



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA
ESTACIÓN REGIONAL DEL NOROESTE**

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EVOLUCIÓN Y ESTADO DE LOS
SISTEMAS FLUVIALES POR MEDIO DE GEOINDICADORES: CUENCA
MEDIA RÍO YAQUI, SONORA.**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

TOMÁS ISRAEL GRIJALVA RODRÍGUEZ

TUTOR

DRA. DIANA M. MEZA FIGUEROA

MAYO 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1.1 <i>El caso mexicano</i>	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 HIPÓTESIS	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 <i>General:</i>	6
1.4.2 <i>Específicos:</i>	6
1.5 ÁREA DE ESTUDIO	7
1.5.1 <i>Localización y accesos</i>	7
1.5.2 <i>Fisiografía y clima</i>	7
1.5.3 <i>Geología Regional</i>	9
1.5.3.1 Paleozoico	9
1.5.3.2 Mesozoico	9
1.5.3.3 Terciario	11
1.5.3.4 Cuaternario	11
CAPÍTULO II – FUNDAMENTO TEÓRICO.....	12
2.1 ANTECEDENTES SOBRE LA SUSTENTABILIDAD, INDICADORES Y GEOINDICADORES	12
2.2 DISEÑO DE INDICADORES	15
2.2.1 <i>principios básicos</i>	15
2.2.1.1 Escala (espacio-temporal)	16
2.3 CLIMA Y SU EFECTO EN EL TERRENO	16
2.3.1 <i>Textura y patrones de drenaje</i>	17
2.3.1.1 Orden de corriente	19
2.3.2 <i>Forma de cuenca</i>	19
2.3.3 <i>Litología</i>	19
2.3.4 <i>Densidad de drenaje y frecuencia de corrientes</i>	20
2.3.5 <i>Aspectos del relieve</i>	20
2.3.6 <i>Curvas hipsométricas</i>	20
2.3.7 <i>Evolución de los patrones de drenaje</i>	21
2.4 PRESIÓN ANTRÓPICA.....	23
2.4.1 <i>Respuestas morfológicas y sedimentológicas en las corrientes debido al impacto humano</i>	23
2.5 PRESAS Y MORFOLOGÍA	27
2.5.1 <i>Estudio de la transformación del canal</i>	27
2.5.2 <i>Regulación del flujo</i>	31
2.5.3 <i>El papel de la vegetación ribereña</i>	31
2.6 GEOQUÍMICA: FONDO, ANOMALÍAS Y POSIBLES FUENTES.....	33
2.6.1 <i>Dispersión de metales en sedimentos en cuencas hidrológicas</i>	33
2.7 EROSIÓN	33

