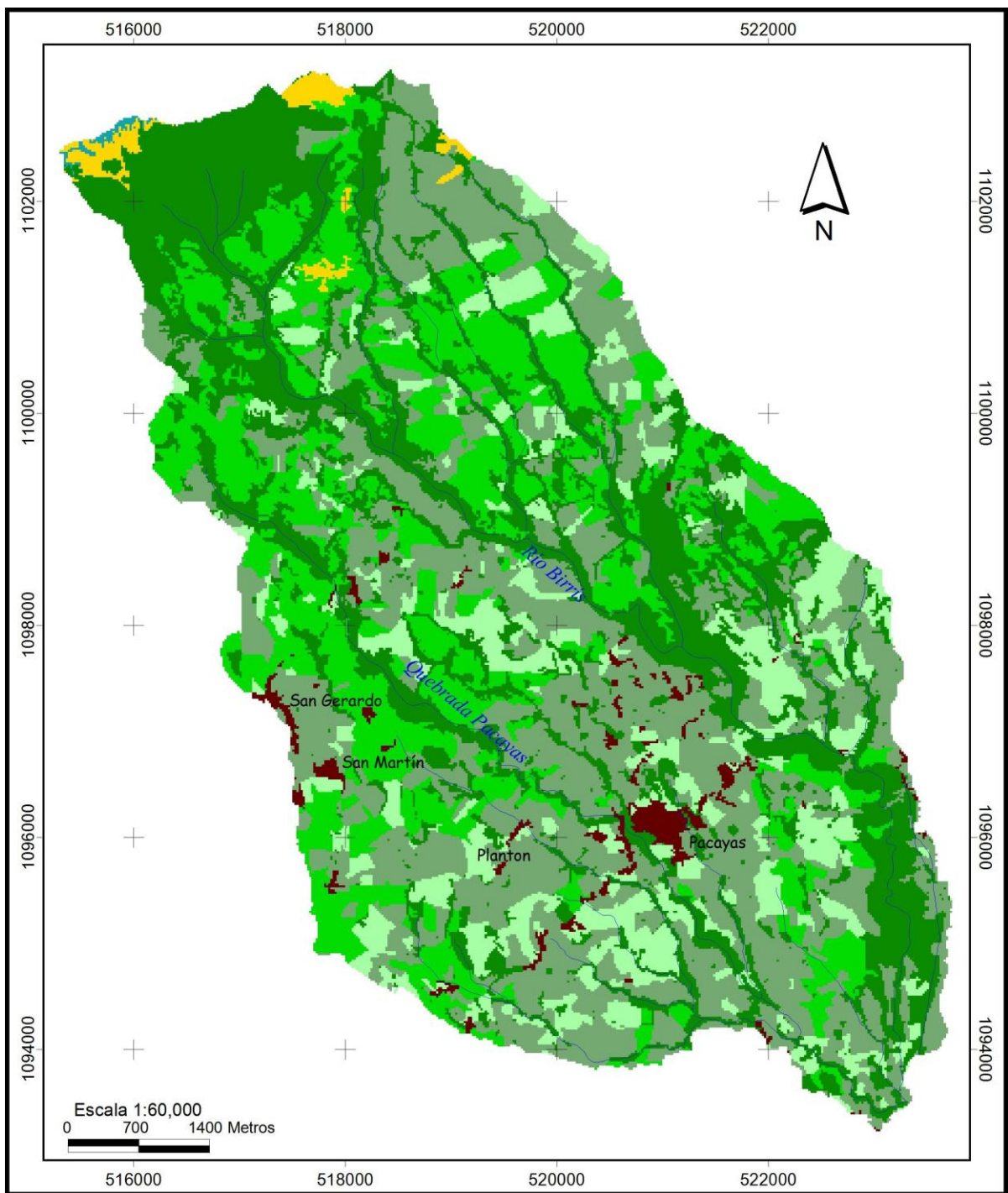
En este escenario, muy diferentes a los anteriores escenarios, los usos de suelos cultivos y potreros del escenario base, pasan a ser mejorados con la asignación de nuevos factores C, por el establecimiento de sistemas agroforestales y sistemas silvopastoriles respectivamente, y el uso cultivo-pasto, también es mejorado con la combinación de estos dos sistemas. Los demás usos de la subcuenca: bosque, charral, áreas urbanas y cenizas se mantienen con sus respectivas áreas y factor C (Figura 23).

El área a nivel subcuenca del sistema agroforestal, ocupa 1595,9 ha (33%), y el sistema silvopastoril ocupa 1096 ha (23%) (Cuadro 20). Estas áreas, son semejantes a las áreas de los usos de suelos: cultivo y potrero en el escenario base, pues estos sistemas son implementados sobre dichas áreas.

Para estos sistemas, se consideró el factor C para la etapa madura, no se consideró la etapa de establecimiento y desarrollo de las coberturas, en las que su comportamiento hidrológico puede ser muy variable.

Cuadro 20. Uso de suelos y áreas del escenario 1_6.

Uso de suelo	Área (ha)	Área (%)	Factor CP
Bosque	1394,52	28,82	0,003
Charral	47,12	0,97	0,037
Sistema silvopastoril	1096,24	22,66	0,002
Area urbana	78,88	1,63	0,002
Cultivo-pasto (mixto)	619,76	12,81	0,044
Sistema agroforestal	1595,88	32,98	0,086
Cenizas	6,28	0,13	0,900
Total	4838,68	100,00	




 <p>Solutions for environment and development Soluciones para el ambiente y desarrollo</p> <p>MAPA DE COBERTURA DEL SUELO</p> <p>ESCENARIO 1_6 (CULTIVO A SIST. AGROF, POTRERO A SIST. SILVOP.)</p>	<p>Fuente: I Informe Proyecto CATIE - UICN</p> <p>Proyección: CRTM Datum WGS 84</p> <p>Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas</p> <p>CATIE, Turrialaba Costa Rica Septiembre de 2010</p>	<p>Leyenda</p> <p>~ Ríos</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cobertura del Suelo</th> <th>Factor CP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bosque</td> <td>0.003</td> </tr> <tr> <td>Charral</td> <td>0.037</td> </tr> <tr> <td>Sist. silvopastoriles</td> <td>0.002</td> </tr> <tr> <td>Áreas urbanas</td> <td>0.002</td> </tr> <tr> <td>Cultivo - pasto</td> <td>0.044</td> </tr> <tr> <td>Sist. agroforestales</td> <td>0.086</td> </tr> <tr> <td>Cenizas</td> <td>0.900</td> </tr> </tbody> </table>	Cobertura del Suelo	Factor CP	Bosque	0.003	Charral	0.037	Sist. silvopastoriles	0.002	Áreas urbanas	0.002	Cultivo - pasto	0.044	Sist. agroforestales	0.086	Cenizas	0.900
	Cobertura del Suelo	Factor CP																
Bosque	0.003																	
Charral	0.037																	
Sist. silvopastoriles	0.002																	
Áreas urbanas	0.002																	
Cultivo - pasto	0.044																	
Sist. agroforestales	0.086																	
Cenizas	0.900																	

Figura 23. Uso de suelos y factor CP del escenario 1_6.

4.2 Erosión potencial y sedimentos

4.2.1 Suelo que podría perderse por erosión potencial

La erosión potencial laminar corresponde al suelo que podría perderse localmente, arrastrado por procesos de erosión laminar. Este suelo podría finalmente ser entregado a la red hidrográfica o bien depositarse en el camino debido a la presencia de depresiones naturales, barreras naturales y barreras artificiales como obras de conservación, siembras de contorno y en fajas, bosque ribereño, etc.

Para cada escenario se ha modelizado la erosión potencial laminar en un SIG ráster mediante el empleo del modelo CALSITE - USLE calibrado localmente. Esta erosión se ha calculado en t/ha/año con la expresión:

$$A = R \times K \times LS \times CP$$

Se aclara que durante el proceso de modelización en el CALSITE, se especificó un límite máximo de erosión potencial de 500 t/ha/año por considerarse este un nivel de erosión muy difícil de exceder a nivel de la subcuenca del río Birrís. Este límite máximo, filtra los resultados que podrían verse afectados por inconsistencias en las variables calculadas a partir del modelo de elevación digital, pues es posible que debido a malos ajustes en las curvas de nivel (que por lo general proceden de hojas cartográficas diferentes) se presenten valores de píxel extraviados de pendiente o longitud de pendiente (Gómez Delgado 2002). A continuación se pasan a describir los resultados obtenidos para cada escenario.

4.2.1.1 Escenario base 1_1: uso de suelo actual

Según el mapa de este escenario base (Figura 24), la erosión potencial laminar, en promedio es de 68 t/ha/año, haciendo un total de 330 295 t/año para toda la subcuenca. El uso de suelo cultivo, que es la cobertura en estudio para estimar COS que se podría perder, alcanza el mayor promedio de erosión potencial, 190 t/ha/año y una altura de lámina de 22 mm, el uso de suelo potrero presenta una erosión potencial de 7 t/ha/año y una altura de lámina de 0,8 mm, ubicada entre las de menor altura (Cuadro 21). Claramente se evidencia, de que la erosión potencial es mucho mayor en el uso cultivo que en potrero, debido a que el factor “C” (0,013) del uso potrero, es mucho menor que el del uso cultivo (0,340), también el uso cultivo, presenta mayor área a nivel de la subcuenca.

Estos resultados obtenidos se pueden comparar con cuatro estudios de erosión potencial, realizados en la subcuenca. Por ejemplo CATIE (2003) estimó una erosión potencial de 50 t/ha/año, Marchamalo (2004) estimó 42 t/ha/año y Marchamalo (2007) estimó una erosión potencial de 52 t/ha/año. Entonces los resultados obtenidos en el presente estudio 68 t/ha/año, podría deberse a la actualización de los valores del factor “C” a partir del estudio de Lianes (2008).

Cuadro 21. Erosión potencial en el escenario 1_1.

Uso de suelo	Erosión total (t/año)	Erosión total (%)	Erosión promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2380,13	0,72	1,71	0,20
Charral	445,65	0,13	9,46	1,09
Potrero	7837,67	2,37	7,15	0,82
Area urbana	83,46	0,03	1,06	0,12
Cultivo-pasto	15668,25	4,74	25,28	2,91
Cultivo	302995,44	91,73	189,86	21,82
Cenizas	884,58	0,27	140,86	16,19
Total	330295,17	100,00		
Promedio (t/ha/año)	68,26			

Los valores de erosión puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 22. Rango de erosión potencial en el escenario 1_1.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	2712,64	56,45
10-50	Moderada	758,00	15,77
50-200	Severa	652,72	13,58
> 200	Muy severa	681,88	14,19
Total		4805,24	100,00

Con base en el cuadro 22, el 44% de la subcuenca presenta problemas de erosión potencial desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 28% (1334 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos, cenizas y cultivo-pasto. Pero también cabe rescatar que el restante 56% (2712 ha), a nivel subcuenca, presenta una categoría nula a ligera de erosión potencial, ubicándose, principalmente, en áreas de bosques y potreros.

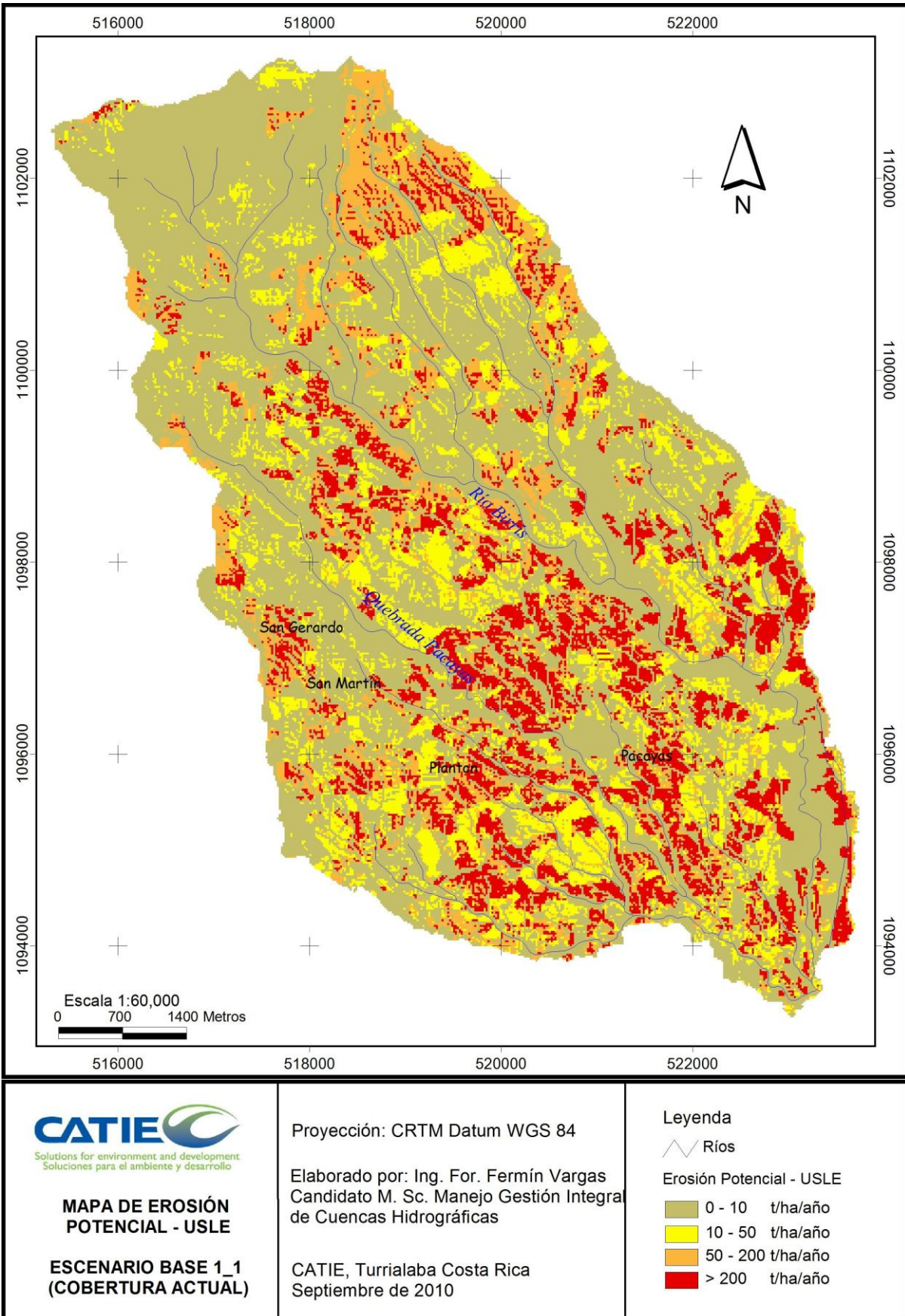


Figura 24. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_1.

4.2.1.2 Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero

Con base al mapa de este escenario (Figura 25), la erosión potencial laminar, en promedio es de 66 t/ha/año, 2 t/ha/año menos que el escenario base, haciendo un total de 320 241 t/año para toda la subcuenca. El uso de suelo cultivo, alcanza una erosión potencial de 190 t/ha/año, y una altura de lámina de 22 mm, la más elevada a nivel subcuenca. El uso de suelo potrero, presenta una erosión potencial de 8 t/ha/año y una altura de lámina de 0,9 mm, ubicada entre las más bajas (Cuadro 23).

Como se puede apreciar, en estos resultados, comparando con el anterior escenario, la erosión potencial es casi igual en ambos casos, tanto para el uso cultivo como para el uso potrero. Se menciona, que el uso cultivo-pasto (mixto), no tuvo mucha incidencia en la estimación de la erosión potencial en este escenario, debido principalmente a su tamaño pequeño en superficie (13%) a nivel subcuenca y a un factor “C” muy bajo (0,013), que adquiere al momento de la conversión a uso potrero.

Cuadro 23. Erosión potencial en el escenario 1_2.

Uso de suelo	Erosión total (t/año)	Erosión total (%)	Erosión promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2367,83	0,74	1,70	0,20
Charral	445,65	0,14	9,46	1,09
Potrero	13545,16	4,23	7,89	0,91
Area urbana	80,87	0,03	1,03	0,12
Cultivo-pasto	0,00	0,00	0,00	0,00
Cultivo	302917,28	94,59	189,81	21,82
Cenizas	884,58	0,28	140,86	16,19
Total	320241,37	100,00		
Promedio (t/ha/año)	66,18			

Los valores de erosión puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 24. Rango de erosión potencial en el escenario 1_2.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	3009,80	62,64
10-50	Moderada	513,28	10,68
50-200	Severa	600,28	12,49
> 200	Muy severa	681,88	14,19
Total		4805,24	100,00

El modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de erosión potencial a nivel de la subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 24, el 37% de la subcuenca, presenta problemas de erosión potencial desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el

27% (1282,8 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos y cenizas. Pero también cabe rescatar que el restante 63% (3009,8 ha) a nivel de la subcuenca, presenta una categoría nula a ligera de erosión potencial, ubicándose, principalmente, en áreas de bosques y potreros.

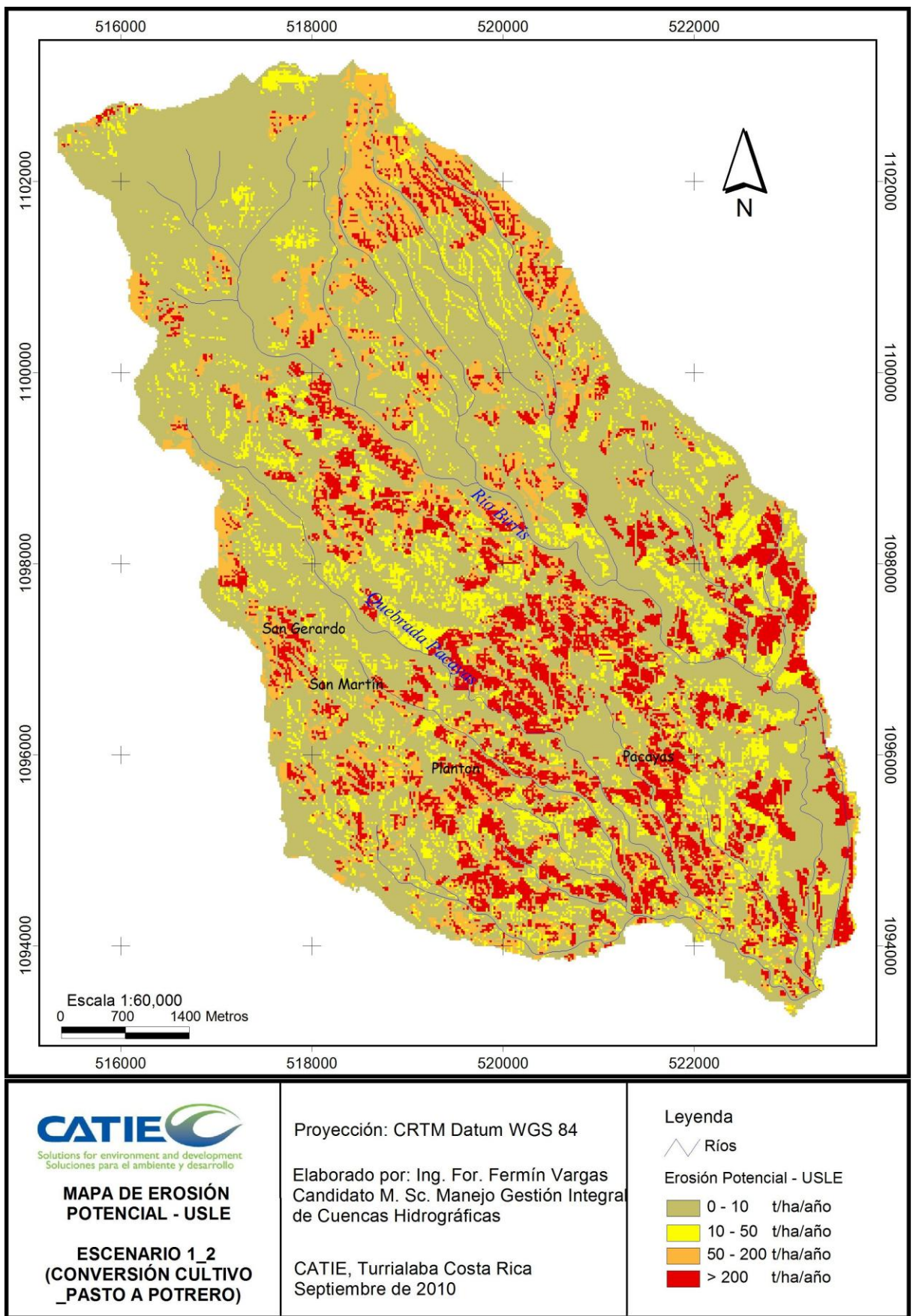


Figura 25. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_2.

4.2.1.3 Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero

De acuerdo al mapa de este escenario (Figura 26), la erosión potencial en promedio, es de 8 t/ha/año, 60 t/ha/año menos que el escenario base, haciendo un total de 38 115 t/año para toda la subcuenca. En referencia a las áreas en estudio, el uso potrero presenta una erosión potencial de 7 t/ha/año y una altura de lámina de 0,8 mm, ubicada entre las más bajas a nivel subcuenca (Cuadro 25).

Se puede observar claramente, que en este escenario, se tiene una erosión potencial muy baja. Este caso se debe, principalmente, a la gran incidencia en superficie que tiene el uso cultivo al convertirse en uso potrero, llegando a alcanzar este uso, una superficie de 2692 ha (56%) a nivel de la subcuenca, y además a obtener un factor “C” muy bajo (0,013).

Cuadro 25. Erosión potencial en el escenario 1_3.

Uso de suelo	Erosión total (t/año)	Erosión total (%)	Erosión promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2294,25	6,02	1,65	0,19
Charral	445,65	1,17	9,46	1,09
Potrero	19587,08	51,39	7,28	0,84
Area urbana	83,46	0,22	1,06	0,12
Cultivo-pasto	14820,19	38,88	23,91	2,75
Cultivo	0,00	0,00	0,00	0,00
Cenizas	884,58	2,32	140,86	16,19
Total	38115,20	100,00		
Promedio (t/ha/año)	7,88			

Los valores de erosión puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 26. Rango de erosión potencial en el escenario 1_3.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	3639,88	75,75
10-50	Moderada	1108,76	23,07
50-200	Severa	54,64	1,14
> 200	Muy severa	1,96	0,04
Total		4805,24	100,00

La aplicación del modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de erosión potencial a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 26, el 24% de la subcuenca presenta problemas de erosión potencial desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 1% (56,6 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cenizas y cultivos-pastos. El restante 76% (3639,9 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría nula a ligera de erosión potencial, ubicándose, principalmente, en áreas de bosques, potreros y charral.

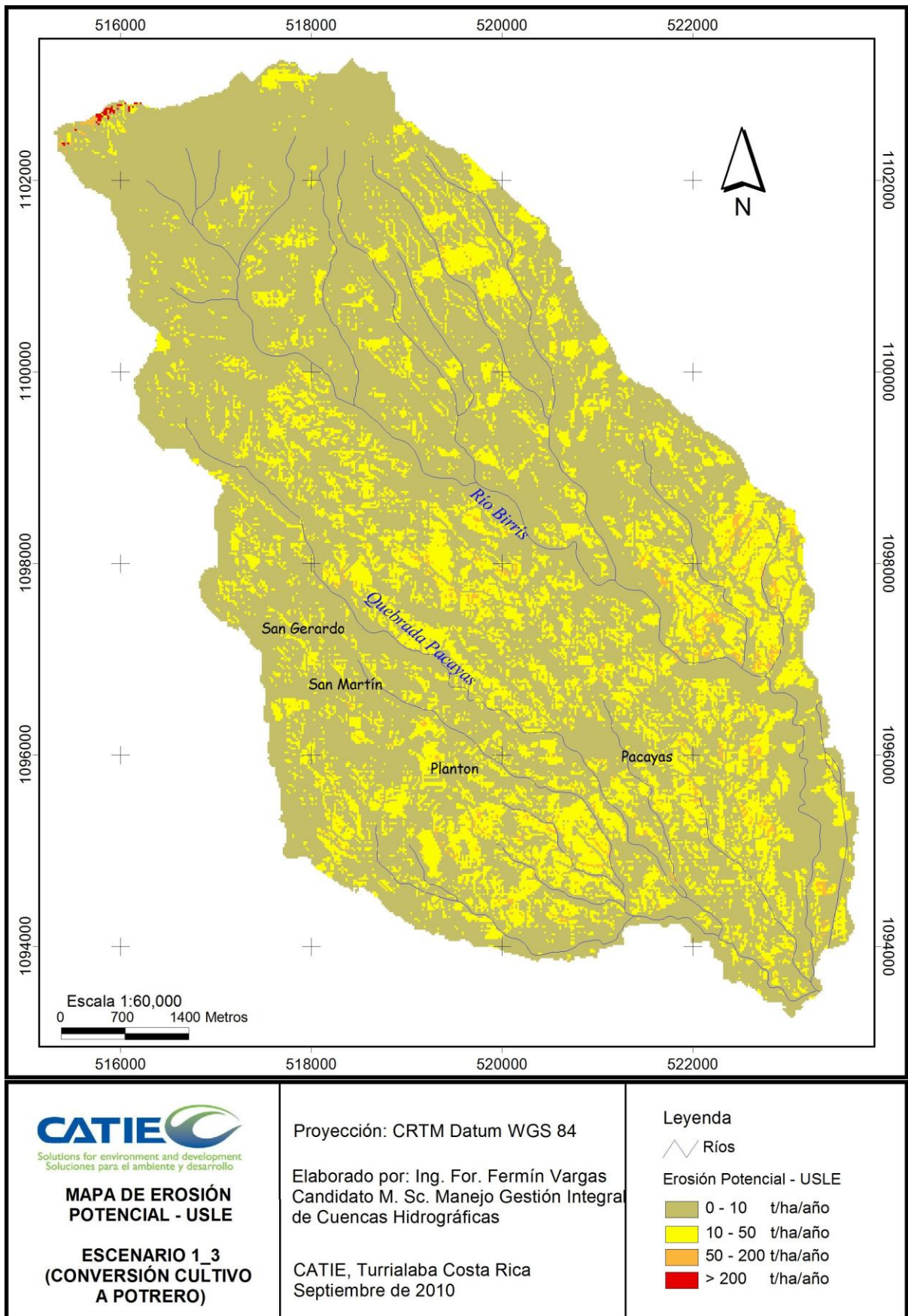


Figura 26. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_3.

4.2.1.4 Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo

Conforme con el mapa de este escenario (Figura 27), la erosión potencial es de 107 t/ha/año, 39 t/ha/año más que el escenario base, haciendo un total de 517 686 t/año para toda la subcuenca. La erosión potencial más alta, la tiene el área de estudio cultivo con 185 t/ha/año y una altura de lámina de 21 mm (Cuadro 27).

De acuerdo a estos resultados, se puede observar claramente, que en este escenario, contrario al anterior, se tiene una erosión potencial promedio muy alta. Este caso se debe, principalmente, a la gran incidencia en superficie que tiene el uso potrero al convertirse en uso cultivo, llegando a alcanzar este uso, una superficie de 2692 ha (56%) a nivel de la subcuenca, y además a obtener un factor “C” muy alto (0,340).

Cuadro 27. Erosión potencial en el escenario 1_4.

Uso de suelo	Erosión total (t/año)	Erosión total (%)	Erosión promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2431,39	0,47	1,74	0,20
Charral	445,65	0,09	9,46	1,09
Potrero	0,00	0,00	0,00	0,00
Area urbana	83,46	0,02	1,06	0,12
Cultivo-pasto	16430,66	3,17	26,51	3,05
Cultivo	497409,78	96,08	184,77	21,24
Cenizas	884,58	0,17	140,86	16,19
Total	517685,52	100,00		
Promedio (t/ha/año)	106,99			

Los valores de erosión puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 28. Rango de erosión potencial en el escenario 1_4.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Area (ha)	Area (%)
0-10	Nula a ligera	2002,68	41,68
10-50	Moderada	550,48	11,46
50-200	Severa	1171,76	24,39
> 200	Muy severa	1080,32	22,48
Total		4805,24	100,00

La aplicación del modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de erosión potencial a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 28, el 58% de la subcuenca presenta problemas de erosión potencial desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 47% (2252 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos, cenizas y cultivos-pastos. El restante 42% (2002,7 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría nula a ligera de erosión potencial, ubicándose, principalmente, en áreas de bosques y charral.

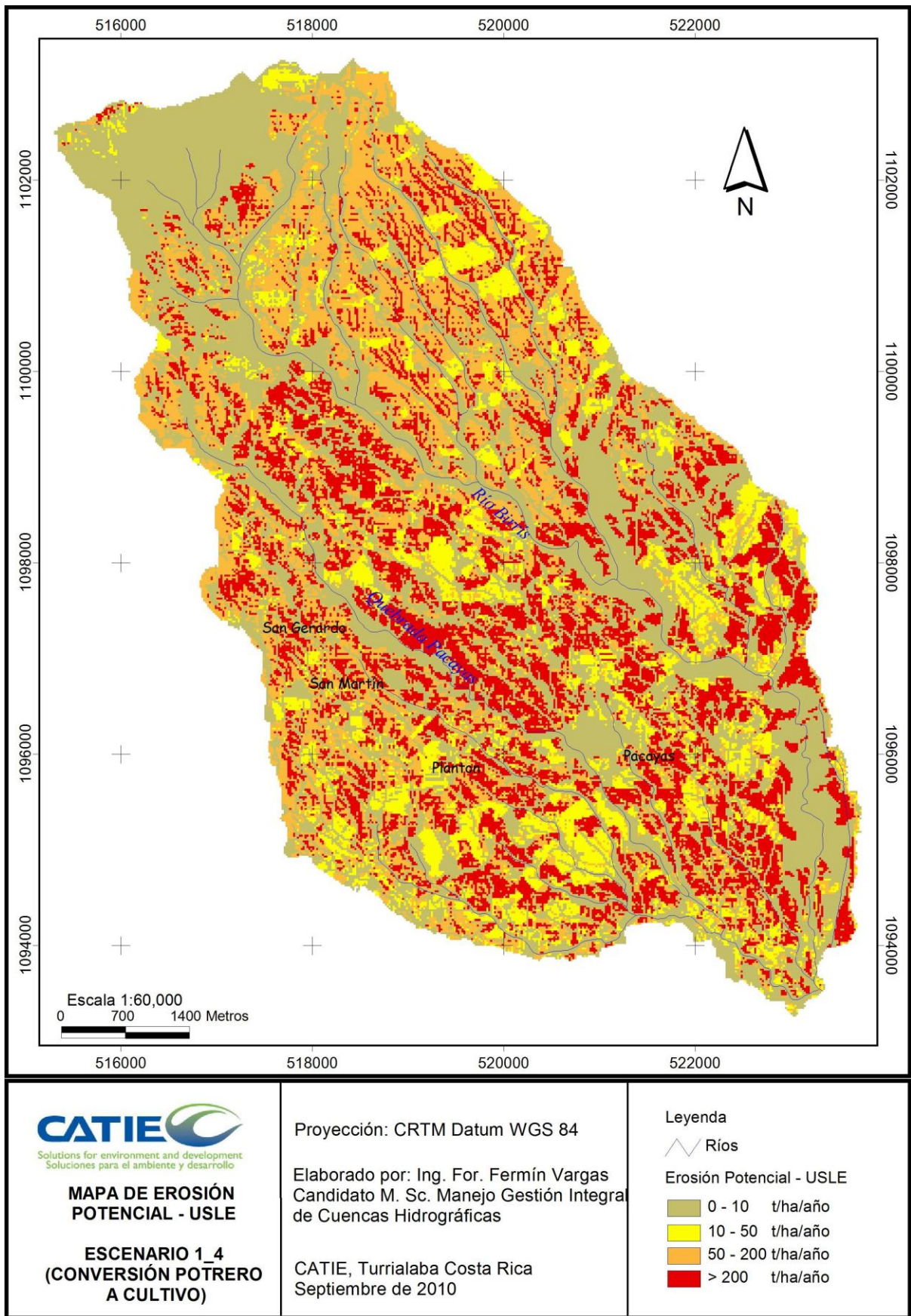


Figura 27. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_4.

4.2.1.5 Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo

Conforme con el mapa de este escenario (Figura 28), la erosión potencial es de 91 t/ha/año, 22 t/ha/año más que el escenario base, haciendo un total de 438 342 t/año para toda la subcuenca. El uso de suelo cultivo, que es la cobertura en estudio, alcanza una erosión potencial de 192 t/ha/año y una altura de lámina de 22 mm. El uso de suelo potrero, presenta una erosión potencial de 7 t/ha/año y una altura de lámina de 0,8 mm, ubicada entre las más bajas (Cuadro 29).

Como se puede apreciar, en estos resultados, sucede algo similar comparado con el escenario 1_2, la diferencia, es que en este escenario, el uso mixto pasa a convertirse en cultivo, entonces contrario a este escenario, la erosión potencial tiende a aumentar, a nivel uso cultivo y a nivel de la subcuenca. El uso cultivo-pasto (mixto), tuvo mucha incidencia en la estimación de la erosión potencial en este escenario, debido principalmente, a un factor “C” muy alto (0,340), que adquiere al momento de la conversión a uso cultivo, aunque su área, sea relativamente pequeño (13%) a nivel de la subcuenca.

Cuadro 29. Erosión potencial en el escenario 1_5.

Uso de suelo	Erosión total (t/año)	Erosión total (%)	Erosión promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2516,78	0,57	1,80	0,21
Charral	445,65	0,10	9,46	1,09
Potrero	7893,71	1,80	7,20	0,83
Area urbana	112,24	0,03	1,42	0,16
Cultivo-pasto	0,00	0,00	0,00	0,00
Cultivo	426489,38	97,30	192,49	22,13
Cenizas	884,58	0,20	140,86	16,19
Total	438342,33	100,00		
Promedio (t/ha/año)	90,59			

Los valores de erosión puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 30. Rango de erosión potencial en el escenario 1_5.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	2672,12	55,61
10-50	Moderada	357,16	7,43
50-200	Severa	812,92	16,92
> 200	Muy severa	963,04	20,04
Total		4805,24	100,00

Como se puede observar en el cuadro 30, el 44% de la subcuenca, presenta problemas de erosión potencial desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 37% (1776 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos y cenizas. Pero también cabe resaltar que el restante 56% (2672 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría nula a ligera de erosión potencial, ubicándose, principalmente, en áreas de bosques y potreros.

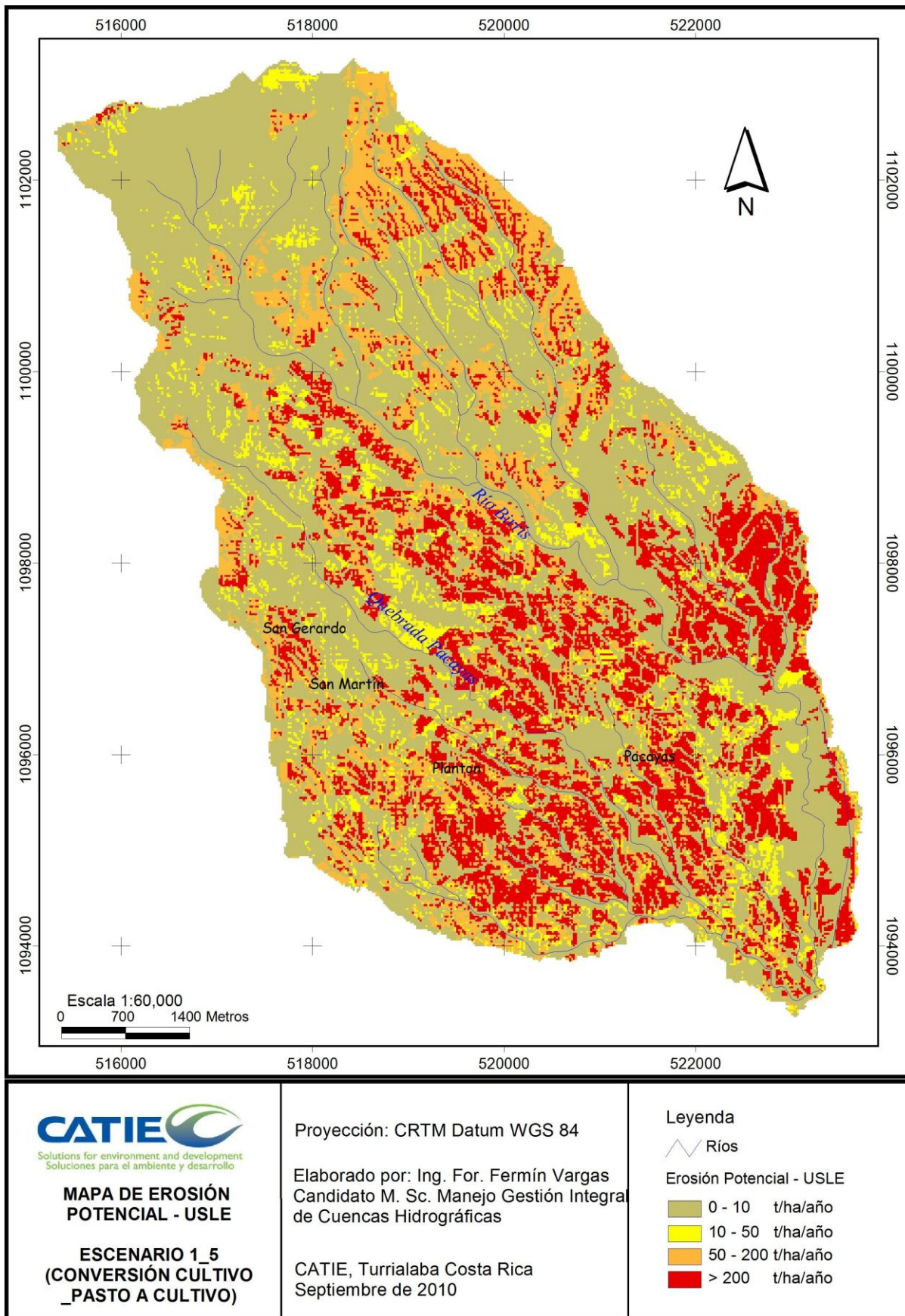


Figura 28. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_5.

4.2.1.6 Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles

Conforme con el mapa de este escenario (Figura 29), la erosión potencial, en promedio, es de 21 t/ha/año, 48 t/ha/año menos que el escenario base, haciendo un total de 100 230 t/año para toda la subcuenca. Haciendo énfasis en las áreas de estudio para estimar COS que se podría perder, el uso de suelo sistema agroforestal alcanza una erosión potencial de 49 t/ha/año y una altura de lámina de 6 mm, entre las altas a nivel subcuenca, en cambio el uso sistema silvopastoril presenta una erosión de 1 t/ha/año y una altura de lámina de 0,1 mm, la más baja a nivel de la subcuenca (Cuadro 31).

Prácticamente, este escenario tiene una erosión potencial, de casi el triple, que el escenario 1_3, es decir, también tiene una erosión muy baja. Esto, se debe primordialmente a la mejora del sistema de producción agropecuaria en la subcuenca, donde los usos de suelos cultivos y potreros, han sido mejorados, con la implementación de sistemas agroforestales y silvopastoriles y sus factores “C” reducidos 0,086 y 0,002 respectivamente. También el uso cultivo-potrero, es mejorado con la combinación de estos sistemas de producción, donde su factor “C” es 0,044.

Cuadro 31. Erosión potencial en el escenario 1_6.

Uso de suelo	Erosión total (t/año)	Erosión total (%)	Erosión promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2313,49	2,31	1,66	0,19
Charral	445,65	0,44	9,46	1,09
Sist. Silvop.	1245,80	1,24	1,14	0,13
Area urbana	83,85	0,08	1,06	0,12
Cultivo-pasto(mixto)	16475,05	16,44	26,58	3,06
Sist. Agrof.	78781,14	78,60	49,37	5,67
Cenizas	884,58	0,88	140,86	16,19
Total	100229,56	100,00		
Promedio (t/ha/año)	20,71			

Los valores de erosión puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 32. Rango de erosión potencial en el escenario 1_6.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Area (ha)	Area (%)
0-10	Nula a ligera	3011,44	62,67
10-50	Moderada	1028,56	21,40
50-200	Severa	756,88	15,75
> 200	Muy severa	8,36	0,17
Total		4805,24	100,00

La aplicación del modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de erosión potencial a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 32, el 37% de la subcuenca presenta problemas de erosión potencial desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 16% (765 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cenizas, sistemas agroforestales y mixtos. Cabe mencionar que el restante 63% (3011 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría nula a ligera de erosión potencial, ubicándose, principalmente, en áreas de bosques y sistemas silvopastoriles.

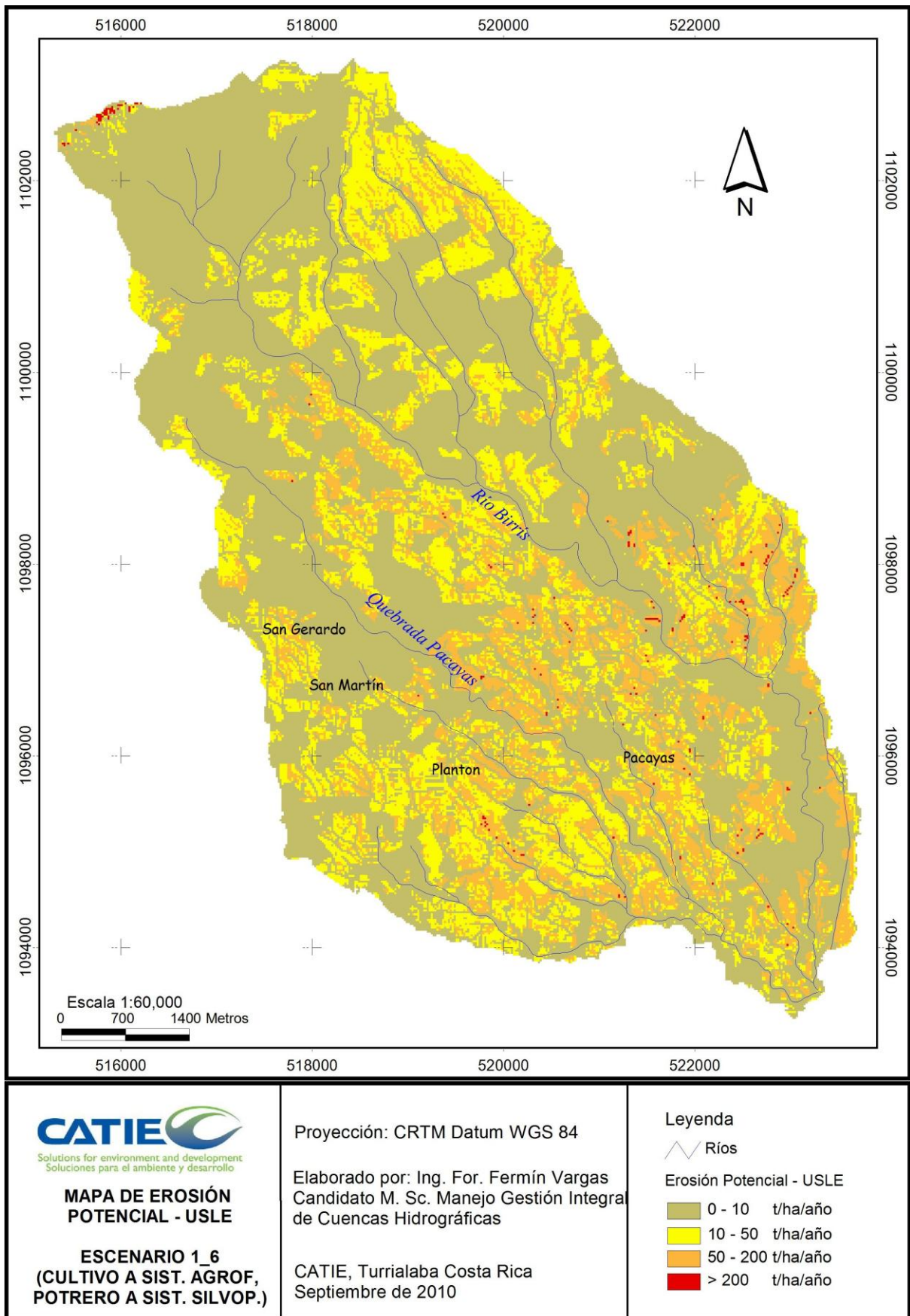


Figura 29. Mapa de erosión potencial por rangos: Escenario 1_6.

4.2.2 Suelo perdido por sedimento

Se calculó, a partir de la aplicación de la rutina de transporte de CALSITE y el mapa de entrega de sedimentos. En esta investigación se asumió una tasa de entrega de sedimento a la red hidrográfica del 80%, si la única fuente de sedimento fuera la erosión laminar y en surcos. El restante 20% provendría de fuentes de cárcavas, deslizamientos y movimientos en masa (Gómez Delgado 2002).

Para estimar el sedimento producido en la subcuenca, CALSITE evalúa la capacidad de transporte y la disponibilidad de sedimento en cada celda, en función del índice de entrega (*Delivery Index*). La media del índice de entrega, para la subcuenca, fue de 25,07 con un rango entre 0 y 255.

Para estimar el mapa de sedimentos, se realizó solo una calibración en el escenario base, con el sedimento observado 48,8 t/ha/año (80%). Como resultado de este proceso se genera otra cobertura raster que tiene como valores la tasa de entrega de sedimento (*Delivery Ratio*), es decir la relación entre la aportación neta de sedimento de cada píxel del territorio a la red hidrográfica y la erosión potencial del mismo, evaluada según la USLE en un proceso previo. Para la subcuenca del río Birrís los valores de la tasa de entrega de sedimento variaron entre 0,40 y 1,00 con una media de 0,52. Esto significa que la cuenca tiene una moderada tasa de entrega, para transportar la erosión estimada en cada píxel a la salida de la cuenca.

Luego, para estimar el mapa de sedimentos en los siguientes escenarios, se utilizó el mapa de tasa de entrega (*Delivery Ratio*) derivado en el escenario base. Este mapa surge como resultado de la calibración, indicada anteriormente.

4.2.2.1 Escenario base 1_1: uso de suelo actual

Según el mapa de este escenario base (Figura 30), el sedimento producido a la salida de la subcuenca es de 49 t/ha/año, haciendo un total de 236 325 t/año para toda la subcuenca. Con referencia, a las áreas en estudio para estimar COS perdido, el uso de suelo cultivo, produce, en promedio, 133 t/ha/año de sedimento y una altura de lámina de 15 mm, la más alta a nivel de la subcuenca. En cambio, el uso potrero produce, 7 t/ha/año y una altura de lámina de 0,8 mm, ubicada entre las de menor altura (Cuadro 33).

Estos resultados obtenidos, se pueden comparar con cuatro estudios de producción de sedimentos realizados en la subcuenca Birrís, pero cabe aclarar que en estos estudios el sedimento producido proviene 100% de tipos de erosión (cárcavas, deslizamiento y movimientos en masa) y no el 80% de origen laminar como sucede en el presente estudio. Por ejemplo Gómez Delgado (2002) estimó una producción de sedimentos de 61 t/ha/año, CATIE (2003) estimó una producción de 38 t/ha/año, Marchamalo (2004) y Marchamalo (2007) estimó al igual que Gómez Delgado (2002) una producción de sedimentos de 61 t/ha/año. Entonces el resultado obtenido 49 t/ha/año de sedimento a nivel subcuenca, se puede decir que está bien calibrado y esté valor no está tan lejano a los obtenidos por Marchamalo (2007) y Gómez Delgado (2002) que trabajaron con el 100% de la entrega de sedimento.

Cuadro 33. Pérdida de sedimento en el escenario 1_1.

Uso de suelo	Sedimento total (t/año)	Sedimento total (%)	Sedimento promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2342,64	0,99	1,68	0,19
Charral	401,45	0,17	8,52	0,98
Potrero	7489,29	3,17	6,83	0,79
Area urbana	82,45	0,03	1,05	0,12
Cultivo-pasto	13534,38	5,73	21,84	2,51
Cultivo	211954,95	89,69	132,81	15,27
Cenizas	520,03	0,22	82,81	9,52
Total	236325,20	100,00		
Promedio (t/ha/año)	48,84			

Los valores de sedimentación puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio de pérdida de suelos de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 34. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_1.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	2764,52	57,53
10-50	Moderada	736,20	15,32
50-200	Severa	968,40	20,15
200-500	Muy severa	336,12	6,99
Total		4805,24	100,00

La aplicación del modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de producción de sedimentos a nivel subcuena. Como se puede observar en el cuadro 34, el 42% de la subcuena, tiene problemas de sedimentación desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 27% (1304,5 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos, cenizas y cultivo-pasto. Pero también cabe rescatar que el restante 58% (2764,5 ha), a nivel subcuena, presenta una categoría nula a ligera de producción de sedimentos, ubicándose principalmente en áreas de bosques y potreros.

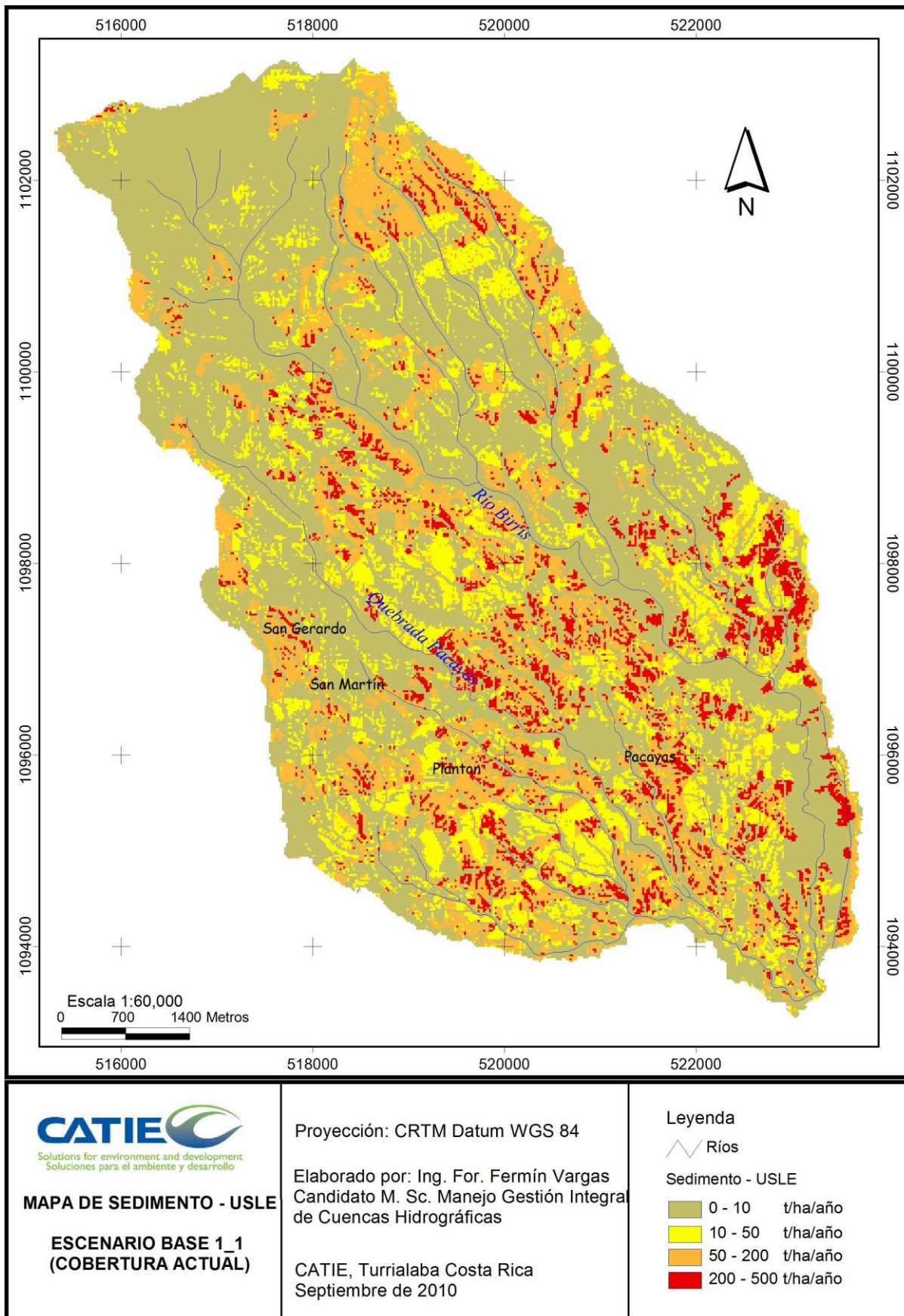


Figura 30. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida de suelos: Escenario 1_1.

4.2.2.2 Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero

Según el mapa de este escenario (Figura 31), el sedimento producido a la salida de la subcuenca es de 47 t/ha/año, 2 t/ha/año menos que el escenario base, haciendo un total de 227 504 t/año para toda la subcuenca. Haciendo énfasis en las áreas de estudio para determinar la pérdida de COS, se puede mencionar que el uso cultivo, produce el mayor promedio de sedimento, 133 t/ha/año y una altura de lámina de 15 mm. Mientras que para el uso de suelo potrero, se estimó una producción de sedimento de 7 t/ha/año y una altura de lámina de 0,8 mm, siendo de las más bajas (Cuadro 35).