2.7.1 Vegetación	34
2.7.2 La dinámica del proceso de erosión del suelo	34
2.7.2.1 Variabilidad temporal y espacial.....	34
2.7.3 Los modelos basados en la Ecuación Universal de Perdida de Suelos (USLE).....	35
2.7.4 El contexto global de la erosión.....	37
2.8 CAMBIO GEOMORFOLÓGICO, DE PLANTA Y EN LOS PATRONES DEL SISTEMA FLUVIAL DEBIDOS A LA PRESIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA EMBALSE	41
2.8.1 Tipos de degradación.....	41
2.8.2 Cambios en los canales del río.....	42
2.8.2.1 Controles de forma y ajuste del canal.....	42
2.8.2.2 Mecanismo del cambio.....	46
CAPÍTULO III – METODOLOGÍA.....	47
3.1 CLIMA.....	48
3.2 PRESIÓN ANTRÓPICA.....	49
3.3 GEOQUÍMICA: FONDO, ANOMALÍAS Y POSIBLES FUENTES.....	49
3.3.1.Índice de geoacumulación (I_{geo})	50
3.3.1.1 Fondo geoquímico del estado de Sonora	51
3.4 EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN.....	51
3.4.1. Procesos y mecanismos de erosión.....	52
3.4.2. Vegetación	53
3.4.3. Evaluación cuantitativa de la erosión.....	53
3.4.3.1 Evaluación cualitativa de la erosión.....	54
3.5. ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL SISTEMA FLUVIAL DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI.....	54
3.5.1. Textura y patrones de drenaje	54
3.5.1.1 Orden de corrientes.....	55
3.5.1.2. Leyes de Horton.....	56
3.5.2. Densidad de drenaje.....	58
3.5.3. Tasa de relieve.....	58
3.5.4. Curva hipsométrica.....	60
CAPÍTULO IV - RESULTADOS.....	61
4.1. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD DEL SISTEMA FLUVIAL DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI	61
4.1.1 Etapa 1: Inspección del carácter y comportamiento del río	62
4.1.1.1. Etapa 1, paso 1: análisis del escenario regional y de cuenca	64
4.1.1.1.1. Elaboración de mapas preliminares	65
4.1.1.1.2. Análisis de los parámetros morfométricos de la cuenca	66
4.1.1.1.3. Presentación de los rasgos regionales	67
4.1.1.2. Etapa 1, paso 2: definición e interpretación de las unidades geomorfológicas y la metodología propuesta para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas.....	67
4.1.1.2.1. Método propuesto para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas	68
4.1.1.2.1.1. Parte cuantitativa	69
4.1.1.2.1.2. Parte cualitativa.....	70
4.1.1.2.2. Procedimiento para identificar e interpretar las unidades geomorfológicas ensambladas en el río, mediante sensoría remota	71
4.1.1.3. Etapa 1, paso 3: Análisis de la evolución del sistema fluvial mediante sensoría remota	72
4.1.1.3.1. Procedimiento para crear el vector cambio	73

4.1.2 Etapa 2: Diseño del mecanismo de monitoreo para comprobación y predicción de cambios debido a las presiones ejercidas sobre el sistema fluvial	76
4.2 RESULTADO DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	76
4.2.1. Evaluación regional y de las variables de control en la cuenca	76
4.2.1.1. Mapas preliminares	76
4.2.1.2 Análisis de los parámetros morfométricos del sistema y subcuencas	80
4.2.1.3 Análisis de la descarga y regímenes hidrológicos.....	90
4.2.1.4 rasgos regionales	92
4.2.1.4.1. Edafología	92
4.2.1.4.2. Distribución de presiones antropogénicas en la cuenca media del río Yaqui	92
4.2.2. Unidades geomorfológicas y estimación de la erosión en la cuenca hidrológica	101
4.2.2.1. Estimación de la erosión en la cuenca.....	101
4.2.3. Análisis de la evaluación del sistema fluvial mediante sensoría remota	111
4.3. PLANTEAMIENTO DEL MONITOREO - LA IMPLICACIÓN DE LA PRESIÓN OCASIONADA POR UNA PRESA.....	122
CAPÍTULO V – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
5.1 Recomendaciones.....	123
5.2 Conclusiones	124
ACRÓNIMOS UTILIZADOS.....	125
REFERENCIAS	126
ANEXO: GEOQUÍMICA DEL FÓSFORO	134