Como se puede apreciar, en estos resultados, comparando con el anterior escenario, la producción de sedimentos es casi igual en ambos casos, tanto para el uso cultivo como para el uso potrero. Se puede mencionar, que el uso cultivo-pasto (mixto), no tuvo mucha incidencia en la producción de sedimentos en este escenario, debido principalmente a su tamaño pequeño en superficie (13%) a nivel subcuenca y a un factor “C” muy bajo (0,013), que adquiere al momento de la conversión a uso potrero.

Cuadro 35. Pérdida de sedimento en el escenario 1_2.

Uso de suelo	Sedimento total (t/año)	Sedimento total (%)	Sedimento promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2332,20	1,03	1,67	0,19
Charral	401,45	0,18	8,52	0,98
Potrero	12283,21	5,40	7,16	0,82
Area urbana	80,44	0,04	1,02	0,12
Cultivo-pasto	0,00	0,00	0,00	0,00
Cultivo	211887,00	93,14	132,77	15,26
Cenizas	520,03	0,23	82,81	9,52
Total	227504,33	100,00		
Promedio (t/ha/año)	47,02			

Los valores de sedimentación puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 36. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_2.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	3094,12	64,39
10-50	Moderada	443,48	9,23
50-200	Severa	931,52	19,39
200-500	Muy severa	336,12	6,99
Total		4805,24	100,00

La aplicación del modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de producción de sedimentos a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 36, el 36% de la subcuenca, tiene problemas de sedimentación desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 26% (1267,6 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos y cenizas. Pero también cabe rescatar que el restante 64% (3094 ha), a nivel subcuenca, presenta una categoría nula a ligera de producción de sedimentos, ubicándose principalmente en áreas de bosques, potreros y charral.

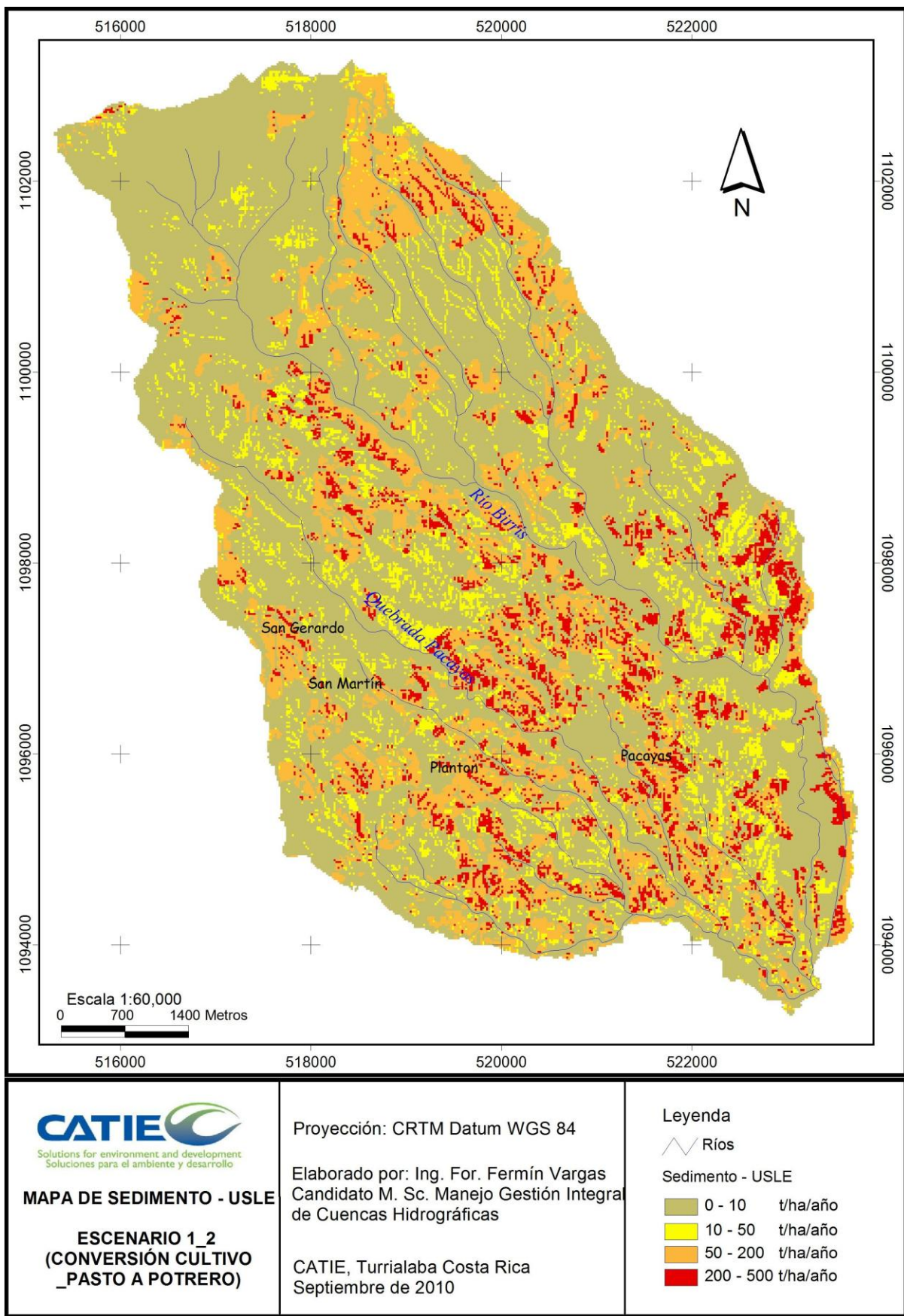


Figura 31. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_2.

4.2.2.3 Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero

De acuerdo al mapa de este escenario (Figura 32), el sedimento producido a la salida de la subcuenca es de 7 t/ha/año, 42 t/ha/año menos que el escenario base, haciendo un total de 32 058 t/año para toda la subcuenca. En cuanto a los usos de suelos en estudio, que para este escenario sería, solo el uso potrero, produce en promedio, 6 t/ha/año de sedimentos y una altura de lámina de 0,7 mm, una de las más bajas a nivel subcuenca (Cuadro 37).

Se puede observar claramente, que en este escenario, se tiene una producción promedio muy baja de sedimentos. Este caso se debe, principalmente, a la gran incidencia en superficie que tiene el uso cultivo al convertirse en uso potrero, llegando a alcanzar este uso, una superficie de 2692 ha (56%) a nivel de la subcuenca, y además a obtener un factor “C” muy bajo (0,013).

Cuadro 37. Pérdida de sedimento en el escenario 1_3.

Uso de suelo	Sedimento total (t/año)	Sedimento total (%)	Sedimento promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2283,88	7,12	1,64	0,19
Charral	401,45	1,25	8,52	0,98
Potrero	15771,81	49,20	5,86	0,67
Area urbana	82,45	0,26	1,05	0,12
Cultivo-pasto	12997,99	40,55	20,97	2,41
Cultivo	0,00	0,00	0,00	0,00
Cenizas	520,03	1,62	82,81	9,52
Total	32057,62	100,00		
Promedio (t/ha/año)	6,63			

Los valores de sedimentación puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 38. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_3.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	3924,68	81,68
10-50	Moderada	839,88	17,48
50-200	Severa	39,96	0,83
200-295	Muy severa	0,72	0,01
Total		4805,24	100,00

Aplicando el modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de producción de sedimentos a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 38, el 18% de la subcuenca tiene problemas de sedimentación desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 0,8% (40,7 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivo-pasto y cenizas; este resultado es muy bajo comparado con los anteriores escenarios. El restante 82% (3924,7 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría

nula a ligera de producción de sedimentos, ubicándose principalmente en áreas de bosques, potreros y charral.

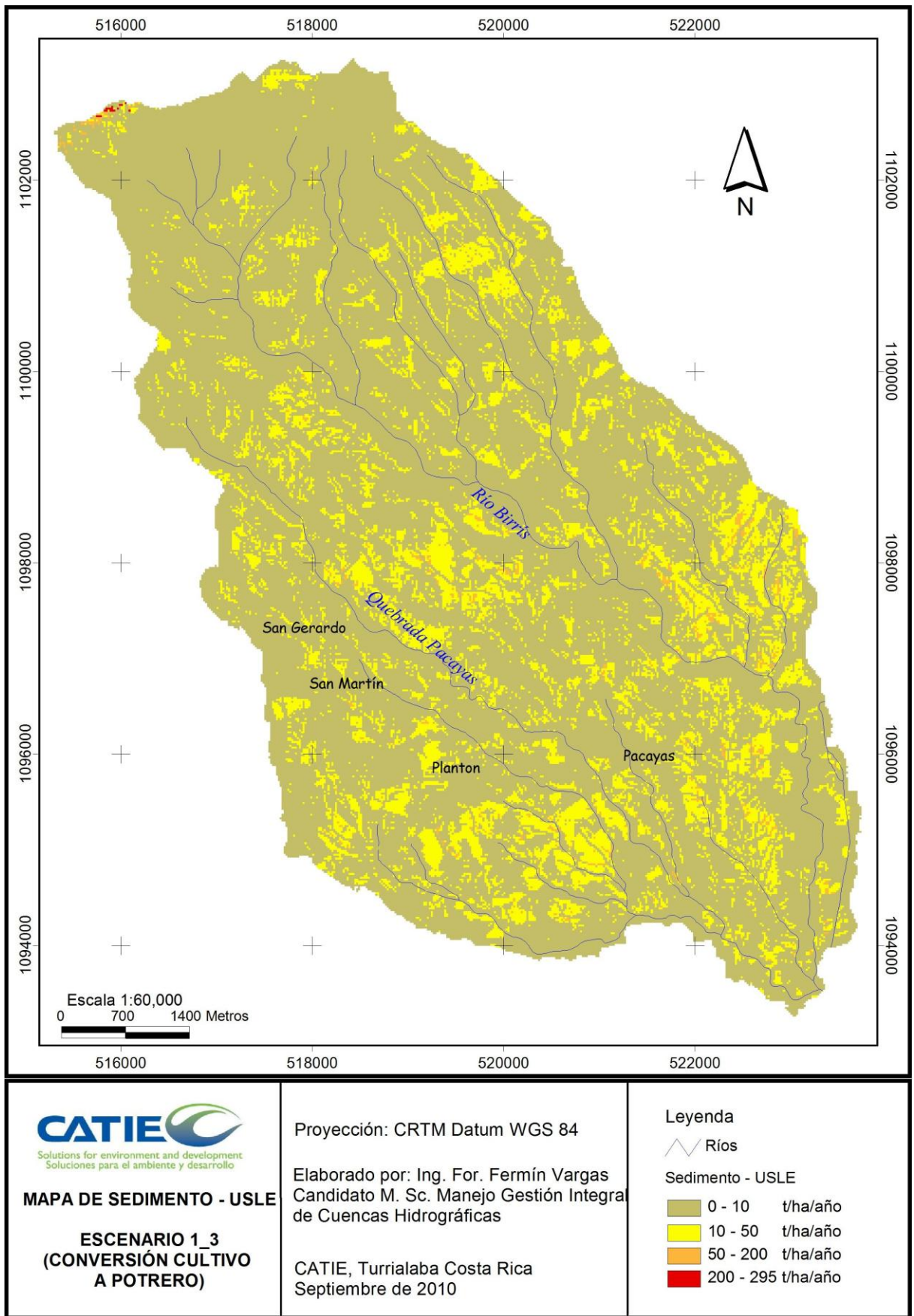


Figura 32. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_3.

4.2.2.4 Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo

Contrario al anterior escenario, en usos de suelos, este escenario (Figura 33), produce en promedio, 86 t/ha/año de sedimentos, 37 t/ha/año más que el escenario base, haciendo un total de 417 390 t/año para toda la subcuenca. Con referencia al uso de suelo en estudio, el uso cultivo, produce en promedio, 148 t/ha/año y una altura de lámina de 17 mm, la más alta, (Cuadro 39).

De acuerdo a estos resultados, se puede observar claramente, que en este escenario, contrario al anterior, se tiene una producción promedio muy alta de sedimentos. Este caso se debe, principalmente, a la gran incidencia en superficie que tiene el uso potrero al convertirse en uso cultivo, llegando a alcanzar este uso, una superficie de 2692 ha (56%) a nivel de la subcuenca, y además a obtener un factor “C” muy alto (0,340).

Cuadro 39. Pérdida de sedimento en el escenario 1_4.

Uso de suelo	Sedimento total (t/año)	Sedimento total (%)	Sedimento promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2393,11	0,57	1,72	0,20
Charral	401,45	0,10	8,52	0,98
Potrero	0,00	0,00	0,00	0,00
Area urbana	82,45	0,02	1,05	0,12
Cultivo-pasto	14244,49	3,41	22,98	2,64
Cultivo	399748,47	95,77	148,49	17,07
Cenizas	520,03	0,12	82,81	9,52
Total	417390,01	100,00		
Promedio (t/ha/año)	86,26			

De igual forma, valores de sedimentación puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 40. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_4.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	2036,04	42,37
10-50	Moderada	547,20	11,39
50-200	Severa	1513,96	31,51
200-500	Muy severa	708,04	14,73
Total		4805,24	100,00

El modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de producción de sedimentos a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 40, el 58% de la subcuenca tiene problemas de sedimentación desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 46% (2222 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos, cultivo-pasto y cenizas; este resultado es muy alto comparado con

los anteriores escenarios. Cabe mencionar que el restante 42% (2036 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría nula a ligera de producción de sedimentos, ubicándose principalmente en áreas de bosques y charral.

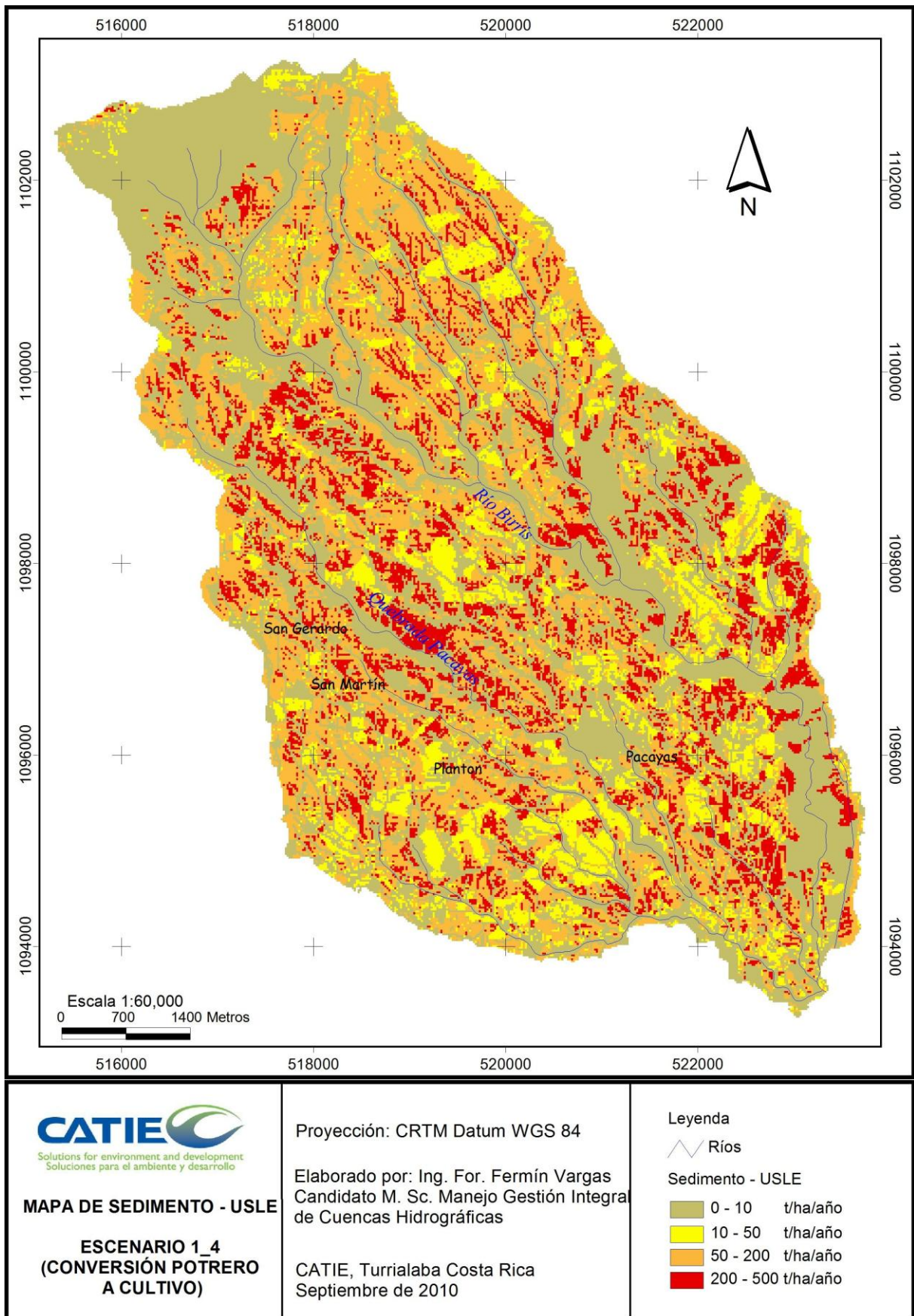


Figura 33. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_4.

4.2.2.5 Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo

En este escenario (Figura 34), el sedimento producido a la salida de la subcuenca es de 68 t/ha/año, 20 t/ha/año más que el escenario base, haciendo un total de 331 024 t/año para toda la subcuenca. Haciendo énfasis en las áreas de estudio para determinar la pérdida de COS, se puede mencionar de que el uso cultivo, produce el mayor promedio de sedimentos, 144 t/ha/año y una altura de lámina de 16 mm; para el uso de suelo potrero se estimó una producción de sedimento de 7 t/ha/año y una altura de lámina de 0,8 mm, que está entre las más bajas (Cuadro 41).

Como se puede apreciar, en estos resultados, sucede algo similar comparado con el escenario 1_2, la diferencia, es que en este escenario, el uso mixto pasa a convertirse en cultivo, entonces contrario a este escenario, el sedimento producido tiende a aumentar, a nivel uso cultivo y a nivel de la subcuenca. El uso cultivo-pasto (mixto), tuvo mucha incidencia en la producción de sedimentos en este escenario, debido principalmente, a un factor “C” muy alto (0,340), que adquiere al momento de la conversión a uso cultivo, aunque su área, sea relativamente pequeño (13%) a nivel de la subcuenca.

Cuadro 41. Pérdida de sedimento en el escenario 1_5.

Uso de suelo	Sedimento total (t/año)	Sedimento total (%)	Sedimento promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2458,71	0,74	1,76	0,20
Charral	401,45	0,12	8,52	0,98
Potrero	7534,18	2,28	6,87	0,79
Area urbana	104,84	0,03	1,33	0,15
Cultivo-pasto	0,00	0,00	0,00	0,00
Cultivo	320005,22	96,67	144,43	16,60
Cenizas	520,03	0,16	82,81	9,52
Total	331024,43	100,00		
Promedio (t/ha/año)	68,41			

Los valores de sedimentación puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 42. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_5.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	2710,92	56,42
10-50	Moderada	333,32	6,94
50-200	Severa	1200,76	24,99
200-500	Muy severa	560,24	11,66
Total		4805,24	100,00

El modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de producción de sedimentos a nivel subcuena. Como por ejemplo, se puede observar en el cuadro 42, el 44% de la subcuena tiene problemas de sedimentación desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 37% (1761 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cultivos y cenizas. Pero también cabe rescatar que el restante 56% (2710,9 ha) a nivel subcuena presenta una categoría nula a ligera de producción de sedimentos, ubicándose principalmente en áreas de bosques, potreros y charral.

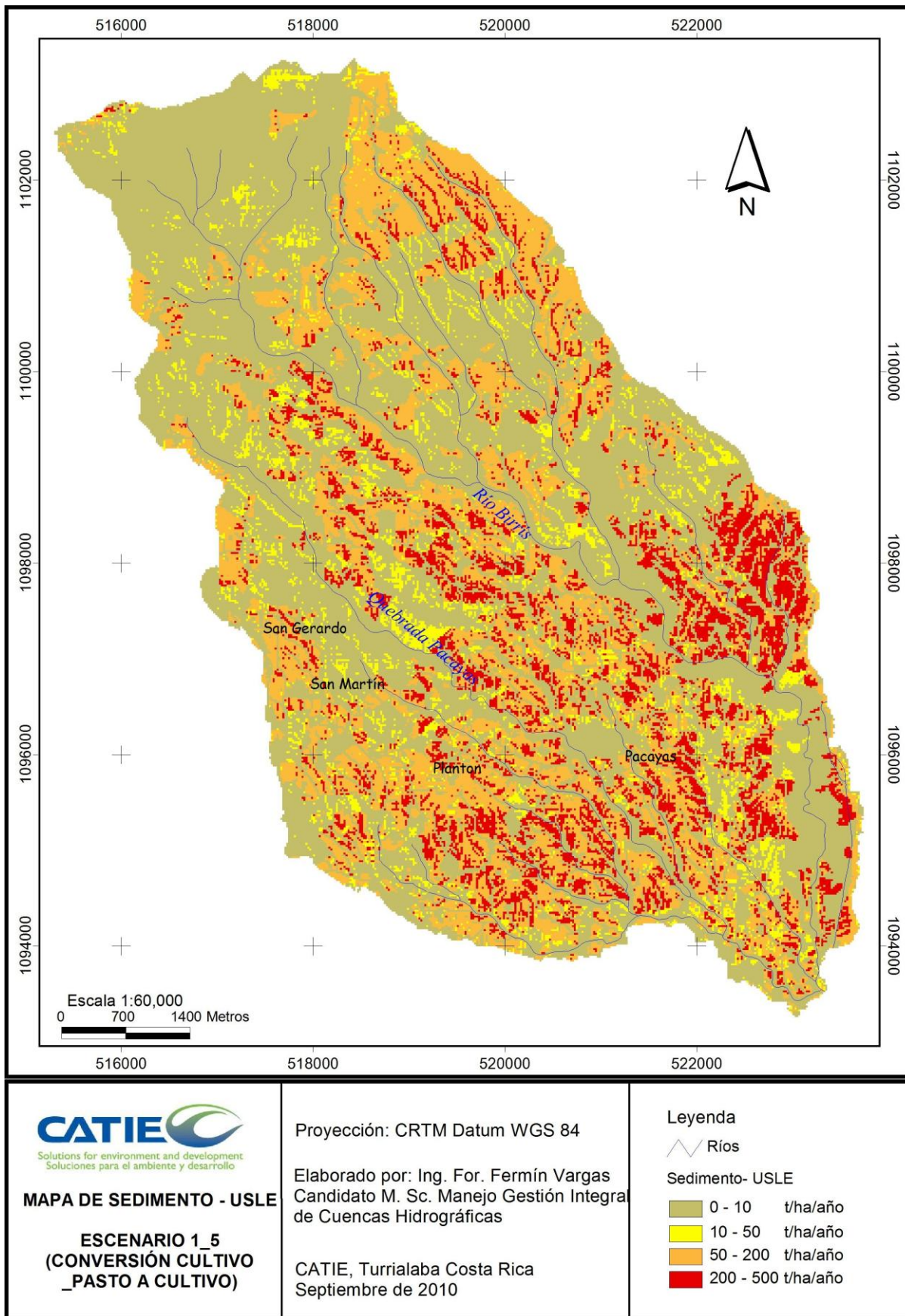


Figura 34. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_5.

4.2.2.6 Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles

Con base al mapa de este escenario, (Figura 34) el sedimento producido a la salida de la subcuenca, es de 15 t/ha/año, 34 t/ha/año menos que el escenario base, haciendo un total de 74 209 t/año para toda la subcuenca. Haciendo énfasis en las áreas de estudio, el uso de suelo sistema agroforestal produce en promedio, 35 t/ha/año de sedimentos y una altura de lámina de 3 mm, entre las más altas a nivel subcuenca; el uso sistema silvopastoril produce 1 t/ha/año y una altura de lámina de 0,1 mm, la más baja a nivel subcuenca (Cuadro 43).

Prácticamente, este escenario produce el doble de sedimentos que el escenario 1_3, es decir, también tiene una producción muy baja. Esto, se debe primordialmente a la mejora del sistema de producción agropecuaria en la subcuenca, donde los usos de suelos cultivos y potreros, han sido mejorados, con la implementación de sistemas agroforestales y silvopastoriles y sus factores “C” reducidos 0,086 y 0,002 respectivamente. También el uso cultivo-potrero, es mejorado con la combinación de estos sistemas de producción, donde su factor “C” es 0,044.

Cuadro 43. Pérdida de sedimento en el escenario 1_6.

Uso de suelo	Sedimento total (t/año)	Sedimento total (%)	Sedimento promedio (t/ha/año)	h lámina (mm)
Bosque	2296,82	3,10	1,65	0,19
Charral	401,45	0,54	8,52	0,98
Sist. Silvop.	1181,24	1,59	1,08	0,12
Area urbana	82,75	0,11	1,05	0,12
Cultivo-Pasto(mixto)	14397,57	19,40	23,23	2,67
Sist. Agrof.	55329,00	74,56	34,67	3,99
Cenizas	520,03	0,70	82,81	9,52
Total	74208,87	100,00		
Promedio (t/ha/año)	15,34			

Los valores de sedimentación puntual estimados por el CALSITE - USLE en t/ha/año, fueron clasificados según el criterio pérdida de suelo de la FAO (1979) citado por Gómez Delgado (2002). A continuación se mencionan los rangos de pérdida de suelo:

Cuadro 44. Rangos de pérdida de sedimento en el escenario 1_6.

Pérdida de suelo (t/ha/año)	Categoría	Área (ha)	Área (%)
0-10	Nula a ligera	3027,44	63,00
10-50	Moderada	1379,40	28,71
50-200	Severa	394,72	8,21
200-312	Muy severa	3,68	0,08
Total		4805,24	100,00

La aplicación del modelo CALSITE - USLE permitió determinar las áreas críticas de producción de sedimentos a nivel subcuenca. Como se puede observar en el cuadro 44, el 37% de la subcuenca tiene problemas de sedimentación desde moderada, severa a muy severa, de los cuales el 8% (398,40 ha) se consideran severos y muy severos (>50 t/ha/año), ubicándose estos principalmente en cenizas, mixto y sistemas agroforestales. El restante 63% (3027,44 ha) a nivel subcuenca presenta una categoría nula a ligera de producción de sedimentos, ubicándose principalmente en áreas de sistemas silvopastoriles, bosques y charral.