FIGURAS

FIGURA 1. PANORAMA ACTUAL DE INDICADORES EMPLEADOS O EXISTENTES EN EL CONTEXTO MEXICANO	3
FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
FIGURA 3. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA DE VARIAS REGIONES A LO LARGO DE LA CUENCA DEL RÍO YAQUI.....	10
FIGURA 4. MODELO PER PARA INDICADORES.....	14
FIGURA 5. DISTINTOS TIPOS DE DRENAJE.	18
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CURVA HIPSOMÉTRICA.....	21
FIGURA 7. DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELEVACIÓN-DISTANCIA EN LA CREACIÓN O EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL DE LOS CAUCES DEL RÍO O ESCORRENTÍA.	22
FIGURA 8. ILUSTRACIÓN CONCEPTUAL DE LAS RELACIONES EXISTENTES ENTRE LA HIDROLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA, ECOLOGÍA Y LAS CORRIENTES DE LOS RÍOS EN LOS SISTEMAS FLUVIALES.	24
FIGURA 9. LAS INTERACCIONES DE LAS PRESIONES HUMANAS IMPACTAN TANTO POSITIVA COMO NEGATIVAMENTE AL SISTEMA DE ESTUDIO.....	27
FIGURA 10. ESCENARIOS DE AJUSTES EN EL CANAL AGUAS ABAJO DE LA CORTINA DE LA PRESA, COMO RESPUESTA A LOS CAMBIOS RELATIVOS A: EL CAUDAL O GASTO (Q) Y, CARGA DE SEDIMENTOS (L).....	28
FIGURA 11. TRAYECTORIA HIPOTÉTICA DE LA TRANSFORMACIÓN POSTERIOR A LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PRESA.....	30
FIGURA 12. POSIBLES TRAYECTORIAS QUE PUEDE SEGUIR UN SISTEMA FLUVIAL PARA LLEGAR AL ESTADO 2 O ALCANZAR UN NUEVO CUASI-EQUILIBRIO, CONSIDERANDO LA INTERVENCIÓN DE LA VEGETACIÓN RIVEREÑA.	32
FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS TASAS DE DENUDACIÓN CONTINENTAL (M/M.A.).....	38
FIGURA 14. TASAS DE DENUDACIÓN DE DISTINTAS CUENCAS DE RÍOS Y DATOS TOPOGRÁFICOS DE SUMMERFIELD Y HULTON	39
FIGURA 15. ÁREAS CONTINENTALES LIBRES DE HIELO.....	40
FIGURA 16. TASAS ANUALES DE EROSIÓN GLOBAL Y DATOS DE LOS VOLÚMENES DE ROCAS SEDIMENTARIAS (BARRAS DE COLORES), LA CARGA DE LOS RÍOS DEL MUNDO (BARRA AZUL), Y LA PÉRDIDA DE TIERRAS DE CULTIVO (BARRA NEGRA).	41
FIGURA 17. LAS VARIABLES DE TRANSFORMACIÓN Y LAS CONDICIONES DE FRONTERA QUE CONTROLAN LA FORMA Y COMPORTAMIENTO DEL CANAL.....	44
FIGURA 18. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA ESCALA DE TIEMPO PARA EL AJUSTE DE VARIAS COMPONENTES DE FORMA DEL CANAL CON LAS DIMENSIONES DE LONGITUD DADAS EN UNA CUENCA HIPOTÉTICA DE TAMAÑO INTERMEDIO.....	45
FIGURA 19. DESARROLLO DE MEANDROS ENTRE LOS PUNTOS A Y B, Y FORMACIÓN DE CANAL RECTO CON UNA REDUCCIÓN EN LA PENDIENTE DEL CANAL ENTRE LOS PUNTOS A Y B.....	46
FIGURA 20. EJEMPLO DE LA CLASIFICACIÓN DE CUENTAS Y CORRIENTES TRIBUTARIAS EN CUENCAS DISTINTAS.	55
FIGURA 21. CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE NÚMERO DE CORRIENTES TRIBUTARIAS, LONGITUD DEL CANAL, ÁREA DE DRENAJE Y EL ORDEN DE CORRIENTES, EN ESCALA SEMILOGARÍTMICA.	57
FIGURA 22. RELACIÓN DE R_{H_i} CON LA PÉRDIDA ANUAL DE SEDIMENTOS.....	59
FIGURA 23. ETAPAS PARA LA CONFORMACIÓN DE UN ÍNDICE DE GEOINDICADORES.....	62
FIGURA 24. JERARQUÍA ANIDADA DE LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DEL SISTEMA FLUVIAL.	63
FIGURA 25. ETAPA 1 DE LA EVALUACIÓN DE LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DEL SISTEMA FLUVIAL.	64
FIGURA 26. ETAPA 1, PASO 1: PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA PRODUCIR UN ESCENARIO REGIONAL.	64
FIGURA 27. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN EN CUENCAS HIDROLÓGICAS.	68
FIGURA 28. ESQUEMA DEL VECTOR CAMBIO PARA LOS PERÍODOS 1 Y 2.	75
FIGURA 29. MAPA DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL (MM), ELABORADO A PARTIR DE DATOS DE LA CNA.....	77
FIGURA 30. MAPA EDAFOLÓGICO DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI, ELABORADO A PARTIR DE DATOS VECTORIALES DE INEGI SERIE II.....	78