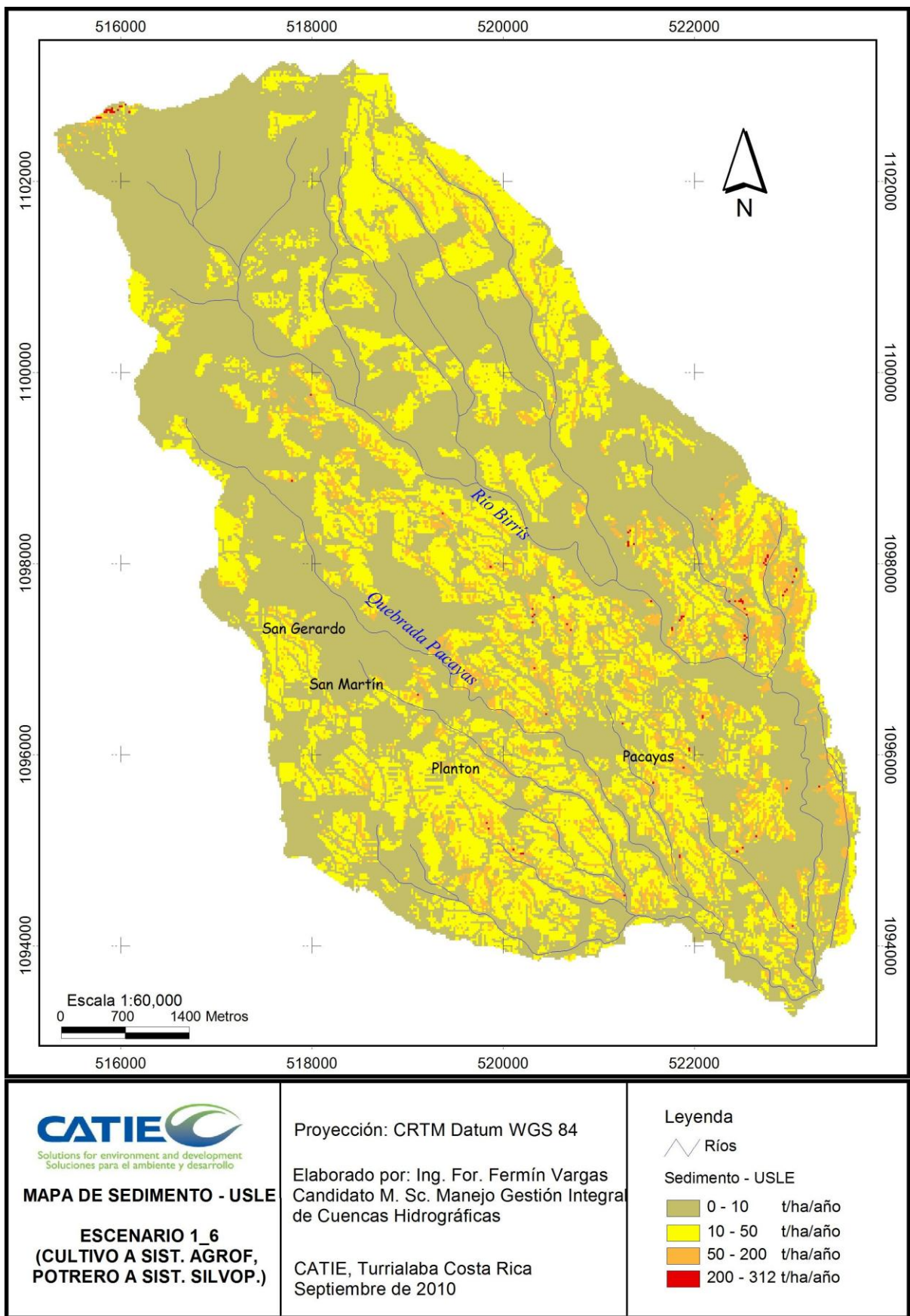


Figura 35. Mapa de sedimentos por rangos de pérdida: Escenario 1_6.

4.3 Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial

A continuación se describen los resultados del contenido, perdido, que podría perderse, retenido y lo que se podría retener de COS, tanto por sedimento y erosión potencial, en cada escenario. Estos resultados corresponden solo a los dos usos de suelo considerados en el presente estudio, como son cultivos y potreros. Los otros usos no fueron estudiados para lo que corresponde el COS.

Cuando se menciona COS perdido y retenido, se refiere al COS perdido con el sedimento hasta la salida de la subcuenca, mientras que el COS que podría perderse y retenerse, hace referencia al COS que potencialmente podría perderse por la erosión laminar. A continuación se muestra la relación utilizada para estimar estos resultados:

$$\text{COS (t/ha/año) que se pierde} = \frac{\text{sedimento (t/ha/año)} \times \text{COS (\%)}}{100\%}$$

$$\text{COS (t/ha/año) que se podría perder} = \frac{\text{Erosión P. (t/ha/año)} \times \text{COS (\%)}}{100\%}$$

4.3.1 Escenario base 1_1: uso de suelo actual

En este escenario se hace el estudio y comparación del contenido, pérdida y retención de COS por sedimento y erosión potencial de dos usos de suelos: cultivos y potreros (pasto).

a) Contenido de COS

El contenido del COS se estimó para una profundidad de 0 - 10 cm. Con base a los resultados, se observa que los contenidos promedios del COS, muestran una tendencia a existir diferencias entre el cultivo y potrero, 49,2 t/ha y 75,9 t/ha respectivamente. Si bien es cierto, que el área del uso potrero es 10% menos que el uso cultivo, tiene un promedio elevado de porcentaje de COS (8,7), frente a 5,7 del uso cultivo, de ahí el alto contenido de COS en el uso potrero. Este contenido de COS, tanto para el uso cultivo, potrero, agroforestal y silvopastoril, es el mismo para cada escenario, donde existieran estos usos mencionados, además estos contenidos sirven como referencia para estimar la pérdida y retención de COS.

b) Pérdida y retención de COS por sedimento

El uso de suelo cultivo produce en promedio 132,8 t/ha/año de sedimento, por lo que se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio, 7,5 t/ha/año de COS, en cambio, el uso potrero tiene una producción de sedimentos de 6,8 t/ha/año, con lo cual se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio, 0,6 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 45). Como la producción de sedimentos es alta en el uso cultivo, así también la pérdida de COS es alta, a pesar de que este uso de suelo, es un poco pobre en porcentaje de COS, contrario al uso potrero.

De acuerdo a Lal (2005b) la concentración del COS en proximidades de la superficie del suelo y tener una menor densidad que los minerales, facilita a ser transportado por la escorrentía, distribuyéndose en sitios depresionales y enterrados con los sedimentos. El COS, enterrado más o menos a 20 cm, está protegido y no es fácilmente mineralizado.

En relación a la retención, el uso cultivo retiene en promedio 41,7 t/ha/año de COS y el uso potrero retiene en promedio 75,4 t/ha/año, se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos.

De acuerdo al resultado anterior, se confirma que los cultivos perennes, como los pastizales, retienen más carbono en el suelo que los cultivos a base de rotaciones (anuales). Dicho de otra manera, el uso de suelo potrero, tiende a asimilar más CO₂ a través de la fotosíntesis que el uso cultivo en este escenario.

c) COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo alcanza, en promedio, una erosión potencial de 190 t/ha/año, con lo cual se podría perder a nivel de subcuenca en promedio 10,7 t/ha/año de COS, en cambio el uso potrero presenta una erosión potencial de suelo de 7 t/ha/año, con lo cual se podría perder a nivel subcuenca, en promedio 0,6 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo podría retener, en promedio 38,5 t/ha/año de COS y el uso potrero retendría mucho más, en promedio 75,3 t/ha/año. Se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 45).

Cuadro 45. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.

COS	Uso de suelo	Mínimo t/año	Mín. t/ha/año	Promedio t/año	Prom. t/ha/año	Máximo t/año	Max. t/ha/año
Contenido (t)*	Cultivo	70809,20	44,37	78584,32	49,24	86220,61	54,03
	Potrero	67619,37	61,68	83260,52	75,95	98997,05	90,31
Perdido (sedimento)	Cultivo	10809,70	6,77	11996,65	7,52	13162,40	8,25
	Potrero	530,99	0,48	653,81	0,60	777,39	0,71
**Que podría perderse (E.P.)	Cultivo	15452,77	9,68	17149,54	10,75	18816,02	11,79
	Potrero	555,69	0,51	684,23	0,62	813,55	0,74
Retenido (sedimento)	Cultivo	59999,49	37,60	66587,67	41,72	73058,21	45,78
	Potrero	67088,38	61,20	82606,71	75,35	98219,66	89,60
Que podría retenerse (E.P)	Cultivo	55356,43	34,69	61434,78	38,50	67404,59	42,24
	Potrero	67063,68	61,18	82576,30	75,33	98183,50	89,56

*El contenido de COS se considera solo en t y en t/ha, pues no se tiene el dato para este estudio de cuantas t podría acumular por año.

**E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en las coberturas cultivo y potrero, en relación al COS, en el uso cultivo, se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En cambio, en el uso potrero, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, dicho de otra manera la retención tendería a ser igual en ambos casos (Figura 36).

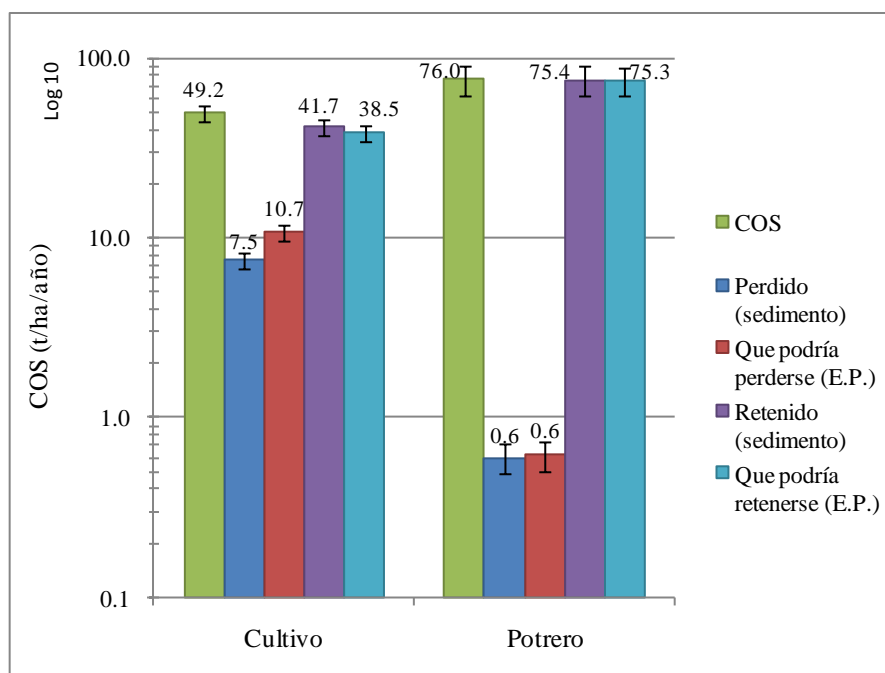


Figura 36. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.

4.3.2 Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero

En este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención del COS por sedimento y erosión potencial de dos coberturas: cultivos y potreros (pasto).

a) Pérdida y retención de COS por sedimento

El uso de suelo cultivo produce en promedio, 132,7 t/ha/año de sedimento, con lo cual se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio, 7,5 t/ha/año de COS, en cambio, en el uso potrero se estimó una producción de sedimentos de 7,2 t/ha/año, con lo cual se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio, 0,6 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo retiene en promedio 41,7 t/ha/año de COS y el uso potrero retiene, en promedio 75,3 t/ha/año, también se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 46).

b) COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo alcanza, en promedio, una erosión potencial de 190 t/ha/año, con lo cual se podría perder a nivel subcuenca, en promedio, 10,7 t/ha/año de COS, en cambio el uso potrero presenta una erosión potencial de 8 t/ha/año, con lo cual se podría perder a nivel subcuenca, en promedio 0,7 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En relación a la retención, el uso cultivo podría retener, en promedio, 38,5 t/ha/año de COS y el uso potrero retendría, en promedio, 75,3 t/ha/año. Se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 46).

Cuadro 46. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.

COS	Uso de suelo	Mínimo t/año	Min. t/ha/año	Promedio t/año	Prom. t/ha/año	Máximo t/año	Max. t/ha/año
Perdido (sedimento)	Cultivo	10806,24	6,77	11992,80	7,51	13158,18	8,25
	Potrero	870,88	0,51	1072,32	0,62	1275,00	0,74
*Que podría perderse (E.P.)	Cultivo	15448,78	9,68	17145,12	10,74	18811,16	11,79
	Potrero	960,35	0,56	1182,49	0,69	1405,99	0,82
Retenido (sedimento)	Cultivo	60002,96	37,60	66591,52	41,73	73062,43	45,78
	Potrero	104977,15	61,18	129259,59	75,33	153690,10	89,56
*Que podría retenerse (E.P.)	Cultivo	55360,41	34,69	61439,20	38,50	67409,45	42,24
	Potrero	104887,68	61,12	129149,42	75,26	153559,11	89,49

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en las coberturas cultivo y potrero, en relación al COS, en el uso cultivo, se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso potrero, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, o sea que la retención tendería a ser igual en ambos casos (Figura 37).

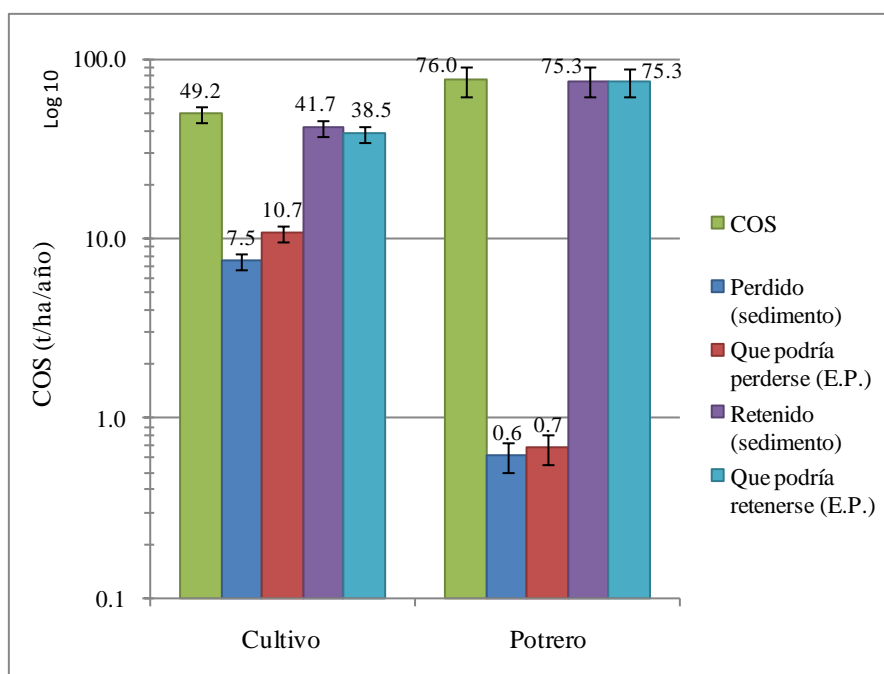


Figura 37. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.

4.3.3 Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero

Con base a este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención de COS por sedimento y erosión potencial, de la cobertura potrero (pasto).

a) Pérdida y retención de COS por sedimento

En el uso potrero se estimó una producción de sedimentos de 5,9 t/ha/año, con lo cual se tiende a perder a la salida de la subcuenca, en promedio, 0,5 t/ha/año de COS y se retiene o queda en el suelo después de la pérdida, en promedio 75,4 t/ha/año de COS (Cuadro 47).

b) COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo potrero presenta una erosión potencial de 7,3 t/ha/año, con lo cual se tendería a perder a nivel subcuenca, en promedio, 0,6 t/ha/año de COS y se retendría o quedaría en el suelo después de lo que se podría perder, en promedio, 75,3 t/ha/año de COS (Cuadro 47).

Cuadro 47. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.

COS	Uso de suelo	Mínimo t/año	Mín. t/ha/año	Promedio t/año	Prom. t/ha/año	Máximo t/año	Máx. t/ha/año
Perdido (sedimento)	Potrero	1118,22	0,42	1376,88	0,51	1637,11	0,61
*Que podría perderse (E.P.)	Potrero	1388,72	0,52	1709,95	0,64	2033,14	0,76
Retenido (sedimento)	Potrero	164939,82	61,27	203092,33	75,44	241477,47	89,70
*Que podría retenerse (E.P.)	Potrero	164669,31	61,17	202759,25	75,32	241081,45	89,55

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en la cobertura potrero, en relación al COS, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, o sea la retención tendería a ser igual en ambos casos (Figura 38).

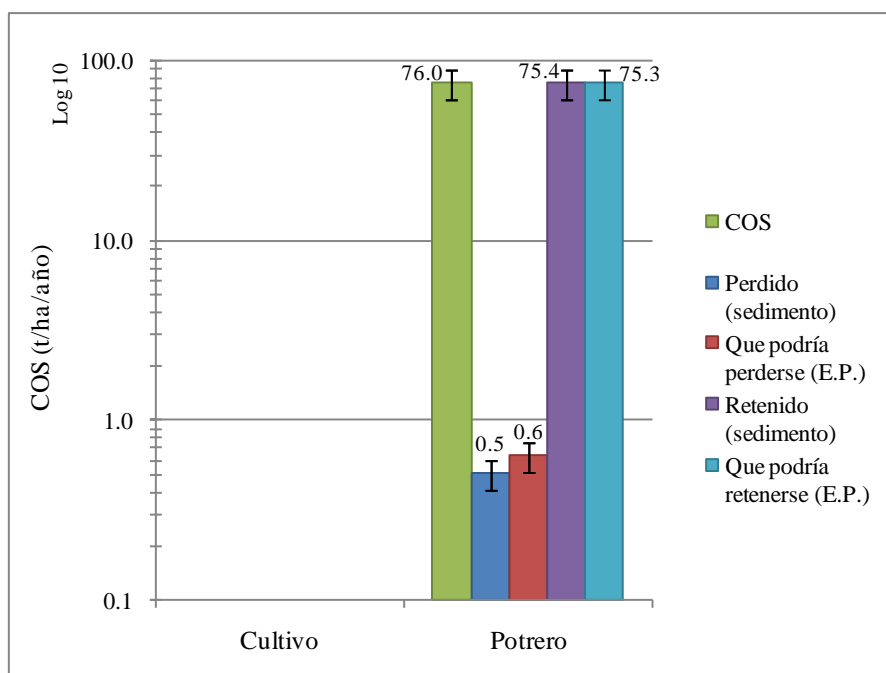


Figura 38. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.

4.3.4 Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo

Contrario al anterior, en este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención de COS por sedimento y erosión potencial, del uso de suelo cultivo.

a) Pérdida y retención de COS por sedimento

En el uso cultivo se estimó una producción de sedimentos de 148,5 t/ha/año, con lo cual se tiende a perder a la salida de la subcuenca, en promedio 8,4 t/ha/año de COS y se retiene o queda en el suelo después de la pérdida, en promedio 40,8 t/ha/año de COS (Cuadro 48).

b) COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo presenta una erosión potencial de 185 t/ha/año, con lo cual se tendería a perder a nivel de la subcuenca, en promedio 10,5 t/ha/año de COS y se retendría o quedaría en el suelo después de lo que se podría perder en promedio 38,8 t/ha/año de COS (Cuadro 48).

Cuadro 48. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.

COS	Uso de suelo	Mínimo t/año	Mín. t/ha/año	Promedio t/año	Prom. t/ha/año	Máximo t/año	Máx. t/ha/año
Perdido (sedimento)	Cultivo	20387,17	7,57	22625,76	8,40	24824,38	9,22
*Que podría perderse (E.P)	Cultivo	25367,90	9,42	28153,39	10,46	30889,15	11,47
Retenido (sedimento)	Cultivo	99062,19	36,80	109939,61	40,84	120622,79	44,81
*Que podría retenerse (E.P.)	Cultivo	94081,47	34,95	104411,98	38,78	114558,02	42,55

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en la cobertura cultivo, en relación al COS, se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, se observa lo contrario, no hay tendencias a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, dicho de otra manera la retención tendería a ser igual en ambos casos (Figura 39).

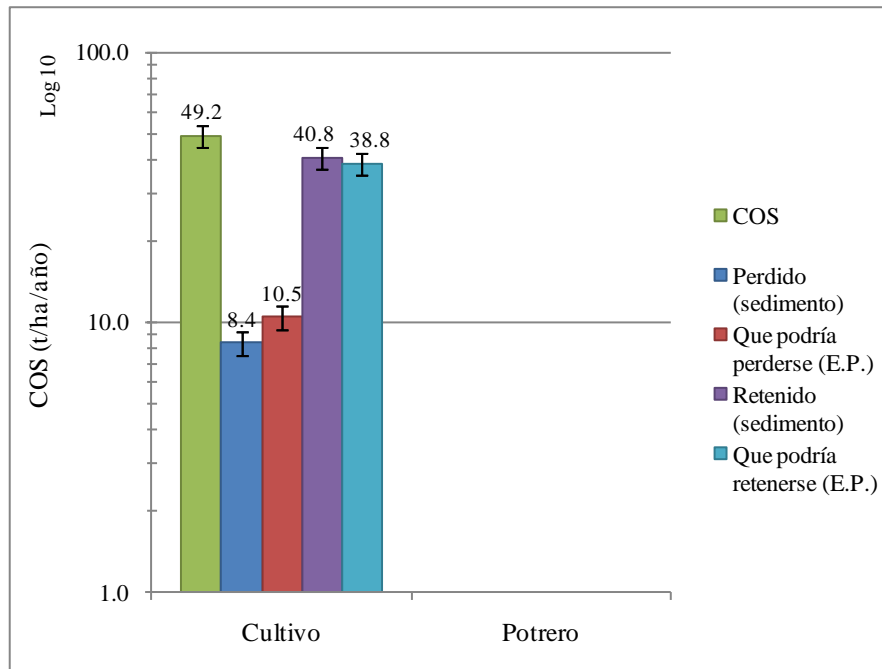


Figura 39. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.

4.3.5 Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo

a) Pérdida y retención de COS por sedimento

El uso de suelo cultivo produce en promedio 144,4 t/ha/año de sedimento, con lo cual se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio, 8,2 t/ha/año de COS, en cambio, el uso potrero tiene una producción promedio de 6,9 t/ha/año de sedimento, por lo que se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio, 0,6 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención el uso cultivo retiene en promedio 41,1 t/ha/año COS, en cambio el uso potrero retiene, en promedio 75,4 t/ha/año, se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 49).

b) COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo, alcanza en promedio una erosión potencial de 192,5 t/ha/año, con lo cual se podría perder a nivel subcuenca, en promedio, 10,9 t/ha/año de COS, en cambio el uso potrero presenta una erosión potencial de 7,2 t/ha/año, por lo que se podría perder a nivel de subcuenca en promedio 0,6 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso de suelo cultivo podría retener, en promedio, 38,4 t/ha/año de COS y el uso potrero retendría, en promedio, 75,3 t/ha/año. Se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 49).

Cuadro 49. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5.

COS	Uso de suelo	Mínimo (t/año)	Mín. (t/ha/año)	Promedio (t/año)	Prom. (t/ha/año)	Máximo (t/año)	Máx. (t/ha/año)
Perdido (sedimento)	cultivo	16320,27	7,37	18112,30	8,17	19872,32	8,97
	potrero	534,17	0,49	657,73	0,60	782,05	0,71
*Que podría perderse (E.P.)	cultivo	21750,96	9,82	24139,30	10,89	26484,99	11,95
	potrero	559,66	0,51	689,12	0,63	819,37	0,75
Retenido (sedimento)	cultivo	81987,68	37,00	90990,25	41,07	99832,06	45,06
	potrero	67085,20	61,20	82602,79	75,35	98215,00	89,59
*Que podría retenerse (E.P.)	cultivo	76556,99	34,55	84963,25	38,35	93219,39	42,07
	potrero	67059,71	61,17	82571,40	75,32	98177,68	89,56

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en los usos de suelos cultivos y potreros, en relación al COS, en el uso cultivo, se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso potrero, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, o sea la retención tendería a ser igual en ambos casos (Figura 40).

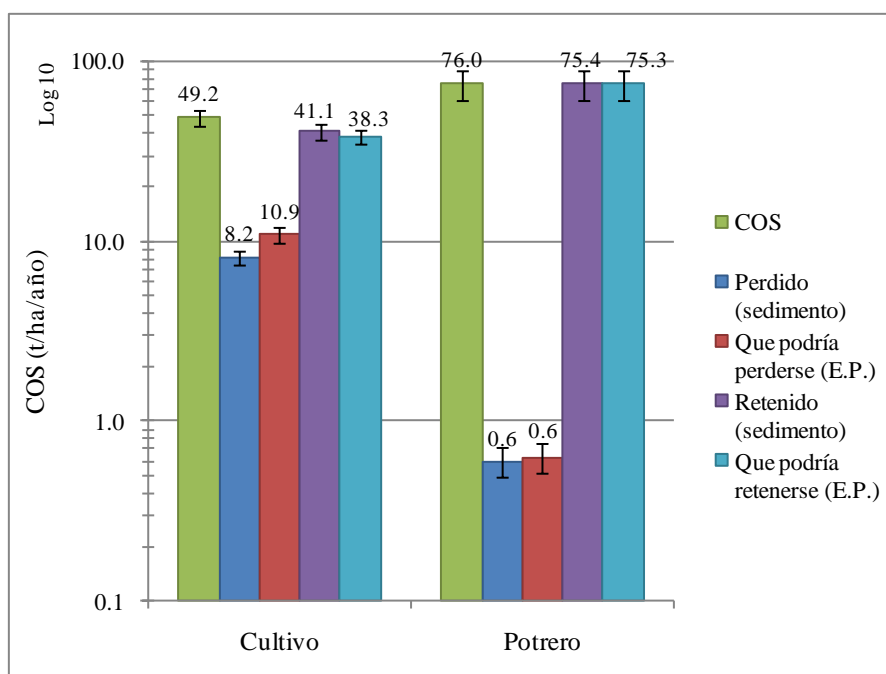


Figura 40. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5.

4.3.6 Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles

En este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención de COS por sedimento y erosión potencial de dos coberturas: sistemas agroforestales y sistemas silvopastoriles.

a) Pérdida y retención de COS por sedimento

El uso de suelo agroforestal produce en promedio 34,8 t/ha/año de sedimento, por lo que se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio 2 t/ha/año de COS, en cambio, el uso de suelo silvopastoril tiene una producción promedio de sedimentos de 1,1 t/ha/año, con lo cual se pierde a la salida de la subcuenca, en promedio 0,1 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En relación a la retención, el uso agroforestal retiene, en promedio, 47,3 t/ha/año de COS y el silvopastoril retiene, en promedio, 75,9 t/ha/año. Se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 50).

b) COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo agroforestal presenta, en promedio, una erosión potencial de 49,4 t/ha/año, con lo cual se podría perder a nivel de la subcuenca, 2,8 t/ha/año de COS, en cambio el uso silvopastoril presenta una erosión potencial de 1,1 t/ha/año, con lo cual podría perder en promedio 0,1 t/ha/año de COS. Se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso agroforestal podría retener, en promedio, 46,5 t/ha/año de COS y el uso silvopastoril retendría, en promedio, 75,9 t/ha/año. Se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 50).