FIGURA 31. ESTA FIGURA UBICA LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSULTADAS DE LA CNA Y CONTRASTA LOS DATOS DE TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA, ASÍ COMO LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, PRECIPITACIÓN PROMEDIO Y DÍAS CON LLUVIA. ...	79
FIGURA 32. MODELO MATEMÁTICO QUE SE AJUSTA EL MDE DE INEGI; ELABORACIÓN CON EL SOFTWARE IDRISI TAIGA.....	80
FIGURA 33. LA CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA EN ESTUDIO CORRESPONDE A UNA ETAPA DE TRANSICIÓN ENTRE LO QUE SERÍA UNA CUENCA GEOLÓGICAMENTE JOVEN Y UNA CUENCA GEOLÓGICAMENTE MADURA, O QUE HA TENIDO UNA PRESIÓN O DISTURBIO RECIENTE.	82
FIGURA 34. EN EL DIAGRAMA SE PUEDE OBSERVAR CON UNA LÍNEA ROJA EL NÚMERO DE TRIBUTARIOS CON SU ORDEN CORRESPONDIENTE, EN UNA ESCALA LOGARÍTMICA.	88
FIGURA 35. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN, PRESENTANDO LOS DATOS POR MEDIO DE PROMEDIOS MENSUALES DEL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1982-2007.).	91
FIGURA 36. GRÁFICA QUE PRESENTA LAS VARIACIONES EN EL APORTE DE AGUA DE LA PRESA EN LA CABECERA DEL SISTEMA FLUVIAL QUE SE ESTUDIA, CON UN RANGO DE DATOS QUE VA DESDE EL 01-01-2009 AL 27-03-2010..	92
FIGURA 37. SE MUESTRA LAS VARIACIONES EN EL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA PRESA LA CUAL MUESTRA LOS PUNTOS EN LOS QUE HA SIDO NECESARIO LIBERAR CANTIDADES IMPORTANTES DE AGUA O ÉPOCAS DE SEQUÍA..	92
FIGURA 38. MAPA DE PRESIONES ANTROPOGÉNICAS EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI..	92
FIGURA 39. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI), EN ELLOS SE MUESTRE EL GRADO DE IMPACTO POR ARSÉNICO EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO.....	93
FIGURA 40. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI). EN ELLOS SE MUESTRE EL GRADO DE IMPACTO POR CADMIO EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO.....	94
FIGURA 41. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI). EN ELLOS SE MUESTRE EL GRADO DE IMPACTO POR COBRE EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO.	95
FIGURA 42. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI). EN ELLOS SE MUESTRE EL GRADO DE IMPACTO POR FÓSFORO EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO.	96
FIGURA 43. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI). EN ELLOS SE MUESTRA EL GRADO DE IMPACTO POR PLOMO EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO..	97
FIGURA 44. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI). EN ELLOS SE MUESTRE EL GRADO DE IMPACTO POR ESTRONCIO EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO	98
FIGURA 45. MAPAS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI). EN ELLOS SE MUESTRE EL GRADO DE IMPACTO POR CINCO EN LOS SEDIMENTOS MUESTREADOS POR EL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO	99
FIGURA 46. EL HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS MANEJA UN RANGO DE 0 A 1,732 MSNM DE ELEVACIÓN CON UN RANGO DE CLASES DE 2 METROS; EN LA MISMA GRÁFICA SE PRESENTA UN RESUMEN ESTADÍSTICO EN LA CUAL LA MEDIA ES DE 624.178 MSNM Y UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE 258.382 MSNM.	102
FIGURA 47. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA ACUMULADA, CON UN RANGO DE ANÁLISIS DE 0 A 1,732 MSNM, CON UN RANGO DE CLASE DE 2 METROS, UNA MEDIA DE 624.187 MSNM Y UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE 258.382 MSNM.....	103
FIGURA 48. CURVA HIPSOMÉTRICA PARA LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI. LA ELEVACIÓN MODAL PROMEDIO CORRESPONDIENTE A ESTA CURVA ES DE 550 MSNM.	105
FIGURA 49. MAPA DE LA ENERGÍA POTENCIAL DE LAS LLUVIAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.	108
FIGURA 50. MAPA DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEBIDO A LA LLUVIA EN LA ZONA DE ESTUDIO	109
FIGURA 51. MAPA DE LA AGRESIVIDAD DE LAS LLUVIAS PARA I30, ELABORADO A PARTIR DE DATOS DE LA SCT/DGST	110
FIGURA 52. IMÁGENES RESULTANTE DE LA CLASIFICACIÓN LIBRE SUBTIPOS FINE Y BRAND (FINO Y GROSSO).....	111
FIGURA 53. 1991-2004. LA ECUACIÓN $Y=17.972015+0.689721X$ SEÑALA QUE LOS VALORES DE 1991 CON BASE EN LA BANDA 1 (AZUL) NO PUEDEN EXPLICAR EL 24.37% DE LOS VALORES DE LA IMAGEN DEL 2004 Y QUE EL RESTO DE ELLOS POSEE UNA DESVIACIÓN EN LA RECTA, ES DECIR EL TÉRMINO (B) DE 17.97 UNIDADES.....	112