Cuadro 50. Pérdida de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.

COS	Uso de suelo	Mínimo t/año	Mín. t/ha/año	Promedio t/año	Prom. t/ha/año	Máximo t/año	Máx. t/ha/año
Perdido (sedimento)	Sist. Agrof.	2821,78	1,77	3131,62	1,96	3435,93	2,15
	Sist. Silvop.	83,75	0,08	103,12	0,09	122,61	0,11
*Que podría perderse (E.P.)	Sist. Agrof.	4017,84	2,52	4459,01	2,79	4892,31	3,07
	Sist. Silvop.	88,33	0,08	108,76	0,10	129,31	0,12
Retenido (sedimento)	Sist. Agrof.	67987,42	42,60	75452,70	47,28	82784,68	51,87
	Sist. Silvop.	67535,62	61,61	83157,40	75,86	98874,44	90,19
*Que podría retenerse (E.P.)	Sist. Agrof.	66791,36	41,85	74125,31	46,45	81328,30	50,96
	Sist. Silvop.	67531,04	61,60	83151,77	75,85	98867,73	90,19

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en las coberturas agroforestal y silvopastoril, en relación al COS, en el uso agroforestal, se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso silvopastoril, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el

COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, dicho de otra manera la retención tendería a ser igual en ambos casos (Figura 41).

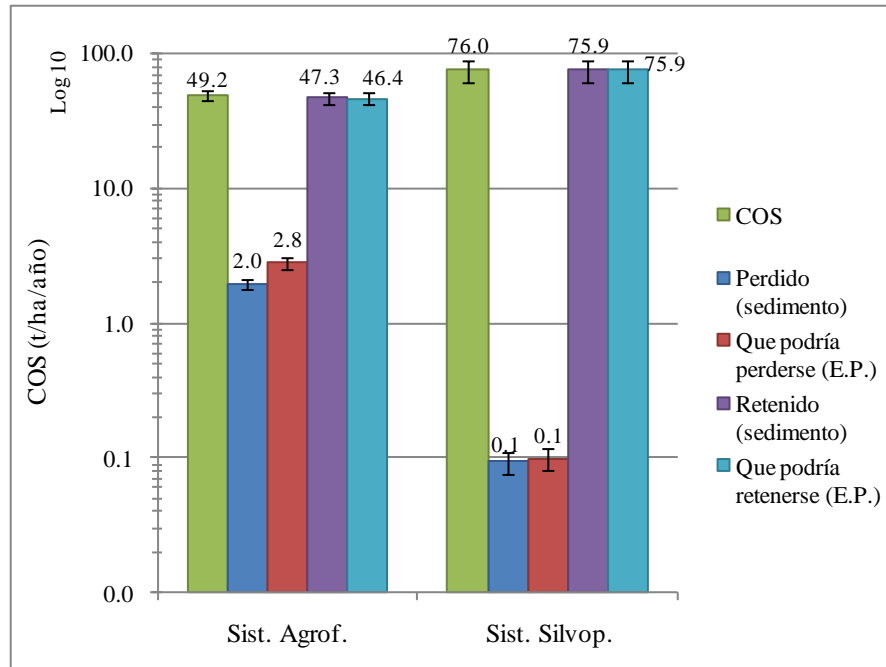


Figura 41. Pérdida por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.

4.4 Pérdida económica del COS por sedimento y erosión potencial

A continuación se describen los resultados del contenido, perdido, que podría perderse, retenido y lo que se podría retener económicamente COS, tanto por sedimento como por erosión potencial, en cada escenario. Estos resultados corresponden solo a dos usos de suelos en estudio: cultivos y potreros. Los demás usos no fueron estudiados para lo que corresponde la pérdida económica de COS.

Cuando se hace mención del monto económico de COS que se pierde y retenido, se refiere al monto económico de COS perdido con el sedimento hasta la salida de la subcuenca. El monto económico de COS que podría perderse y retenerse, hace referencia al monto económico de COS que potencialmente podría perderse por la erosión laminar. A continuación se muestra la relación utilizada para estimar Valor Económico (VE):

$$\text{VE (US\$/ha/año) del COS que se pierde} = \text{COS perdido sed. (t/ha/año)} \times 3,67 \times \text{Precio (US\$)}$$

$$\text{VE (US\$/ha/año) del COS que se podría perder} = \text{COS que se podría perder EP. (t/ha/año)} \times 3,67 \times \text{Precio (US\$)}$$

Donde:

$$1\text{tCOS} = 3,67 \text{ t CO}_2\text{eq}$$

En cuanto a los precios, estos fueron obtenidos de Ecosystem Marketplace (2010) y fijados en US\$/t CO₂eq con base al 2009:

Ganadería = 5,7

Suelos agrícolas = 1,2

Sistemas agroforestales = 5,2

Sistemas silvopastoriles = 5,7

4.4.1 Escenario base 1_1: uso de suelo actual

En este escenario se hace el estudio y comparación del contenido, pérdida y retención económica, de COS por sedimento y erosión potencial de los usos de suelos: cultivos y potreros (pasto).

a) Valor económico del contenido de COS

Con base a los resultados, se observa que los promedios del contenido de los valores económicos del COS, muestran una tendencia a existir diferencias entre el uso cultivo y potrero, 217 US\$/ha y 1589 US\$/ha respectivamente. Si bien es cierto, que el área del uso potrero es 10% menos que el uso cultivo, tiene un precio elevado de COS (5,7 US\$), frente a 1,2 US\$ del uso cultivo, de ahí el alto valor económico del contenido de COS en el uso potrero. Este valor económico del contenido de COS, tanto para el uso cultivo y potrero es el mismo para cada escenario, a excepción del último escenario 1_6, donde estos usos, cambian a otros uso como son: agroforestales y silvopastoriles, respectivamente. Estos datos del valor económico del contenido de COS, sirven como referencia para estimar el valor económico de la pérdida y retención de COS.

b) Valor económico del COS perdido y retenido por sedimento

En este escenario el uso cultivo pierde económicamente, en promedio, 33 US\$/ha/año, mientras que el uso potrero pierde, en promedio, 12 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo retiene, en promedio, 183 US\$/ha/año y el uso potrero retiene, en promedio 1576 US\$/ha/año, observándose también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 63).

c) Valor económico del COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo podría perder, en promedio, 47 US\$/ha/año, mientras que el uso potrero, podría perder, en promedio, 13 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo podría retener, en promedio, 169 US\$/ha/año. En cambio, el uso potrero podría retener, en promedio, 1575 US\$/ha/año, se observa también, una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 51).

Cuadro 51. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.

COS	Uso de suelo	Mínimo US\$/año	Mín. US\$/ha/año	Promedio US\$/año	Prom. US\$/ha/año	Máximo US\$/año	Máx. US\$/ha/año
*Contenido (US\$)	Cultivo	311843,70	195,41	346085,36	216,86	379715,56	237,93
	Potrero	1414529,64	1290,35	1741726,91	1588,82	2070919,28	1889,11
Perdido (Sedimento)	Cultivo	47605,93	29,83	52833,25	33,11	57967,22	36,32
	Potrero	11107,79	10,13	13677,15	12,48	16262,18	14,83
**Que podría perderse (E.P.)	Cultivo	68053,99	42,64	75526,58	47,33	82865,74	51,92
	Potrero	11624,49	10,60	14313,37	13,06	17018,65	15,52
Retenido (Sedimento)	Cultivo	264237,77	165,57	293252,11	183,76	321748,34	201,61
	Potrero	1403421,85	1280,21	1728049,76	1576,34	2054657,10	1874,28
**Que podría retenerse (E.P.)	Cultivo	243789,71	152,76	270558,78	169,54	296849,82	186,01
	Potrero	1402905,15	1279,74	1727413,54	1575,76	2053900,63	1873,59

*El valor económico del contenido de COS se considera solo en US\$ y en US\$/ha.

**E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial, en los usos de suelo cultivo y potrero, en relación al valor económico del COS, en el uso cultivo, se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso potrero, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, o sea, la retención económica tendería a ser igual en ambos casos (Figura 42).

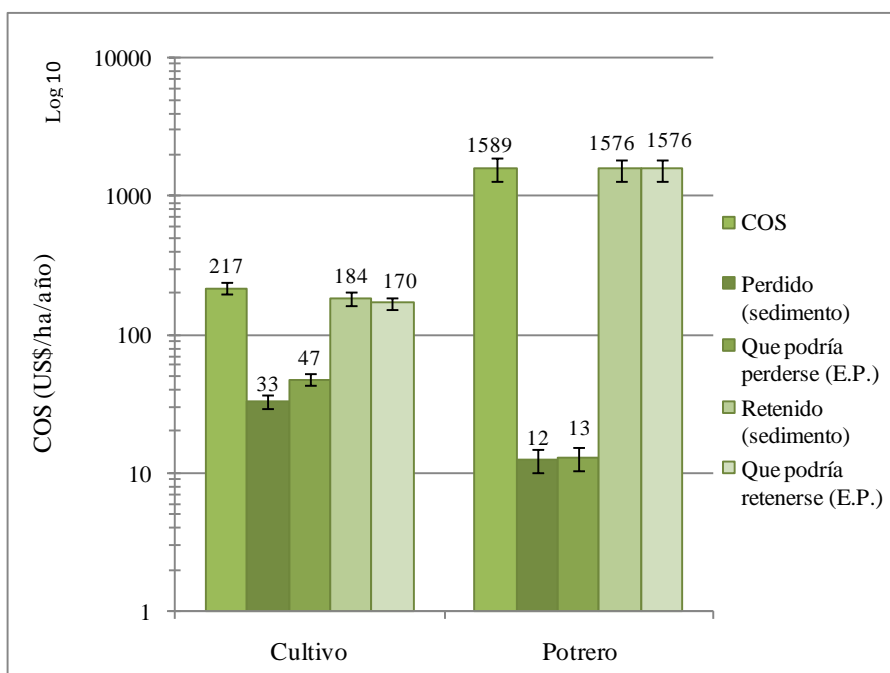


Figura 42. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_1.

4.4.2 Escenario 1_2: conversión cultivo – pasto a potrero

En este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención económica, de COS por sedimento y erosión potencial de dos usos de suelos: cultivos y potreros (pasto).

a) Valor económico del COS perdido y retenido por sedimento

En este escenario el uso cultivo pierde económicamente, en promedio, 33 US\$/ha/año, mientras que el uso potrero pierde, en promedio, 13 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo retiene, en promedio, 183 US\$/ha/año y el uso potrero retiene, en promedio, 1575 US\$/ha/año, observándose también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 52).

b) Valor económico del COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo podría perder, en promedio, 47 US\$/ha/año, mientras que el uso potrero, podría perder, en promedio, 14 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo podría retener, en promedio, 169 US\$/ha/año. En cambio, el uso potrero podría retener, en promedio, 1574 US\$/ha/año, observándose también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 52).

Cuadro 52. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.

COS	Uso de suelo	Mínimo US\$/año	Mín. US\$/ha/año	Promedio US\$/año	Prom. US\$/ha/año	Máximo US\$/año	Máx. US\$/ha/año
Perdido (sedimento)	Cultivo	47590,67	29,82	52816,31	33,10	57948,64	36,31
	Potrero	18217,94	10,62	22431,96	13,07	26671,67	15,54
*Que podría perderse (E.P.)	Cultivo	68036,43	42,63	75507,10	47,31	82844,36	51,91
	Potrero	20089,61	11,71	24736,57	14,42	29411,86	17,14
Retenido (sedimento)	Cultivo	264253,03	165,58	293269,05	183,77	321766,92	201,62
	Potrero	2196016,96	1279,73	2703981,39	1575,75	3215043,17	1873,57
*Que podría retenerse (E.P.)	Cultivo	243807,26	152,77	270578,26	169,55	296871,20	186,02
	Potrero	2194145,29	1278,64	2701676,78	1574,40	3212302,98	1871,97

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial, en los usos de suelo cultivo y potrero, en relación al valor económico del COS, en el uso cultivo, se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cambio en relación a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso potrero, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, dicho de otra manera, la retención económica tendería a ser igual en ambos casos (Figura 43).

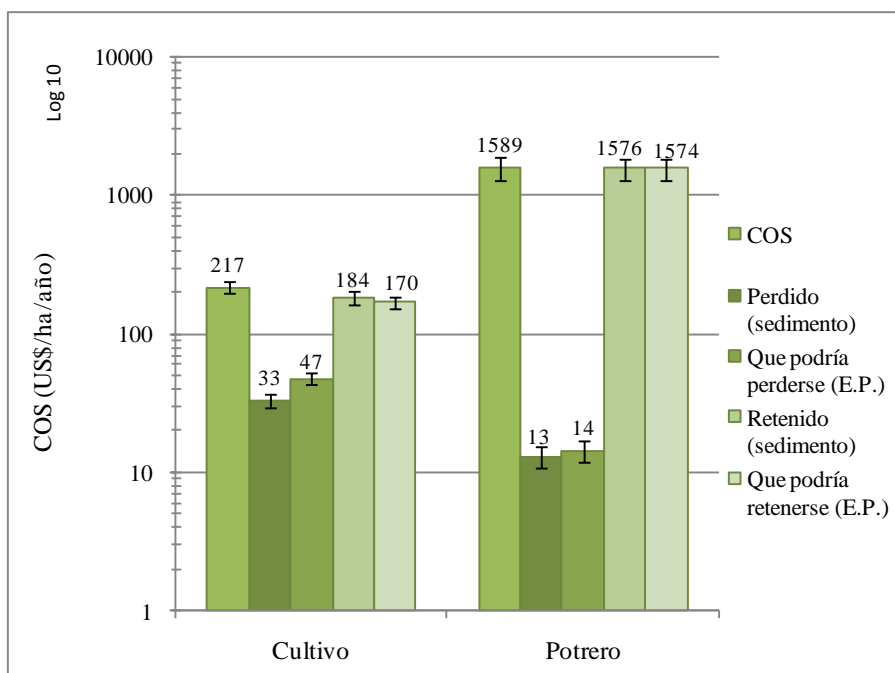


Figura 43. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_2.

4.4.3 Escenario 1_3: conversión cultivo a potrero

Para este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención económica de COS por sedimento y erosión potencial, únicamente del uso de suelo potrero (pasto).

a) Valor económico del COS perdido y retenido por sedimento

En este escenario, el uso potrero tiende a perder económicamente, en promedio, 10 US\$/ha/año y retiene en promedio, 1578 US\$/ha/año (Cuadro 53).

b) Valor económico del COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo potrero tendería a perder económicamente, en promedio, 13 US\$/ha/año y retendría en promedio, 1575 US\$/ha/año (Cuadro 53).

Cuadro 53. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.

COS	Uso de suelo	Mínimo US\$/año	Mín. US\$/ha/año	Promedio US\$/año	Prom. US\$/ha/año	Máximo US\$/año	Máx. US\$/ha/año
Perdido (sedimento)	Potrero	23392,07	8,69	28802,93	10,70	34246,78	12,72
Que podría perderse (E.P.)	Potrero	29050,72	10,79	35770,49	13,29	42531,23	15,80
Retenido (sedimento)	Potrero	3450376,02	1281,66	4248488,39	1578,12	5051467,30	1876,39
Que podría retenerse (E.P.)	Potrero	3444717,38	1279,56	4241520,83	1575,53	5043182,85	1873,31

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en el uso potrero, en relación al valor económico del COS, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cuanto a la retención, también no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial (Figura 44).

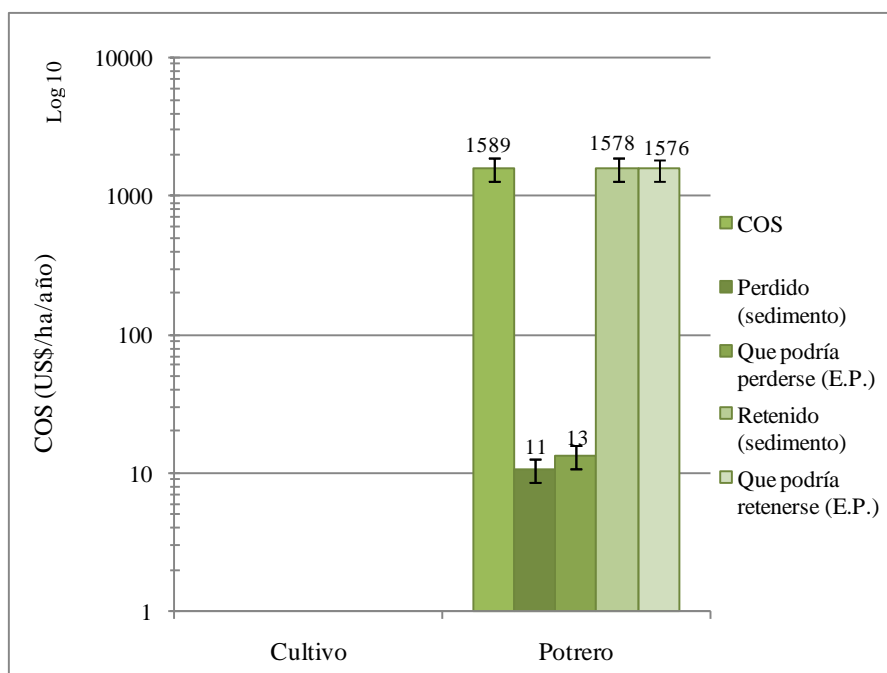


Figura 44. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_3.

4.4.4 Escenario 1_4: conversión potrero a cultivo

Para este escenario, parecido al anterior, se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención económica de COS por sedimento y erosión potencial, solo del uso de suelo cultivo.

b) Valor económico del COS perdido y retenido por sedimento

En este escenario, el uso cultivo tiende a perder económicamente, en promedio, 37 US\$/ha/año y retiene en promedio, 179 US\$/ha/año (Cuadro 54).

c) Valor económico del COS que podría perderse y retenerse por erosión potencial

El uso de suelo potrero tendería a perder económicamente, en promedio, 46 US\$/ha/año y retendría en promedio 170 US\$/ha/año (Cuadro 54).

Cuadro 54. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.

COS	Uso de suelo	Mínimo US\$/año	Mín. US\$/ha/año	Promedio US\$/año	Prom. US\$/ha/año	Máximo US\$/año	Máx. US\$/ha/año
Perdido (sedimento)	Cultivo	89785,11	33,35	99643,86	37,01	109326,57	40,61
*Que podría perderse (E.P.)	Cultivo	111720,23	41,50	123987,55	46,06	136035,81	50,53
Retenido (sedimento)	Cultivo	436269,90	162,05	484174,04	179,85	531222,76	197,33
*Que podría retenerse (E.P.)	Cultivo	414334,77	153,91	459830,36	170,81	504513,52	187,40

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en el uso cultivo, en relación al valor económico del COS, se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial. En cambio en cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial (Figura 45).

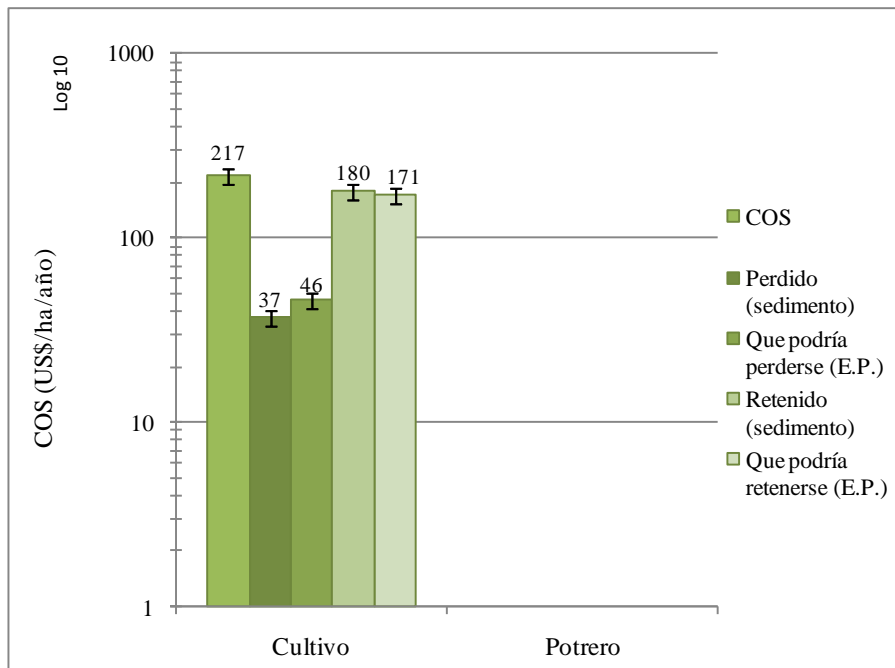


Figura 45. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_4.

4.4.5 Escenario 1_5: conversión cultivo – pasto a cultivo

En este escenario se hace el estudio y comparación de la pérdida y retención económica, de COS por sedimento y erosión potencial de dos usos de suelos: cultivos y potreros (pasto).

a) Valor económico del COS perdido y retenido por sedimento

En este escenario el uso cultivo pierde económicamente, en promedio, 36 US\$/ha/año, mientras que el uso potrero pierde, en promedio, 12 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo retiene, en promedio, 180 US\$/ha/año y el uso potrero retiene, en promedio 1576 US\$/ha/año, también se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 55).

b) Valor económico del COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo cultivo podría perder, en promedio, 47 US\$/ha/año, mientras que el uso potrero, podría perder, en promedio, 13 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso cultivo podría retener, en promedio, 168 US\$/ha/año, en cambio el uso potrero, podría retener, en promedio 1575

US\$/ha/año, también se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 55).

Cuadro 55. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario I_5.

COS	Uso de suelo	Mínimo US\$/año	Mín. US\$/ha/año	Promedio US\$/año	Prom. US\$/ha/año	Máximo US\$/año	Máx. US\$/ha/año
Perdido (sedimento)	Cultivo	71874,45	32,44	79766,55	36,00	87517,72	39,50
	Potrero	11174,37	10,19	13759,13	12,55	16359,65	14,92
*Que podría perderse (E.P.)	Cultivo	95791,22	43,23	106309,47	47,98	116639,90	52,64
	Potrero	11707,61	10,68	14415,72	13,15	17140,33	15,64
Retenido (sedimento)	Cultivo	361073,75	162,97	400721,06	180,86	439660,38	198,43
	Potrero	1403355,27	1280,15	1727967,78	1576,27	2054559,63	1874,19
*Que podría retenerse (E.P.)	Cultivo	337156,98	152,17	374178,14	168,88	410538,20	185,29
	Potrero	1402822,03	1279,67	1727311,19	1575,67	2053778,94	1873,48

*E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial en los usos de suelo cultivo y potrero, en relación al valor económico del COS, en el uso cultivo, se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial, en cambio, en cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso potrero, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, dicho de otra manera la retención económica tiende a ser igual en ambos casos (Figura 46).

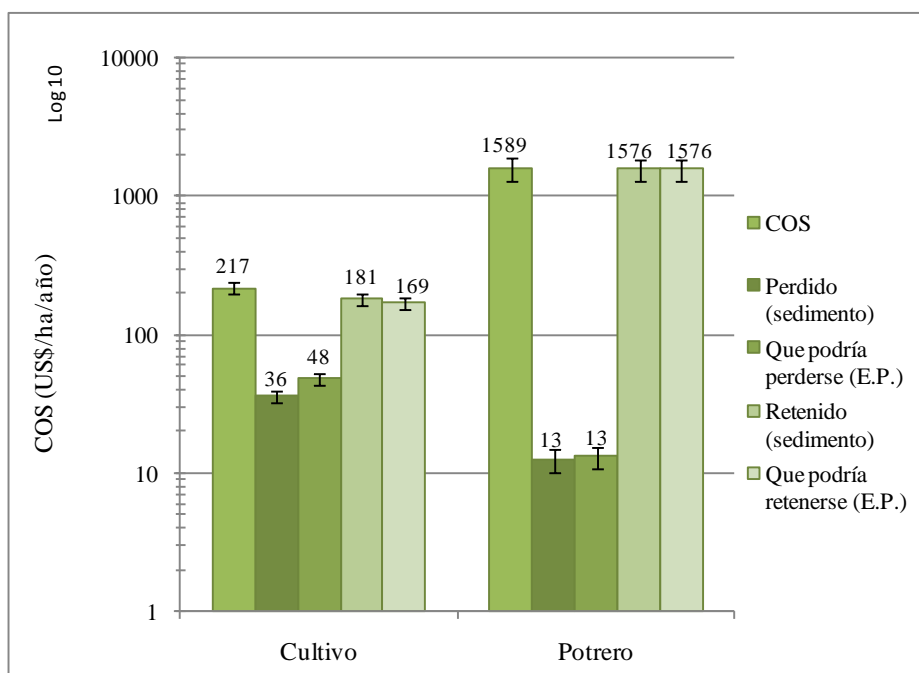


Figura 46. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_5.

4.4.6 Escenario 1_6: conversión cultivos a sistemas agroforestales y potreros a sistemas silvopastoriles

En este escenario se hace el estudio y comparación del contenido, pérdida y retención económica, de COS por sedimento y erosión potencial de los usos de suelos: sistemas agroforestales y sistemas silvopastoriles.

a) Valor económico del contenido de COS

Con base a los resultados, se observa que los promedios del contenido de los valores económicos del COS, muestran una tendencia a existir diferencias entre el uso agroforestal y silvopastoril, 939 US\$/ha y 1588 US\$/ha respectivamente.

b) Valor económico del COS perdido y retenido por sedimento

En este escenario el uso agroforestal pierde económicamente, en promedio, 37 US\$/ha/año, mientras que el uso silvopastoril pierde, en promedio, 1,97 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso agroforestal retiene, en promedio, 902 US\$/ha/año y el uso silvopastoril retiene, en promedio 1586 US\$/ha/año, se observa también una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 56).

c) Valor económico del COS que podría perderse y retener por erosión potencial

El uso de suelo agroforestal podría perder, en promedio, 53 US\$/ha/año, mientras tanto el uso silvopastoril, podría perder en promedio, 2 US\$/ha/año, se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos. En cuanto a la retención, el uso agroforestal podría retener, en promedio, 886 US\$/ha/año, en cambio, el uso silvopastoril podría retener, en promedio, 1586 US\$/ha/año, también se observa una tendencia a existir diferencias entre ambos usos (Cuadro 56).

Cuadro 56. Pérdida económica de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.

COS	Uso de suelo	Mínimo US\$/año	Mín. US\$/ha/año	Promedio US\$/año	Prom. US\$/ha/año	Máximo US\$/año	Máx. US\$/ha/año
*Contenido (US\$)	Sist. Agrof.	1351322,69	846,76	1499703,22	939,73	1645434,10	1031,05
	Sist. Silvop.	1414529,64	1290,35	1741726,91	1588,82	2070919,28	1889,11
Perdido (sedimento)	Sist. Agrof.	53850,83	33,74	59763,86	37,45	65571,30	41,09
	Sist. Silvop.	1751,97	1,60	2157,22	1,97	2564,94	2,34
**Que podría perderser (E.P.)	Sist. Agrof.	76676,42	48,05	85095,80	53,32	93364,82	58,50
	Sist. Silvop.	1847,72	1,69	2275,12	2,08	2705,13	2,47
Retenido (sedimento)	Sist. Agrof.	1297471,86	813,01	1439939,36	902,29	1579862,80	989,96
	Sist. Silvop.	1412777,67	1288,75	1739569,69	1586,85	2068354,34	1886,77
**Que podría retenerse (E.P.)	Sist. Agrof.	1274646,27	798,71	1414607,42	886,41	1552069,28	972,55
	Sist. Silvop.	1412681,92	1288,66	1739451,78	1586,74	2068214,15	1886,64

*El valor económico del contenido de COS se considera solo en US\$ y en US\$/ha.

**E.P. = erosión potencial.

Analizando el comportamiento del sedimento versus la erosión potencial, en los usos de suelo agroforestal y silvopastoril, en relación al valor económico del COS, en el uso agroforestal, se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial, en cambio, en cuanto a la retención, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial. En el uso silvopastoril, no se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS perdido por sedimento y lo que se podría perder por erosión potencial y en cuanto a la retención, tampoco se observa una tendencia a existir diferencias entre el valor económico del COS retenido por sedimento y lo que se podría retener por erosión potencial, dicho de otra manera, la retención económica tiende a ser igual en ambos casos (Figura 47).

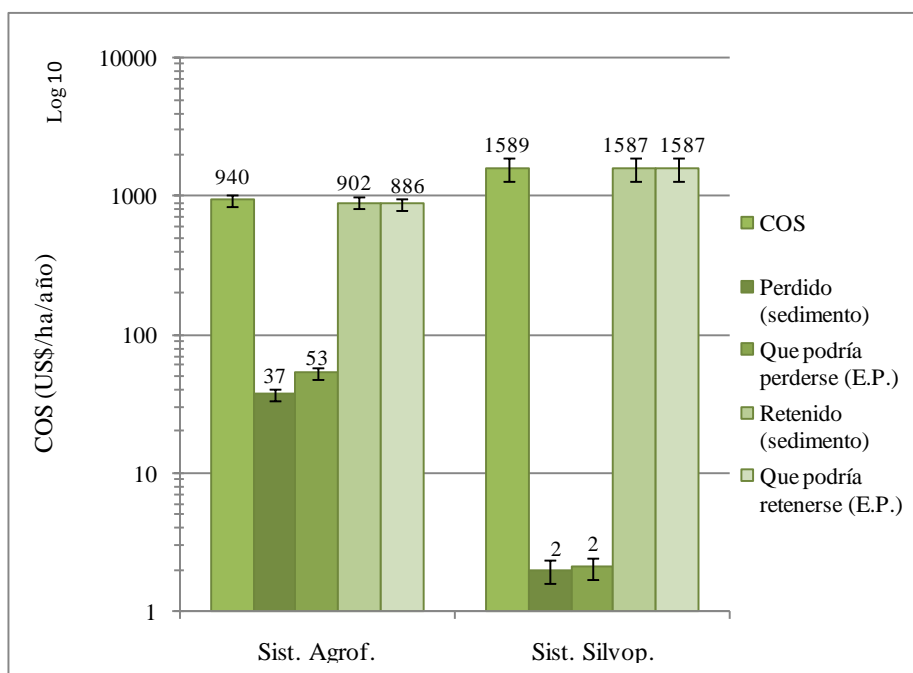


Figura 47. Pérdida económica por ha de COS por sedimento y erosión potencial en el escenario 1_6.

4.5 Resumen de resultados

4.5.1 Erosión potencial y producción de sedimentos por escenarios

En cuanto a la erosión potencial, según el modelo CALSITE – USLE, el escenario 1_4, resulta con mayor erosión potencial, con un incremento del 57%, respecto del escenario base (68 t/ha/año). Contrariamente, donde se presenta la menor erosión, es en el escenario 1_3, con una reducción de 88%, con respecto al escenario base. El factor “C” y el área del uso potrero, influyeron notablemente en estos resultados

Con relación a la producción de sedimentos a la salida de la subcuenca, según el modelo CALSITE – USLE, también en el escenario 1_4, se produce la mayor cantidad de sedimento, con un incremento del 77%, con respecto al escenario base (49 t/ha/año). La menor cantidad, al igual que la erosión potencial, se presentaría en el escenario 1_3, con una reducción de 86%, respecto al escenario base (Cuadro 57).

Cuadro 57. Estimación de la erosión potencial y producción de sedimentos en cada escenario.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo-pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo-pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. y potrero a sist. silvop.</i>
Erosión potencial (t/ha/año)	68,26	66,18	7,88	106,99	90,59	20,71
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		-3	-88	57	33	-70
Sedimento (t/ha/año)	48,84	47,02	6,63	86,26	68,41	15,34
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		-4	-86	77	40	-69
Sedimento (t/año)	236325	227504	32058	417390	331024	74209

Con base al riesgo de erosión potencial, clasificado por la FAO, el escenario 1_4, también, presenta la mayor área de riegos. Se encuentra en la categoría severa a muy severa (>50 t/ha/año) de pérdida de suelos, con una superficie de 2252 ha, con un incremento del 69%, respecto al escenario base. El factor “C” y el área del uso cultivo, influyeron notablemente en estos resultados (Cuadro 58).

Cuadro 58. Riesgo de pérdida de suelos por escenarios.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo-pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo-pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. Y potrero a sist. silvop.</i>
Erosión severa a muy severa (t/ha/año)	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50
Área (ha)	1335	1283	57	2252	1776	765
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		-4	-96	69	33	-43
Área total (ha)	4805	4805	4805	4805	4805	4805

4.5.2 Erosión potencial y producción de sedimentos por usos de suelos

Los niveles más bajos de erosión potencial y producción de sedimentos por usos, se da en el escenario 1_6. Por ejemplo, el uso silvopastoril, presenta la erosión potencial más baja a nivel de la subcuenca, con una reducción de 84%, respecto al escenario base (7,15 t/ha/año). Con relación a la producción de sedimentos, también presenta el nivel más bajo, con una disminución de 84%, respecto al escenario base (6,83 t/ha/año). El uso agroforestal, presenta también uno de los niveles más bajos de erosión potencial, con una reducción de 74%, respecto al escenario base (189,86 t/ha/año). La producción de sedimentos, también presenta el nivel más bajo, con una disminución de 74%, siempre, respecto al escenario base (132,81 t/ha/año) (Cuadro 59).

Si bien es cierto, que en cuanto a la erosión potencial y producción de sedimentos, a nivel escenarios, los niveles más bajos están en el escenario 1_3, donde se cambia el uso cultivo por

potrero. Analizando el comportamiento de la erosión potencial y sedimentos a nivel de usos, los niveles más bajos de los mismos se producen en el escenario 1_6, donde se cambia el uso cultivo por sistemas agroforestales y el uso potrero por sistemas silvopastoriles. Estas diferencias, se deben a que valores de los factores “C” de estos usos del escenario 1_6, son muy bajos, comparados con los usos cultivo y potrero.

Cuadro 59. Estimación de la erosión potencial y sedimentos por usos de suelos en cada escenario.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo-pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo-pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. Y potrero a sist. silvop.</i>
E.P. *cultivo (t/ha/año)	189,86	189,81	NA	184,76	192,49	49,36
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	-3	1	-74
Sed. *cultivo (t/ha/año)	132,81	132,77	NA	148,49	144,43	34,67
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	12	9	-74
E.P. **potrero (t/ha/año)	7,15	7,89	7,27	NA	7,20	1,14
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		10	2	NA	1	-84
Sed. **potrero (t/ha/año)	6,83	7,16	5,86	NA	6,87	1,08
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		5	-14	NA	1	-84

NA= No aplica

E.P.= Erosión potencial

Sed.= Sedimento

*Se denomina uso cultivo, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema agroforestal.

**Se denomina uso potrero, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema silvopastoril.

4.5.3 Pérdida de COS por erosión potencial y sedimentos

Los niveles más bajos de pérdidas de COS por erosión potencial y sedimentos por usos, también se dan en el escenario 1_6. Por ejemplo, el uso silvopastoril, presenta la pérdida más baja de COS por erosión potencial, a nivel de la subcuenca, con una disminución de 84%, respecto al escenario base (0,62 t/ha/año). Con relación a la pérdida de COS por sedimentos, este escenario también presenta el nivel más bajo, con una reducción de 85%, respecto al escenario base (0,60 t/ha/año). Las pérdidas de COS, por erosión potencial y por sedimentos, tienden a ser iguales en este uso. El uso agroforestal, presenta también uno de los niveles más bajos de pérdida de COS por erosión potencial, con una disminución de 74% respecto al escenario base (10,75 t/ha/año). Con la producción de sedimentos, también presenta el nivel más bajo de pérdida, con una reducción de 74%, respecto al escenario base (7,52 t/ha/año). Contrariamente al uso silvopastoril, las pérdidas de COS, por erosión potencial y por sedimentos, tienden a ser diferentes en este uso (Cuadro 60).

Cabe aclarar, que para la estimación de la pérdida de COS en los usos de suelos agroforestales y silvopastoriles, se utilizó el mismo %COS de los usos cultivos y potreros. Por lo tanto, el nivel bajo en pérdida de COS, se debe principalmente a los factores “C” de cada uno.

Cuadro 60. Pérdida de COS por erosión potencial y sedimentos.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo- pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo- pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. y potrero a sist. silvop.</i>
*COS que se podría perder en ¹ cultivo (t/ha/año)	10,75	10,74	NA	10,46	10,89	2,79
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	-3	1	-74
**COS que se pierde en ¹ cultivo (t/ha/año)	7,52	7,51	NA	8,40	8,17	1,96
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	12	9	-74
*COS que se podría perder en ² potrero (t/ha/año)	0,62	0,69	0,64	NA	0,63	0,10
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		11	3	NA	2	-84
**COS que se pierde en ² potrero (t/ha/año)	0,60	0,62	0,51	NA	0,60	0,09
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		3	-15	NA	0	-85

NA= No aplica.

*COS que se podría perder = es el COS que potencialmente se puede perder por erosión potencial.

**COS que se pierde = es el COS que se pierde con el sedimento a la salida de la subcuenca.

1= Se denomina uso cultivo, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema agroforestal.

2= Se denomina uso potrero, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema silvopastoril.

4.5.3.1 Retención o almacenamiento de COS

Como se mencionó en la metodología, el contenido, pérdida, retención de COS, se estimó para una profundidad de 10 cm.

El uso silvopastoril, por tener una pérdida muy baja por sedimentos, almacena o retiene 75,86 t/ha/año de COS, con un incremento del 1%, respecto al escenario base (75,35 t/ha/año). La retención de COS por erosión potencial, en el mismo uso, por tener una pérdida muy baja de COS, también es alta (75,86 t/ha/año), con un incremento del 1%, respecto al escenario base 75,33 t/ha/año. El almacenamiento, tanto por sedimentos como por erosión potencial, tiende a ser igual en este uso. Respecto al uso agroforestal, que presenta también uno de los niveles más bajos de pérdida de COS por sedimentos, retiene o almacena 47,28 t/ha/año, con un incremento del 13%, respecto al escenario base (41,72 t/ha/año). Por erosión potencial, podría retener o almacenar 46,45 t/ha/año, con un incremento del 21%, respecto al escenario base (38,5 t/ha/año). El almacenamiento de COS, por sedimentos y por erosión potencial, tienden a ser iguales en este uso (Cuadro 61).

Cuadro 61. Retención o almacenamiento de COS.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo- pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo- pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. Y potrero a sist. silvop.</i>
*COS que se podría retener en ¹ cultivo (t/ha/año)	38,5	38,5	NA	38,78	38,35	46,45
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	1	0	21
**COS que se retiene en ¹ cultivo (t/ha/año)	41,72	41,73	NA	40,84	41,97	47,28
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	-2	1	13
*COS que se podría retener en ² potrero (t/ha/año)	75,33	75,26	75,32	NA	75,32	75,85
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	0	NA	0	1
**COS que se retiene en ² potrero (t/ha/año)	75,35	75,33	75,44	NA	75,35	75,86
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	0	NA	0	1

NA= No aplica.

*COS que se podría retener = es el COS que potencialmente podría retenerse, después de que se podría perder por erosión potencial.

**COS que se retiene = es el COS que se retiene, después de que se pierde con el sedimento a la salida de la subcuenca.

1= Se denomina uso cultivo, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema agroforestal.

2= Se denomina uso potrero, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema silvopastoril.

4.5.4 Pérdida económica de COS por erosión potencial y sedimentos

Valorizando las pérdidas económicas de COS por erosión potencial y sedimentos, en el escenario 1_6, el uso silvopastoril presenta la pérdida económica más baja de COS por erosión potencial, a nivel de la subcuenca, con una reducción de 84%, respecto al escenario base (13,06 US\$/ha/año). Con relación a la pérdida económica de COS por sedimentos, también presenta el nivel más bajo, con una disminución de 85%, respecto al escenario base (12,48 US\$/ha/año). Las pérdidas económicas de COS, por erosión potencial y por sedimentos, tienden a ser iguales en este uso. Se aclara, de que al no encontrarse un precio específico para el uso silvopastoril, en el mercado internacional, se utilizó el mismo precio del uso potrero para estimar el valor económico por tCO₂eq.

En cuanto al uso agroforestal, la pérdida económica de COS por erosión potencial, presenta un incremento de 13% respecto al escenario base (47,33 US\$/ha/año). Con relación a la pérdida económica por sedimentos, también presenta un incremento, del 13%, respecto al escenario base (33 US\$/ha/año). Las pérdidas económicas de COS, por erosión potencial y sedimentos, tienden a ser diferentes en este uso agroforestal (Cuadro 62).

Cuadro 62. Pérdida económica de COS.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo- pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo- pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. Y potrero a sist. silvop.</i>
*COS que se podría perder en ¹ cultivo (US\$/ha/año)	47,33	47,31	NA	46,06	47,98	53,32
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	-3	1	13
**COS que se pierde en ¹ cultivo (US\$/ha/año)	33,11	33,10	NA	37,01	36,00	37,45
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	12	9	13
*COS que se podría perder en ² potrero (US\$/ha/año)	13,06	14,42	13,29	NA	13,15	2,08
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		10	2	NA	1	-84
**COS que se pierde en ² potrero (US\$/ha/año)	12,48	13,07	10,70	NA	12,55	1,97
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		5	-14	NA	1	-84

NA= No aplica.

*COS que se podría perder = es el valor económico de COS que potencialmente se puede perder por erosión potencial.

**COS que se pierde = es el valor económico de COS que se pierde con el sedimento a la salida de la subcuenca.

1= Se denomina uso cultivo, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema agroforestal.

2= Se denomina uso potrero, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema silvopastoril.

4.5.4.1 Retención o almacenamiento económico de COS

Con base en la pérdida económica de COS, en este acápite se estimó, económicamente, la retención o almacenamiento de COS. Entonces verificando las pérdidas económicas de COS del escenario 1_6, el uso silvopastoril, retiene o almacena por sedimentos, al igual que por erosión potencial, 1587 US\$/ha/año, con un incremento del 1%, respecto al escenario base (1576 US\$/ha/año). El uso agroforestal retiene o almacena, por sedimentos, 902 US\$/ha/año, con un incremento de 391%, respecto al escenario base (184 US\$/ha/año), en cambio, por erosión potencial almacena 886 US\$/ha/año, con un incremento de 423% (169 US\$/ha/año), respecto al escenario base. Las retenciones por sedimentos y erosión potencial, en ambos usos, tienden a ser iguales (Cuadro 63).

Cuadro 63. Retención o almacenamiento económico de COS.

<i>Escenarios (conversión usos)</i>	<i>1_1: base</i>	<i>1_2: cultivo- pasto a potrero</i>	<i>1_3: cultivo a potrero</i>	<i>1_4: potrero a cultivo</i>	<i>1_5: cultivo- pasto a cultivo</i>	<i>1_6: cultivo a sist. agrof. Y potrero a sist. silvop.</i>
*COS que se podría retener en ¹ cultivo (US\$/ha/año)	169,54	169,55	NA	170,81	168,88	886,41
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	1	0	423
**COS que se retiene en ¹ cultivo (US\$/ha/año)	183,76	183,77	NA	179,85	180,86	902,29
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	NA	-2	-2	391
*COS que se podría retener en ² potrero (US\$/ha/año)	1575,76	1574,4	1575,53	NA	1575,67	1586,74
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	0	NA	0	1
**COS que se retiene en ² potrero (US\$/ha/año)	1576,34	1575,75	1578,12	NA	1576,27	1586,85
Incremento (±) vs. 1_1 (%)		0	0	NA	0	1

NA= No aplica.

*COS que se podría retener = es el valor económico de COS que potencialmente podría retenerse por erosión potencial.

**COS que se retiene = es el valor económico de COS que se retiene, por sedimento a la salida de la subcuenca.

1= Se denomina uso cultivo, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema agroforestal.

2= Se denomina uso potrero, desde el escenario 1_1, hasta el escenario 1_5, en el escenario 1_6, pasa a ser sistema silvopastoril.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los usos del suelo cultivo (principalmente hortalizas) y combinación de cultivos con pastos representan más del 45% de la subcuenca, por lo tanto dado las condiciones de pendiente, precipitación, actividad productiva y manejo de los sistemas de producción, existe alto potencial para la erosión hídrica del suelo y el arrastre de sedimentos hasta los cauces de los ríos y posteriormente a los embalses ubicados en la misma.

El área de bosques en la subcuenca está ubicada principalmente en las franjas ribereñas y zonas de alta pendiente, donde no es posible el cultivo; la mayoría de franjas ribereñas tienen también esa condición. Esta situación afecta una mejor distribución espacial de la cobertura boscosa y por lo tanto, de su papel en la regulación hidrológica integral de la subcuenca.

El uso de suelos cultivos, en el escenario base, cubre 33% del área de la subcuenca, pero representa cerca del 92% de la erosión potencial de toda la misma, que el promedio es de 68 t/ha/año; en dicho uso, la erosión potencial es de 190 t/ha/año, lo que representa el principal mecanismo de degradación del suelo, de pérdida de carbono orgánico y la principal fuente de producción de sedimentos a las quebradas y cauces de los ríos, por lo que se debería recibir una atención prioritaria de diferentes actores (principalmente técnicos, agricultores y la empresa hidroeléctrica JASEC) para planificar e implementar estrategias, acciones integrales y viables para enfrentar este problema.

A pesar de que el uso del suelo en ganadería, generalmente se asocia con degradación del suelo y erosión del mismo, en la modelación realizada en el escenario base de este estudio, presenta una erosión potencial de solamente 7 t/ha/año, lo que se debe a que el factor “C” (manejo y cobertura del suelo) calibrados por Lianes (2008) para la subcuenca, para este uso del suelo es de 0,013, muy inferior al del uso cultivo de 0,340. Bajo las condiciones que se realizó esta modelación, estos resultados sugieren que este uso del suelo (pasto-ganadería) sería más sostenible ecológicamente para la subcuenca y causaría menos externalidades negativas a JASEC.

El 28% de la subcuenca en el escenario base, presenta erosión potencial con categoría de severa (50-200 t/ha/año) o muy severa (> 200 t/ha/año) y está asociada al uso del suelo cultivos, los que permite concluir que la mayoría del cultivo de hortalizas que se realiza en la subcuenca, no es ecológicamente sustentable y además presenta externalidades negativas como la sedimentación de embalses.

La sedimentación bajo el escenario base es de 49 t/ha/año (71% de la erosión potencial), lo que significa una amenaza para la sostenibilidad integral de la subcuenca, pero también un escenario prioritario para promover incentivos que reduzcan la pérdida de carbono almacenado en el suelo y conciencia ambiental en los productores.

En todos los casos, los escenarios simulados que conllevan un incremento del área de cultivos (potrero a cultivos y cultivo - pasto a cultivo), incrementarían la erosión potencial (en 57 y 33%, respectivamente) y la sedimentación (en 77 y 40%, respectivamente), con respecto

al escenario base (uso actual del suelo), por lo que los diferentes actores de la subcuenca deberían coordinar esfuerzos y acciones para evitar que ello suceda.

Contrariamente en todos los casos, los escenarios simulados que conllevan a un incremento del área de potreros (cultivo a potreros y cultivo - pasto a potreros), reducirían la erosión potencial (en 88 y 3% respectivamente) y la sedimentación (en 86 y 4%, respectivamente), con respecto al escenario base, por lo tanto también, los diferentes actores de la subcuenca, como la JASEC, deberían coordinar esfuerzos y acciones para paliar de alguna manera la sedimentación en embalses principalmente.

La conversión de los usos del suelo pasto a sistemas silvopastoriles y cultivos a sistemas agroforestales, que podría ser menos drásticos en la cultura productiva y quizás socioeconómicamente más viable, sería una buena opción para reducir la erosión potencial (en 70% y la producción de sedimentos (en 69%), con referencia al escenario base, a nivel de la subcuenca.

A nivel usos, la conversión del uso del suelo cultivos a sistemas agroforestales sería la estrategia prioritaria con el fin de disminuir la erosión y sedimentación en la subcuenca, ya que ambas variables se reducirían en 74%, con respecto al escenario base. De igual modo la conversión del uso del suelo potrero a sistemas silvopastoriles, sería también, la estrategia prioritaria para disminuir la erosión y sedimentación en la subcuenca, ya que ambas variables se reducirían en 84%, con respecto al escenario base (uso actual).

En la misma proporción en porcentaje de disminución de la erosión potencial y sedimento, se disminuyen también las pérdidas de COS para estos sistemas de producción, a excepción del sistema silvopastoril que reduce la pérdida de carbono por sedimentos (en 85%), respecto al escenario base.

Los productores que opten por sistemas silvopastoriles, sistemas agroforestales y potreros (ganadería), tendrían la mayor retención o almacenamiento de COS y por lo tanto, deberían de recibir un mayor incentivo económico por este servicio ambiental.

El resultado de esta investigación no es suficiente para validar las cuantificaciones de la erosión usando el modelo CALSITE - USLE, pero muestra que, como se ha expuesto en múltiples estudios, la ecuación puede llegar a ser útil como un medio práctico de identificar zonas de erosión laminar crítica y sedimentación. Deben investigarse mejor otros modelos, que contribuyan en la estimación precisa de la erosión, sedimento y pérdida de COS, que además estos modelos permitirán comparar resultados, de una cuenca en particular.

5.2 Recomendaciones

- Se deberían buscar otros escenarios (a nivel de fincas) de producción hortícola y ganadera, y muestrear estos a partir de la selección de una determinada práctica de producción (terrazas, curvas de nivel, sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles, etc.) que pudiera existir en toda la subcuenca, para estimar el contenido, pérdida y retención de COS.
- Para obtener una estimación más precisa en cuanto a la producción de sedimentos, se requiere contar con información de sedimento de campo adecuada y en la mayor cantidad de estaciones que sea posible.
- Deben investigarse otros modelos de erosión y transporte de sedimento para poder comparar resultados.
- El trabajo de refinamiento de cálculo de los factores de la USLE es básico para asegurar un buen ajuste local a las condiciones de la subcuenca. Esta investigación ha utilizado factores calibrados para la subcuenca, como son los factores R y K, pero se proponen futuras líneas de trabajo, principalmente en el cálculo del factor R, con algoritmos mejorados.
- El factor “R” de erosividad de la lluvia, puede ser utilizado en nuevos modelos empíricos de cálculo de sedimentos, para lo cual debe valorarse utilizando el método *EI*, con distintas intensidades de lluvia.
- Deben instalarse parcelas experimentales para medir erosión, de modo que se pueda vincular esa información con el estudio de intensidades, mencionado en la recomendación anterior.
- Si se utiliza la USLE debe respetarse lo más posible su definición original, especialmente con respecto a los factores *R*, *LS* y *CP*. El último no debería variar mucho del definido en la metodología original.
- Realizar estudios detallados del COS para diversos usos de suelos. Uno de estos estudios podría tratar sobre cuánta y qué capacidad tienen estos usos para incorporar anualmente MO en sus sistemas de producción, y a partir de la cual estimar el contenido de COS que se fija anualmente. Luego este dato estimaría mejor las pérdidas, retenciones o almacenamiento de COS por sedimento y erosión potencial que generalmente se estiman para un año.
- Se podría complementar la pérdida de COS por erosión hídrica, con otros estudios de pérdidas como la lixiviación y mineralización.
- Para fines de conservación de suelos, una producción agropecuaria sostenible, mejora en la calidad y provisión de agua, un medio ambiente saludable y adicionalmente adquirir un bono o incentivo que contribuyan a mejorar la calidad de vida en la zona, se recomienda mejorar los sistemas de producción actuales, hacia sistemas más amigables con el medio ambiente, como son los sistemas agroforestales y silvopastoriles. Estos resultados han sido demostrados en el escenario 1_6.
- Promover el pago de servicio ambiental u otro incentivo, a los propietarios de la subcuenca, para evitar o al menos reducir la pérdida de COS.

6. LITERATURA CITADA

- Alvarado, A; Warren, F. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1): 85-94.
- Antezana, J. 2001. Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo, revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña en Cochabamba. Tesis M. Sc. Cochabamba, BO, Universidad Mayor de San Simón. 77 p.
- Bradbury, P. 1995. CALSITE versión 3.1. User manual. UK, HR Wallingford Limited. 61 p.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2003. Caracterización y diagnóstico de las subcuencas tributarias del sistema hidroeléctrico Birrís. Informe de consultoría presentado a la junta administrativa del servicio eléctrico de Cartago (JASEC). Turrialba, CR, CATIE. 33 p.
- CIFOR (Center for International Forestry Research). 2005. Pagos por servicios ambientales: Principios básicos esenciales. Sindang, ID, CIFOR Occasional Paper N° 42. 24 p.
- Cubero, D. 1996. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. 2da edición. San José, CR, EUNED. 278 p.
- Chow, Ven T; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. Ed. Nomos S.A. Trad. P. McGraw-Hill, Bogotá, CO. 584 p.
- Ecosystem Marketplace. 2010. Building bridges state of the voluntary carbon markets. Washington, US. 129 p.
- Eduardo Martínez H, Juan Pablo Fuentes E, Edmundo Acevedo H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8 (1) 2008 (68-96) *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1) 2008 (68-96) (en línea). Consultado 20 de nov. de 2009. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2007a. La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. Roma, IT, FAO. 154 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1993. Erosión de suelos en América Latina (en línea). Consultado 26 oct. 2009. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.HTM>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1965. Soil erosion by water. Some measures for its control lands. Roma, IT, FAO. 284 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2007b. Secuestro de carbono en tierras áridas. Roma, IT, FAO. 120 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. Roma, IT, FAO. 58 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, IT, FAO. 61 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1989. Evaluación de los estados de la erosión hídrica de los suelos de Costa Rica. Informe técnico. Roma, IT, FAO. 100 p.
- Freibauer, A. 2009. Soluciones concretas para evitar la pérdida de carbono. Medio ambiente para los Europeos. LU, Dirección General de Medio Ambiente. 34 (8). 16 p.
- García, J. S/F. Modelos paramétricos: modelo USLE y modelo RUSLE. Departamento de Ingeniería Forestal. Madrid, ES, Universidad Politécnica de Madrid. 51 diapositivas.
- Geler, T; Ligtenberg, A; De By, R. 2004. Modelo para el pronóstico de la dinámica de erosión en los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra. Habana, CU, Instituto de Geografía Tropical. 12 p.
- Gómez Delgado, F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. Tesis Lic. Ing. Civil. San José, CR, Universidad de Costa Rica. 191 p.
- González, J. 1998. Los procesos de erosión del suelo: hechos, mitos y paradojas. Zaragoza, ES, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. 36: 47-65.
- Gutiérrez, M. 1987. Determinación del índice de erosividad de las lluvias y su relación con la cobertura vegetal, suelos y pendientes, para la cuenca del río Grande de Térraba, Costa Rica. Tesis M. Sc, Turrialba, CR, UCR - CATIE. 127 p.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 2000. Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Reventazón: Proyecto de manejo de las áreas prioritarias. San José, CR, ICE. 30 p.