FIGURA 54. 1991-2004. LA ECUACIÓN $Y=17.336354+0.653126X$ SEÑALA QUE LOS VALORES DE 1991 CON BASE EN LA BANDA 2 (VERDE) NO PUEDEN EXPLICAR EL 20.73% DE LOS VALORES DE LA IMAGEN DEL 2004 Y QUE EL RESTO DE ELLOS POSEE UNA DESVIACIÓN EN LA RECTA, ES DECIR EL TÉRMINO (B) DE 17.33 UNIDADES.	113
FIGURA 55. 1991-2004. LA ECUACIÓN $Y=6.431812+0.560445X$ SEÑALA QUE LOS VALORES DE 1991 CON BASE EN LA BANDA 3 (ROJA) NO PUEDEN EXPLICAR EL 35.30% DE LOS VALORES DE LA IMAGEN DEL 2004 Y QUE EL RESTO DE ELLOS POSEE UNA DESVIACIÓN EN LA RECTA, ES DECIR EL TÉRMINO (B) DE 6.431812 UNIDADES.	113
FIGURA 56. 1991-2004. LA ECUACIÓN $Y=48.195878+0.571415X$ SEÑALA QUE LOS VALORES DE 1991 CON BASE EN LA BANDA 4 (INFRA ROJA) NO PUEDEN EXPLICAR EL 60.92% DE LOS VALORES DE LA IMAGEN DEL 2004 Y QUE EL RESTO DE ELLOS POSEE UNA DESVIACIÓN EN LA RECTA, ES DECIR EL TÉRMINO (B) DE 48.19 UNIDADES.	114
FIGURA 57. 1991-2004. LA ECUACIÓN $Y=3.769159+0.633251X$ SEÑALA QUE LOS VALORES DE 1991 CON BASE EN LA BANDA 5 (INFRA ROJA BAJA) NO PUEDEN EXPLICAR EL 18.67% DE LOS VALORES DE LA IMAGEN DEL 2004 Y QUE EL RESTO DE ELLOS POSEE UNA DESVIACIÓN EN LA RECTA, ES DECIR EL TÉRMINO (B) DE 3.76 UNIDADES.	115
FIGURA 58. 1991-2004. LA ECUACIÓN $Y=0.706919+0.610603X$ SEÑALA QUE LOS VALORES DE 1991 CON BASE EN LA BANDA 7 (INFRA ROJA ALTA) NO PUEDEN EXPLICAR EL 32.43% DE LOS VALORES DE LA IMAGEN DEL 2004 Y QUE EL RESTO DE ELLOS POSEE UNA DESVIACIÓN EN LA RECTA, ES DECIR EL TÉRMINO (B) DE 0.706 UNIDADES.	116
FIGURA 59. AJUSTE DEL PERIODO 2004-1991 PARA LA BANDA 3.	117
FIGURA 60. LOS CAMBIOS ENCONTRADOS PARA EL PERIODO 1991-2004 PARA LA BANDA 3 ESTÁN REPRESENTADOS POR LOS PUNTOS BLANCOS Y ROJOS.	118
FIGURA 61. EN CONTRASTE, CON LA FIGURA 61, ESTA IMAGEN PRESENTA LOS CAMBIOS DETECTADOS EN EL EMPLEO DE LA BANDA 7.	119
FIGURA 62. MAPAS QUE REPRESENTAN LA DIRECCIÓN DEL CAMBIO PARA LAS BANDAS 3 Y 4.	120
FIGURA 63. LA IMAGEN MUESTRA EN ROJO AQUELLOS CAMBIOS QUE POSEEN UN VALOR IGUAL O SUPERIOR A LA MEDIA + 3σ	121