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2000. Land use, land-use change, and forestry special report (en línea). Consultado 16 de nov. 2009. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2001. Tercer informe de evaluación de cambio climático: la base científica. Ginebra, CH. 84 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. Cambio climático: informe de síntesis. Ginebra, CH. 104 p.
- Jandl, R. S/F. Secuestro de carbono en bosques: el papel del suelo. Viena, AT, Centro de Investigación Forestal. 9 p.
- Lal, R. 2005a. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220: 242–258.
- Lal, R. 2005b. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil & Tillage Research* 81: 137–142.
- Lianes, R. 2008. Estudio del factor de vegetación “C” de la ecuación universal de pérdidas de suelo revisada “RUSLE” en la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Tesis Lic. Ing. Forestal. Madrid, ES, Universidad Politécnica de Madrid. 173 p.
- Llanderal, T. 2006. Monitoreo de carbono en suelos. Curso internacional “Herramientas para el monitoreo del secuestro de carbono en sistemas de uso de la tierra”. Turrialba, CR, CATIE. 47 p.
- MAG-MIRENEM (Ministerio de Agricultura y Ganadería – Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas). 1995. Metodología determinación capacidad uso tierras Costa Rica. Decreto N° 23214. San José, CR. 30 p.
- Marchamalo, M. 2004. Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos: aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Tesis doctoral, Madrid, ES, Universidad Politécnica de Madrid. 385 p.
- Marchamalo, M. 2007. Cuantificar el potencial de conservación de suelo y agua basado en un análisis territorial de la cuenca. Estudio de caso de la cuenca del río Birrís. Proyecto: Contribución a la política de pago por servicios hidrológicos para el sector hidroeléctrico de Costa Rica. Primer Informe. Turrialba, CR, CATIE. 174 p.
- Márquez, L. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, GT, Fundación Solar. 36 p.

- Martínez, E; Fuentes, J; Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Universidad de Chile. R.C. Suelo y Nutrición Vegetal. 8 (1): 68-96.
- Miliarium, S.L. S/F. Modelo de la ecuación universal del suelo revisado (RUSLE) (en línea). Consultado 01 nov. 2009. Disponible en <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Suelos/Rusle.htm>
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación de suelos. Trad. P. Urbano y J. de M. Urbano. Madrid, ES, Mundi prensa. 343 p.
- Mostacedo, B; Fredericksen, T. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Santa Cruz, BO, Editorial El País. 87 p.
- OEA (Organización de los Estados Americanos). 2008a. Guía Conceptual y Metodológica para el Diseño de Esquemas de Pagos por Servicios Ambientales en Latino-América y el Caribe. Departamento de Desarrollo Sostenible – DDS. Washington D.C, US, OEA. 70 p.
- OEA (Organización de los Estados Americanos). 2008b. Lecciones Aprendidas sobre Pagos por Servicios Ambientales en Latinoamérica y el Caribe. Departamento de Desarrollo Sostenible – DDS. Washington D.C, US, OEA. 34 p.
- Olmos, L; Jégat H. 2001. Análisis de la erosión hídrica mediante un modelo distribuido (CALSITE) y un modelo agregado (SWRRB): aplicación a la cuenca del río Grande, Venezuela. Ingeniería del Agua. 8 (1): 25-37.
- Pizarro, D. 1984. Formación Birris. En P. Sprechmann (Ed.) Manual de Geología de Costa Rica. Volumen I: Estratigrafía. San José, CR, Editorial Universidad de Costa Rica. 320 p.
- Quiróz, MO. 2002. Memoria del II Encuentro de Investigadores en Agricultura Orgánica 2002. La conservación de suelos en la producción orgánica. San José, CR, MAG. 5 p.
- Ramos, R. 2003. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 77 p.
- Rügnitz, M; Chacón, M; Porro, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. 1. ed. Lima, PE, Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 79 p.

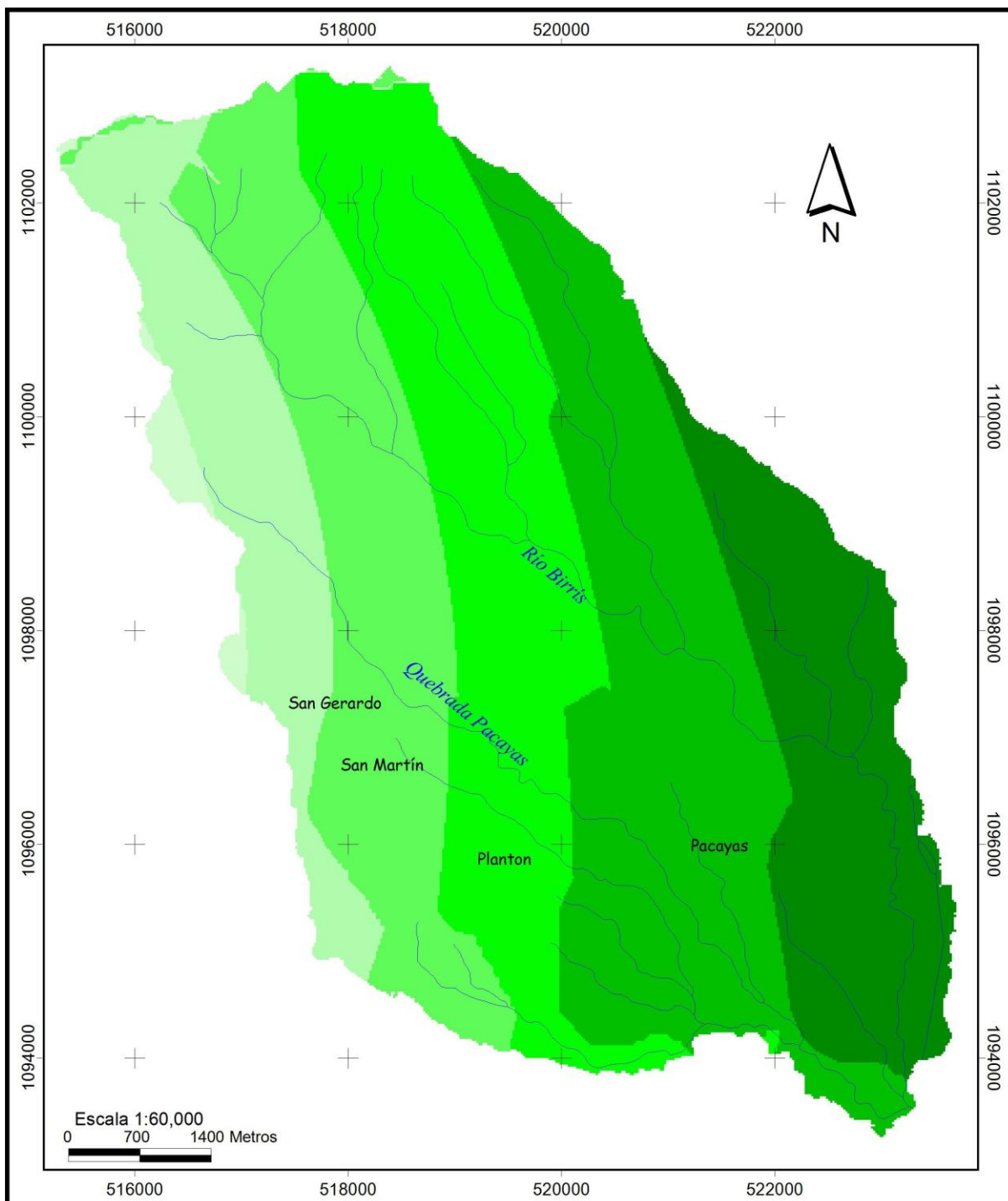
- Swallow, B; Meinzen-Dick, R. 2007. Cómo localizar la demanda y oferta de servicios ambientales: Interacciones con derechos de propiedad, acción colectiva y bienestar social de pequeños propietarios (en línea). Consultado 02 nov. 2009. Disponible en http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/482/articulo2.html#_ftn2#_ftn2
- TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2008. Atlas digital de Costa Rica. San José, CR. Esc. variable. ITCR.
- TRAGSA (Empresa de Transformación Agraria S.A.); TRAGSATEC (Tecnologías y Servicios Agrarios). 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, ES, Mundi prensa. 902 p.
- Vahrson, W; Cervantes, C. 1991. Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal Costa Rica. In. Vahrson, W; Alfaro, M; Palacios, G. Memoria del Taller de Erosión de Suelos. Heredia, CR, UNA. 236 pp.
- Vignola, R; Calvo, G; Koellner, T; Marchamalo, M; Otto, S; Lianes, E. S/F. Opciones de adaptación al cambio climático para la generación hidroeléctrica en Costa Rica: configuraciones de paisaje para la provisión de servicios hidrológicos de ecosistemas en cuencas prioritarias. Turrialba, CR, mimeografiado. 9 p.

7. ANEXOS

Anexo 1. Mapa del factor R.

En toda la subcuenca, el factor R que más predomina, es el que está en el rango: 21001 – 24001 Mj mm/ha h año, ocupando una superficie de 1246 ha (26%). Se puede decir que la erosividad en esta subcuenca es muy alta, debido a la alta precipitación e intensidad.

Factor "R"	Área (ha)	Área (%)
9000 – 12000	56	1,2
12000 – 15001	583	12,1
15001 – 18001	979	20,4
18001 – 21001	1158	24,1
21001 – 24001	1246	25,9
24001 – 27001	782	16,3
Total	4804	100,0



FACTOR R

Fuente: I Informe Proyecto CATIE - UICN
 Proyección: CRTM Datum WGS 84
 Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
 Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
 de Cuencas Hidrográficas
 CATIE, Turrialaba Costa Rica
 Septiembre de 2010

Legenda

∩ Ríos

R (Mj mm / ha h año)

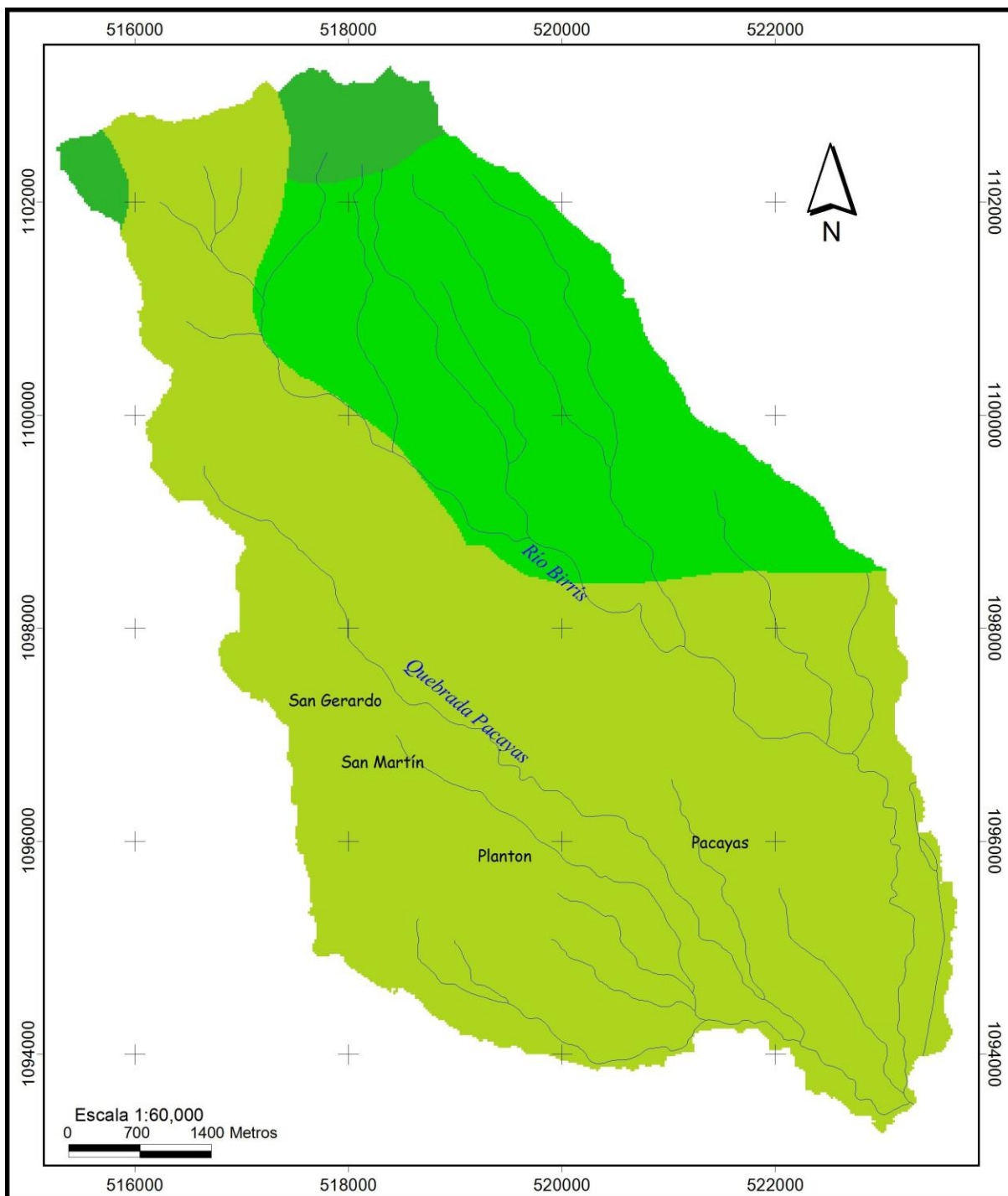
Lightest Green	9000 - 12000
Light Green	12000 - 15001
Medium Green	15001 - 18001
Dark Green	18001 - 21001
Very Dark Green	21001 - 24001
Darkest Green	24001 - 27001

Anexo 2. Mapa del factor K.

El tipo de suelo Hapludand, con un factor K de 0,019, ocupa la mayor superficie a nivel de la subcuenca, con 3388 ha (70%). Este tipo de suelo, se caracteriza por ser derivado de cenizas volcánicas, muy profundos, ricos en materia orgánica, bien drenados y moderadamente fértiles. En resumen, estas unidades de suelos que se muestran en el siguiente cuadro, son de origen volcánicos, clasificados como andisoles de acuerdo al USDA.

Varían con un rango de valores para la subcuenca entre 0,009 y 0,019. Esto es un indicativo de que el factor de erodabilidad del suelo es bajo en cuanto al aporte a la erosión mediante la fórmula de la USLE.

Unidades de suelos	Factor "K"	Área (ha)	Área (%)
Udivitrاند	0,009	160,4	3,3
Hydrudand	0,011	1256,4	26,1
Hapludand	0,019	3388,4	70,5
Total		4805,2	100,0



FACTOR K

Fuente: I Informe Proyecto CATIE - UICN

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

Leyenda

— Ríos

K (t ha h / ha Mj mm)

0.009

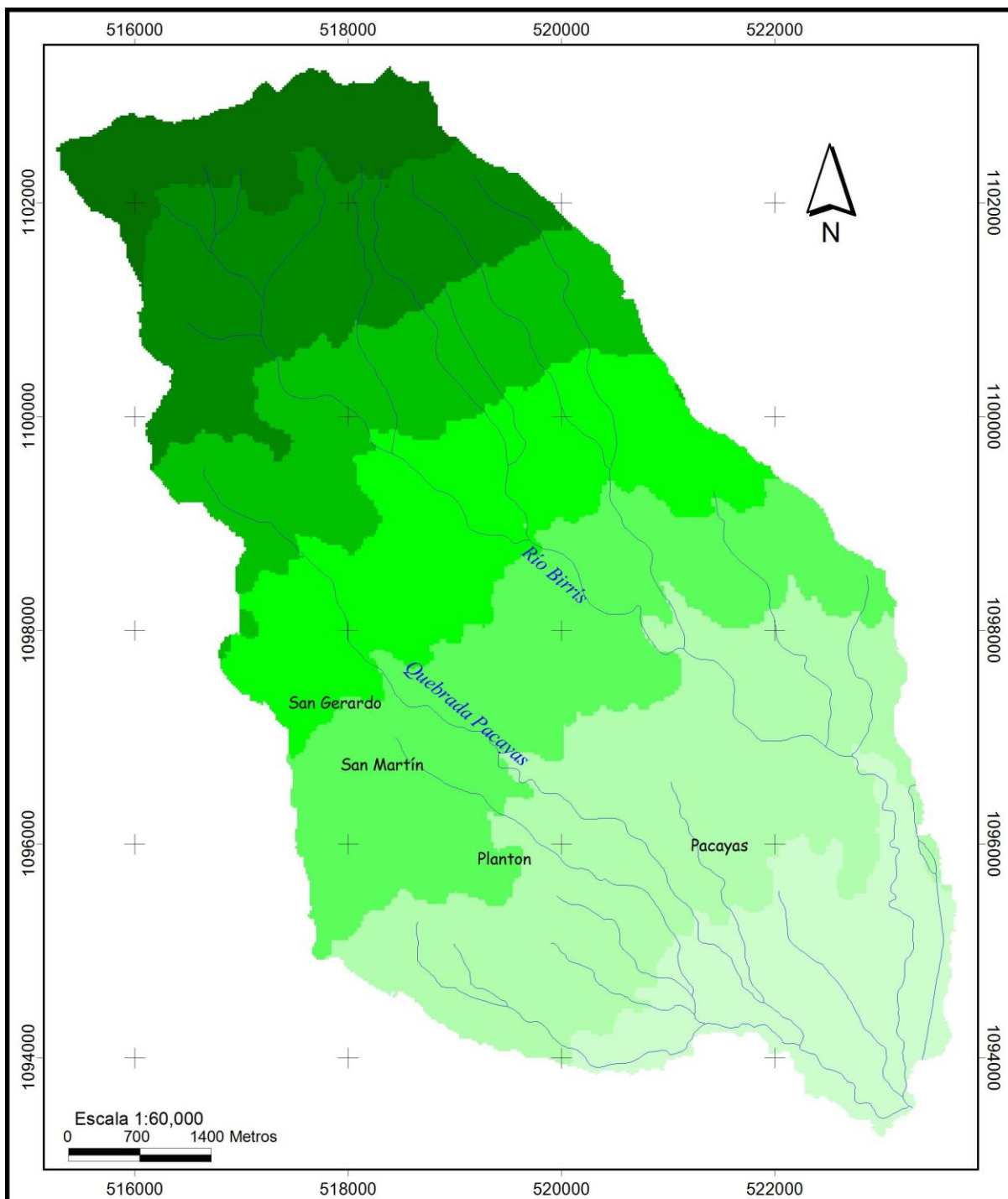
0.011

0.019

Anexo 3. Modelo de Elevación Digital.

Un 23% de la subcuenca presenta una elevación de 1562 a 1869 msnm, mientras tanto solo un 6% se encuentra en una zona muy elevada, 3097 a 3404 msnm.

Elevación (msnm)	Área (ha)	Área (%)
1255 - 1562	551,0	11,5
1562 - 1869	1131,2	23,5
1869 - 2176	930,5	19,4
2176 - 2483	729,7	15,2
2483 - 2790	567,3	11,8
2790 - 3097	592,0	12,3
3097 - 3404	303,5	6,3
Total	4805,2	100,0



**MODELO DE
ELEVACIÓN DIGITAL
30 CRTM**

Fuente: Atlas de Costa Rica (2008)

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

Legenda

△ Ríos

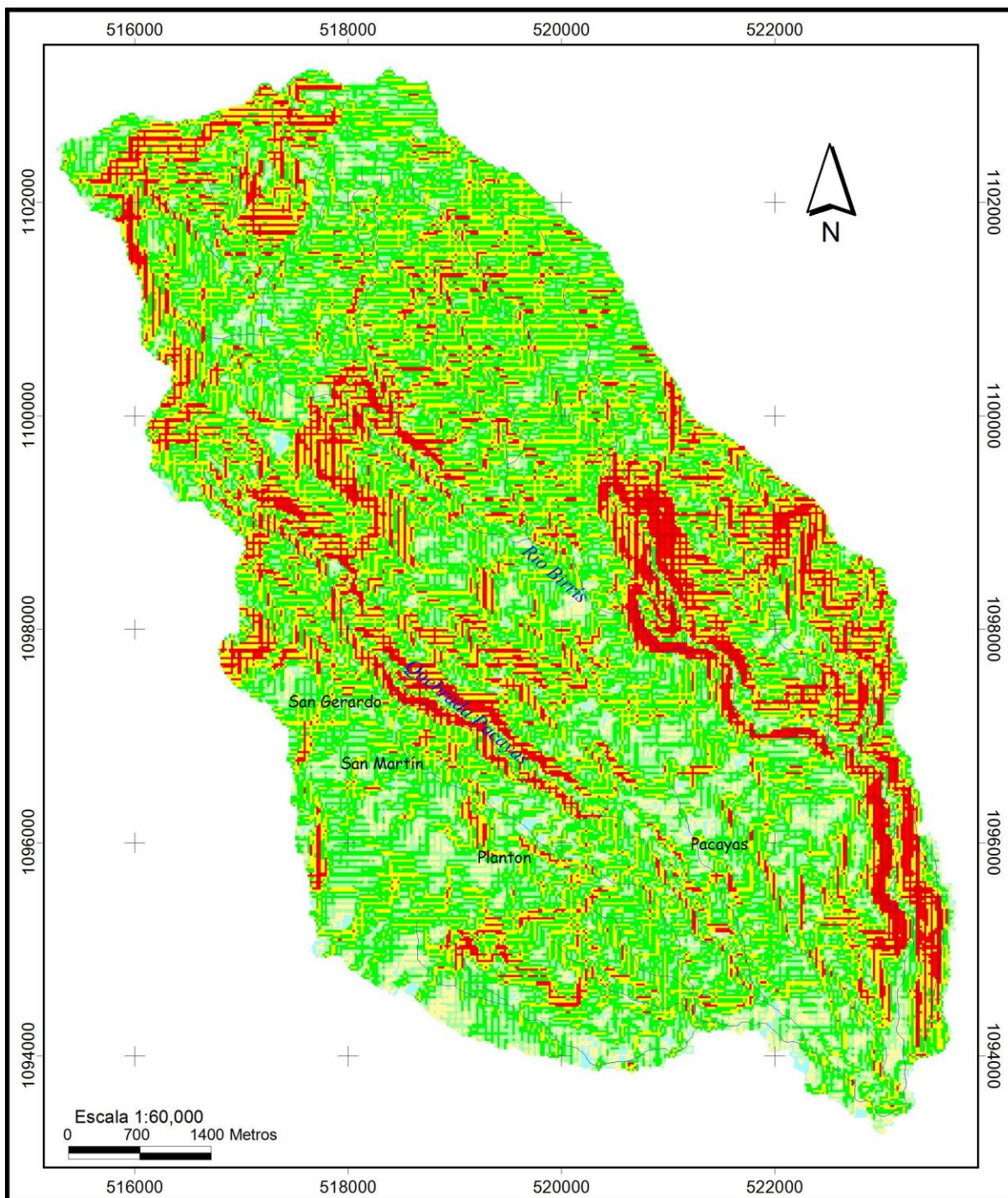
Altitud (m)

	1255 - 1562
	1562 - 1869
	1869 - 2176
	2176 - 2483
	2483 - 2790
	2790 - 3097
	3097 - 3404

Anexo 4. Mapa de pendiente en %.

De acuerdo a los resultados, el 58% de la subcuenca, se encuentra en un relieve de plano a ondulado. Mientras que un 42% se encuentra en un relieve de fuertemente ondulado a fuertemente escarpado, lo que la hace muy susceptible a la erosión y transporte de sedimentos.

Relieve	Pendiente (%)	Área (ha)	Área (%)
Plano a casi plano	0 - 3	45,8	1,0
Ligeramente ondulado	3 - 8	252,0	5,2
Moderadamente ondulado	8 - 15	686,6	14,3
Ondulado	15 - 30	1794,8	37,4
Fuertemente ondulado	30 - 50	1343,3	28,0
Escarpado	50 - 75	501,3	10,4
Fuertemente escarpado	75 - 188,7	181,3	3,8
Total		4805,2	100,0



**MAPA DE
PENDIENTE**

Fuente: MED, Atlas de Costa Rica (2008)

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

Leyenda

∩ Ríos

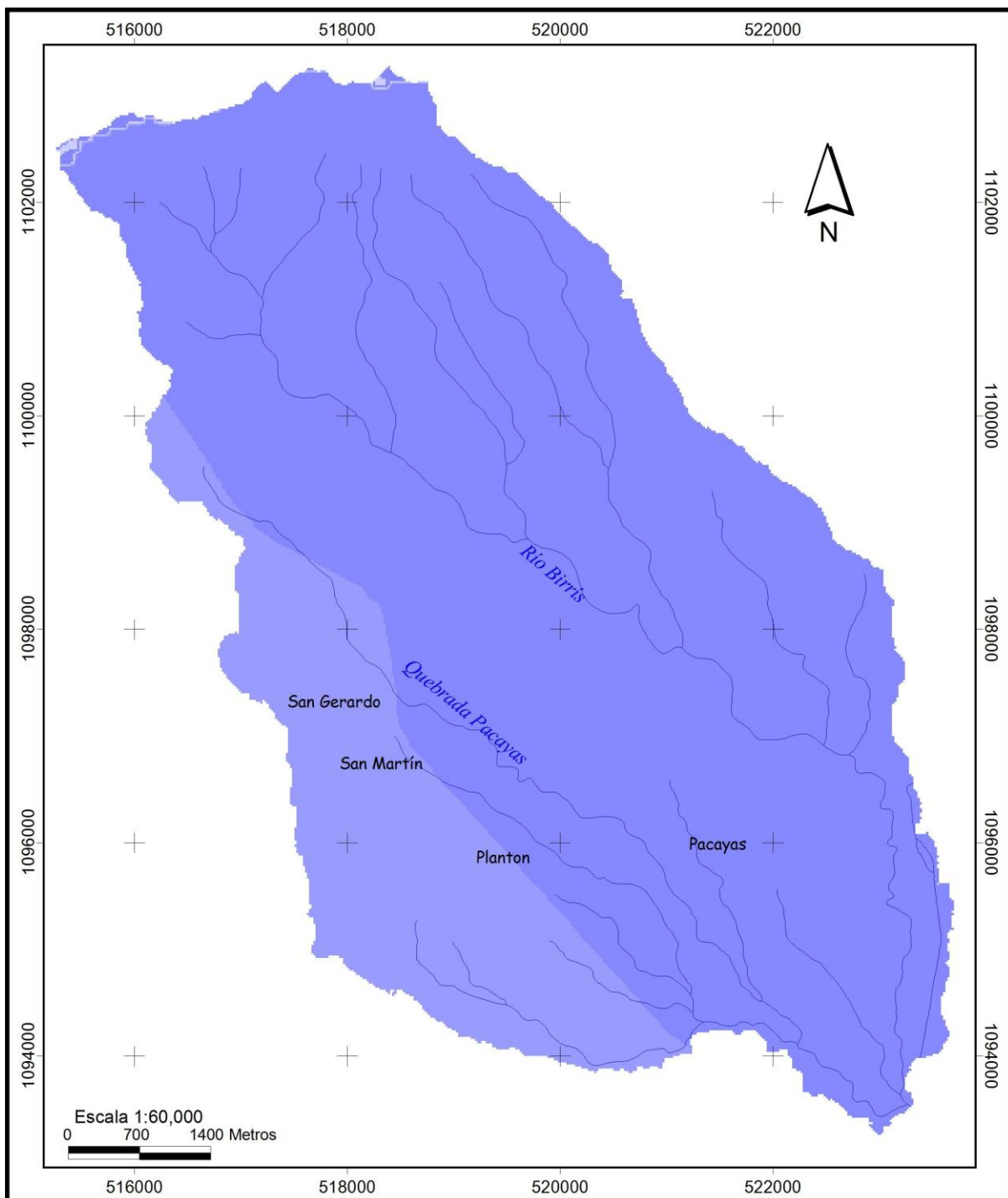
Pendiente (%)

- 0-3
- 3-8
- 8-15
- 15-30
- 30-50
- 50-75
- 75-188.7

Anexo 5. Mapa de precipitación.

Con base al mapa, se observa que el 81% de la subcuenca, se encuentra en un rango de precipitación de 2117 – 2382 mm, lo cual es considerable. Estas altas precipitaciones, conllevan a aumentar el factor R de erosividad.

Precipitación (mm)	Área (ha)	Área (%)
1059 - 1323	1,1	0,02
1323 - 1588	2,0	0,04
1588 - 1853	2,0	0,04
1853 - 2117	877,0	18,26
2117 - 2382	3922,0	81,64
Total	4804,1	100,00



**MAPA DE
PRECIPITACIÓN**

Fuente: I Informe Proyecto CATIE - UICN

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

Leyenda

∟ Ríos

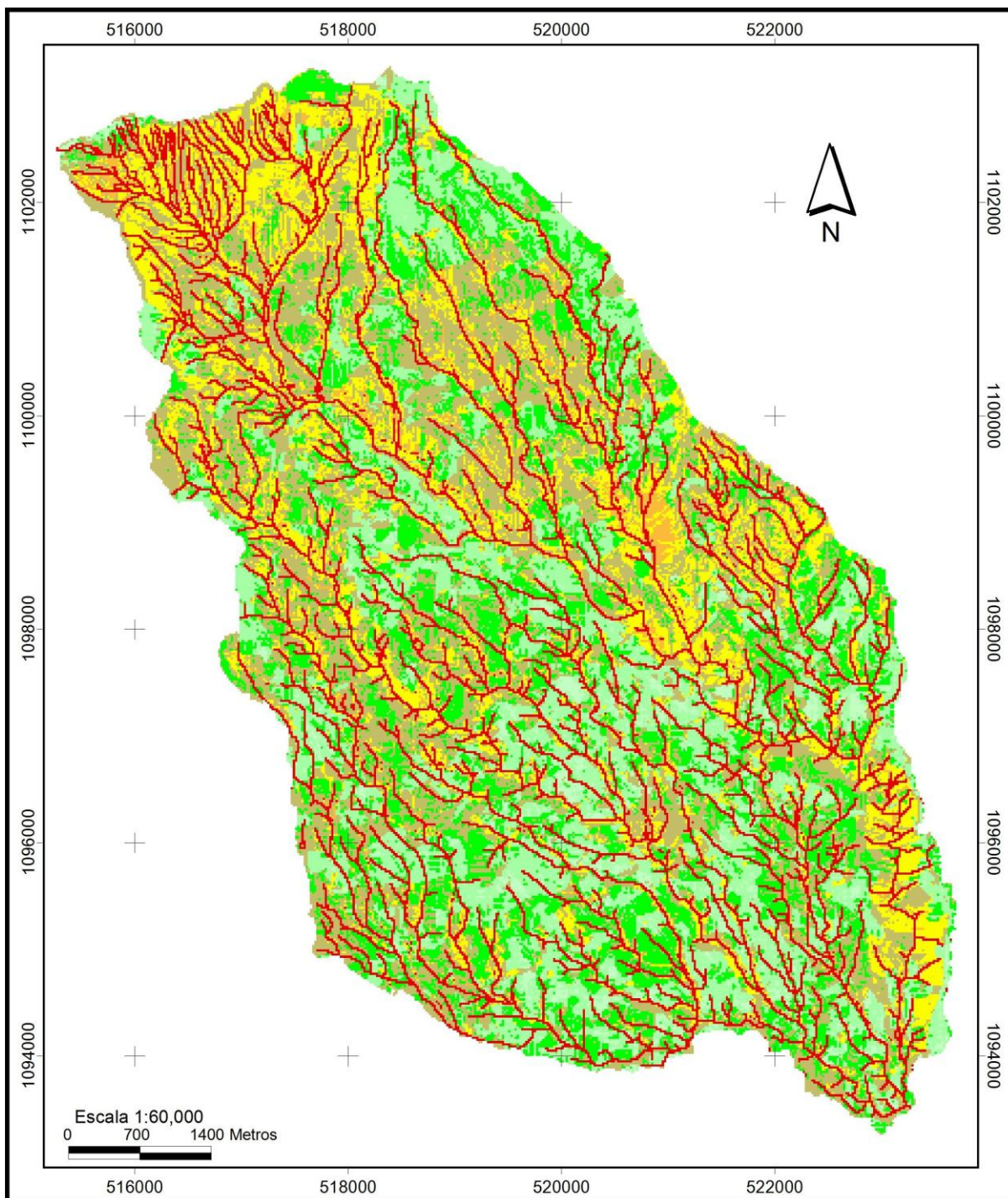
Precipitación (mm)

- 1059 - 1323
- 1323 - 1588
- 1588 - 1853
- 1853 - 2117
- 2117 - 2382

Anexo 6. Mapa del Delivery Index.

En el siguiente cuadro, se observa que un 40 % de la subcuenca, presenta baja capacidad de transporte de sedimentos, un 41,5 % de la subcuenca, presenta, una capacidad de transporte de media hacia alta, y un 18,5 % entre alta y muy alta. Esto indica, de que aunque se produzca poco material o sedimentos, este material va a ser transportado, motivo por el cual los usos de suelos recomendados y las prácticas actuales que se dan, deben considerar medidas apropiadas de conservación para evitar las pérdidas de suelos, como ser: COS, minerales y residuos contaminantes.

Delivery Index	Descripción	Área (ha)	Área (%)
0 - 36	Transporte bajo	146,7	3,1
36 - 73	Bajo	909,2	18,9
73 - 109	Medio bajo	865,6	18,0
109 - 146	Medio	1259,1	26,2
146 - 182	Medio alto	734,2	15,3
182 - 219	Alto	124,3	2,6
219 - 255	Muy alto	766,1	15,9
Total		4805,2	100,0



DELIVERY INDEX

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

Leyenda

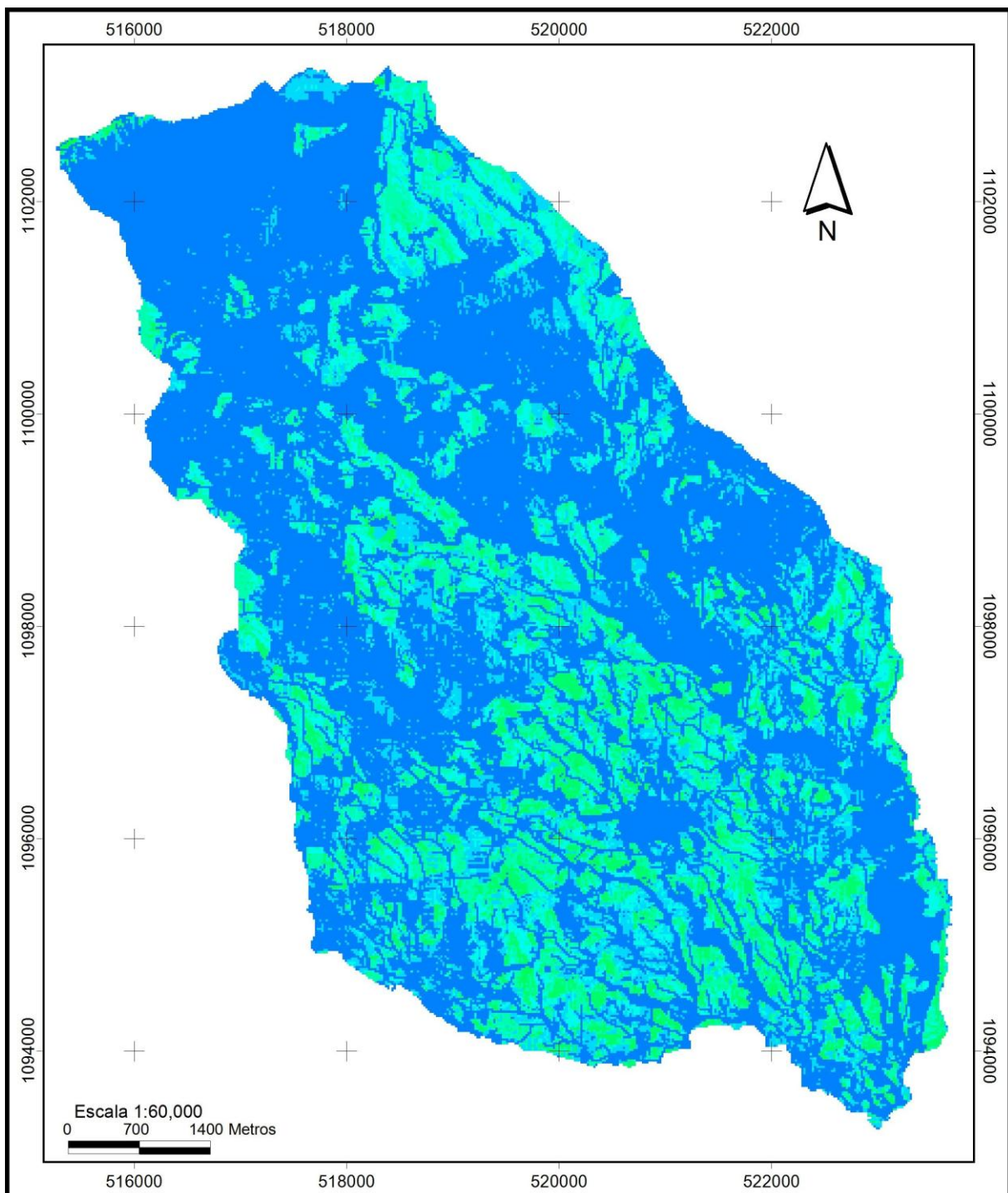
Delivery Index

- 0 - 36
- 36 - 73
- 73 - 109
- 109 - 146
- 146 - 182
- 182 - 219
- 219 - 255

Anexo 7. Mapa del Delivery Ratio.

Este mapa (tasa de entrega), resulta de la calibración con el sedimento observado en campo. Muestra la relación entre la aportación neta de sedimento de cada píxel del territorio a la red hidrográfica y la erosión potencial del mismo, evaluada según la USLE en un proceso previo. Para la subcuenca del río Birrís los valores de la tasa de entrega de sedimento variaron entre 0,40 y 1,00 con una media de 0,52. Esto significa que la cuenca tiene una moderada tasa de entrega (62% del área de la subcuenca), para transportar la erosión estimada en cada píxel a la salida de la cuenca.

Delivery Ratio	Área (ha)	Área (%)
0,4 - 0,5	5,8	0,1
0,5 - 0,6	282,0	5,9
0,6 - 0,7	568,9	11,8
0,7 - 0,8	457,2	9,5
0,8 - 0,9	497,4	10,4
0,9 - 1,0	2993,9	62,3
Total	4805,2	100,0



DELIVERY RATIO

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

Leyenda

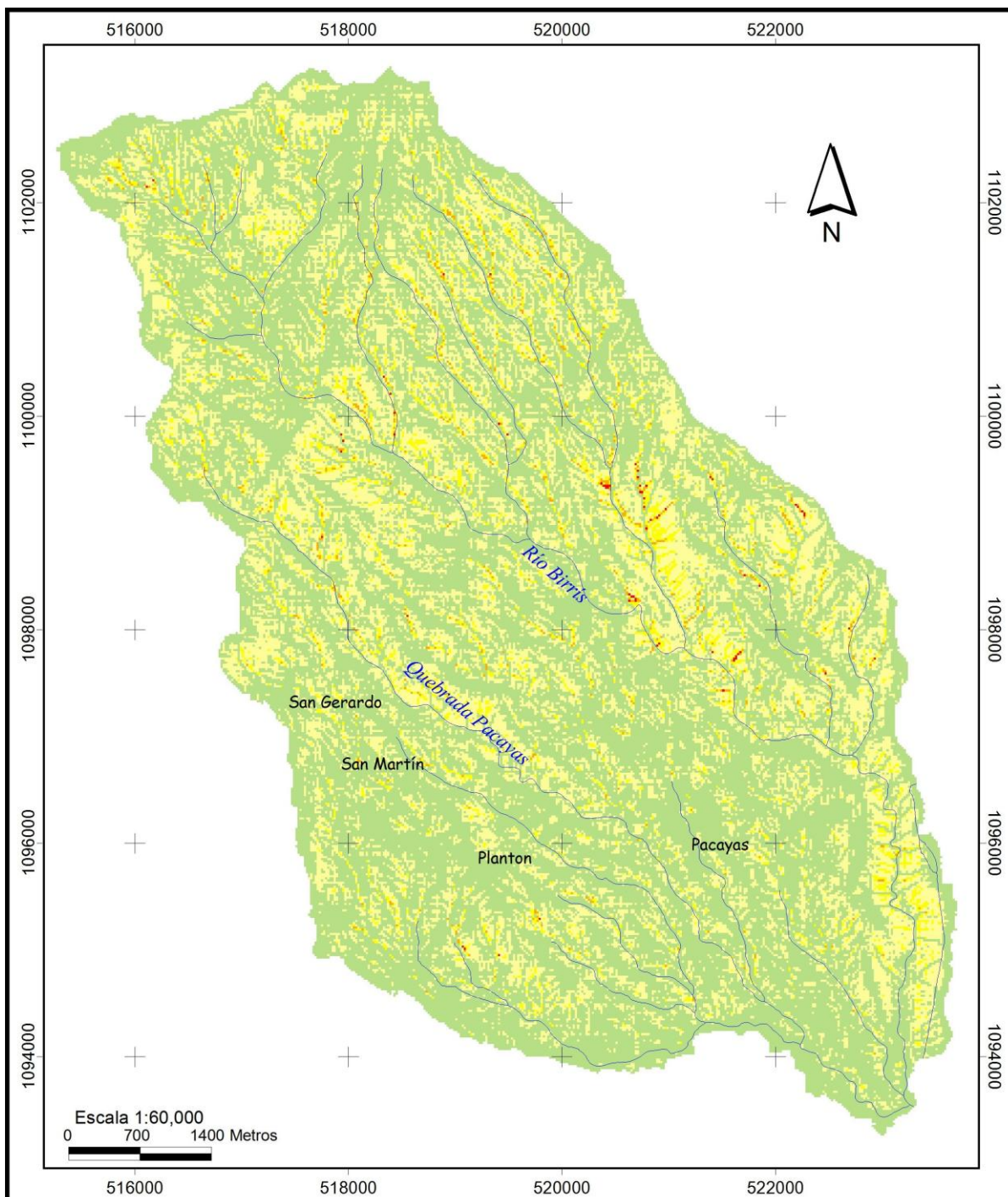
Delivery Ratio

- 0.4 - 0.5
- 0.5 - 0.6
- 0.6 - 0.7
- 0.7 - 0.8
- 0.8 - 0.9
- 0.9 - 1.0

Anexo 8. Factor LS.

Este factor evalúa las pérdidas de suelo por erosión hídrica, considerando los efectos que pudieran tener la longitud (L) y el gradiente (S) de la pendiente respectivamente. El factor "LS", se puede definir como la relación, entre el suelo perdido en un área cualquiera con pendiente "p" y longitud "l", y la correspondiente a la parcela estándar (1,83 x 22,13 m) utilizada en el desarrollo de la USLE.

Clase topográfica	Factor "LS"	Área (ha)	Área (%)
Plano	0 - 2	3023,9	62,9
Ligeramente ondulado	2 - 4	1524,6	31,7
Moderadamente ondulado	4 - 6	220,8	4,6
Fuertemente ondulado	6 - 8	33,2	0,7
Escarpado	8 - 9,82	2,7	0,1
Total		4805,2	100,0



FACTOR LS

Fuente: MED, Atlas de Costa Rica (2008)

Proyección: CRTM Datum WGS 84

Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral
de Cuencas Hidrográficas

CATIE, Turrialaba Costa Rica
Septiembre de 2010

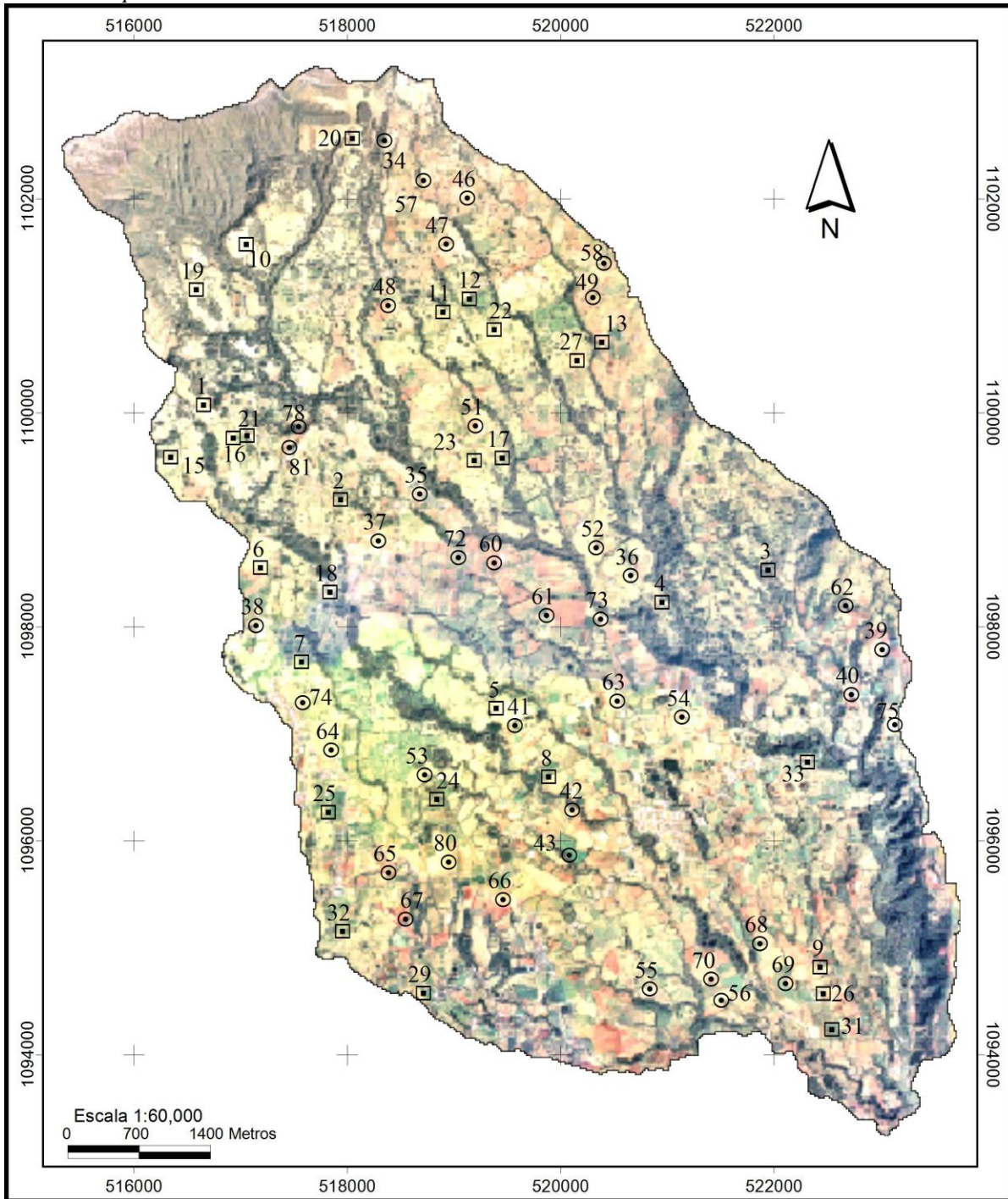
Leyenda

— Ríos

Factor LS

- 0 - 2
- 2 - 4
- 4 - 6
- 6 - 8
- 8 - 9.82

Anexo 9. Mapa de muestreos.



SITIOS DE MUESTREO (COS) SUBCUENCA BIRRIS

Fuente: Laboratorio de CATIE (2007)
 Proyección: CRTM Datum WGS 84
 Elaborado por: Ing. For. Fermín Vargas
 Candidato M. Sc. Manejo Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas
 CATIE, Turrialaba Costa Rica
 Septiembre de 2010

Leyenda

- Ríos
- Caminos
- Sitios de muestreo
 - Cultivo (40 muestras)
 - Pasto (30 muestras)

Anexo 10. Reporte de CALSITE, escenario base1_1

CALSITE VER 3.10 - REPORT FILE : c:\idrisi\birrpaca\escbase.rep

DATE: 6/9/110 TIME: 12:54

Project information file : BirrPaca.INF

FILES:	Description	Image Filename
	Rainfall	rainbytb.img
	R-factor	rfactorb.img
	Land Cover	landcoby.img
	CP-factor	landcoby.img
	Soils	
	K-factor	kfactorb.img
	Elevation	medbirr.img
	Slope	penporb.img
	Streams	streamsb.img
	Calibration	cuencbir.img
	Trap Efficiency	
	Aspect	aspectbi.img
	Hollows	hollowsb.img
	Flows	flowbir.img
	Length	lengthbi.img
	LS-factor	lsfactrb.img
	Flow * Slope	fl-slbir.img
	RouteMin	minimumb.img
	Delivery Index	delindbi.img
	Delivery Ratio	delratbi.img
	Soil Erosion	erosbase.img
	Sediment Yield	yieldbir.img

Path = c:\idrisi\birrpaca\








EROSION RESULTS (t/ha)

Sub-Catchment	Calib	Observed Sed.Yld	Predicted Sed.Yld	Soil Erosion	Area (sq.km)
EstaBirr	y	48.800	48.797	68.166	48.066

Chi squared for obs. vs. predicted : 0.000

Delivery Ratio for whole catchment : 0.716
 Delivery Ratio for DI=100 : 0.880
 Delivery Index scale : 44.909225
 Delivery Index offset : 204.841339








Anexo 11. Coordenadas de las coberturas muestreadas.








Nº Muestra	X Coord.	Y Coord.	Cobertura	Fotos
1	516638	1100051	Pasto	
2	517925	1099168	Pasto	
3	521930	1098508	Pasto	
4	520934	1098964	Pasto	
5	519384	1097215	Pasto	
6	517172	1098530	Pasto	
7	517557	1097650	Pasto	








8	519876	1096575	Pasto	
9	522419	1094797	Pasto	
10	517038	1101555	Pasto	
11	518882	1100922	Pasto	
12	519132	1101042	Pasto	
13	520375	1100637	Pasto	
15	516331	1099565	Pasto	








16	516919	1099743	Pasto	
17	519439	1099557	Pasto	
18	517825	1098302	Pasto	
19	516569	1101129	Pasto	
20	518034	1101128	Pasto	
21	517045	1099764	Pasto	
22	519362	1100758	Pasto	








23	519178	1099532	Pasto	
24	518827	1096365	Pasto	
25	517810	1096245	Pasto	
26	522449	1094550	Pasto	
27	520142	1100468	Pasto	
29	518664	1094481	Pasto	
31	522531	1094214	Pasto	







32	517941	1095131	Pasto	
33	522302	1096715	Pasto	
34	518339	1102525	Cultivo	
35	518670	1099221	Cultivo	
36	520647	1098457	Cultivo	
37	518280	1098785	Cultivo	
38	517135	1097989	Cultivo	

39	523006	1097765	Cultivo	
40	522715	1097346	Cultivo	
41	519562	1097057	Cultivo	
42	520099	1096268	Cultivo	
43	520072	1095843	Cultivo	
46	519117	1101989	Cultivo	
47	518918	1101556	Cultivo	

48	518374	1100983	Cultivo	
49	520295	1101056	Cultivo	
51	519192	1099859	Cultivo	
52	520325	1098718	Cultivo	
53	518717	1096598	Cultivo	
54	521130	1097135	Cultivo	
55	520828	1094593	Cultivo	

56	521497	1094488	Cultivo	
57	518705	1102151	Cultivo	
58	520396	1101379	Cultivo	
60	519370	1098578	Cultivo	
61	519860	1098088	Cultivo	
62	522663	1098175	Cultivo	
63	520523	1097285	Cultivo	

64	517838	1096826	Cultivo	
65	518378	1095682	Cultivo	
66	519450	1095430	Cultivo	
67	518535	1095246	Cultivo	
68	521861	1095018	Cultivo	
69	522100	1094645	Cultivo	
70	521402	1094685	Cultivo	

72	519034	1098628	Cultivo	
73	520366	1098050	Cultivo	
74	517573	1097271	Cultivo	
75	523125	1097064	Cultivo	
78	517536	1099850	Cultivo	
80	518941	1095781	Cultivo	
81	517446	1099656	Cultivo	