TABLAS

TABLA 1. INDICADORES PROPUESTOS POR LA CDS, ORGANIZADOS BAJO LOS CRITERIOS TEMÁTICOS TOCADOS POR LOS CAPÍTULOS DE LA AGENDA 21	2
TABLA 2. INDICADORES DE DESARROLLO SUSTENTABLE ELABORADOS EN MÉXICO, Y VALORACIÓN PARA USO EN EL ASEGURAMIENTO DE LA SUSTENTABILIDAD DE SISTEMAS FLUVIALES.	3
TABLA 3. MUESTRA LAS DIVERSAS CAUSAS Y VARIABLES QUE AFECTAN A LOS SISTEMAS FLUVIALES, UTILIZANDO COMO GEOINDICADOR PRINCIPAL LOS CANALES DE CORRIENTE	24
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS QUE SE PRESENTAN AL PRESIONAR UN SISTEMA FLUVIAL CON EL DESARROLLO DE UNA PRESA.	29
TABLA 5. POSIBLES TRAYECTORIAS DE CAMBIO MORFOLÓGICO EN UN CANAL, SU ASOCIACIÓN VEGETAL Y EL MECANISMO QUE ESTE SIGUE	32
TABLA 6. RELACIÓN ENTRE EL PORCENTAJE DE CUBIERTA VEGETAL Y EL PORCENTAJE DE REDUCCIÓN EN LA PÉRDIDA DE SUELOS. ...	34
TABLA 7. ESCALAS DE INTERÉS ESPACIAL Y TEMPORAL, ASÍ COMO SUS VARIABLES Y PROPIEDADES QUE DOMINAN LOS PROCESOS QUE SE DESARROLLAN EN LA ESCALA INDICADA	35
TABLA 8. FUENTES DE INFORMACIÓN, FACILITADORES Y ACCESIBILIDAD	47
TABLA 9. <i>SOFTWARE</i> EMPLEADO EN LA TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS CRUDOS Y LA ELABORACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO. ...	47
TABLA 10. DISTRIBUCIÓN DE LAS CUATRO ESTACIONES QUE SE DESARROLLAN EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI	48
TABLA 11. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSULTADAS PARA CONTEXTUALIZAR LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI.	48
TABLA 12. RANGOS QUE PUEDE TOMAR EL ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN (I_{GEO}) Y SU CONDICIÓN CUALITATIVA.	50
TABLA 13. CONTENIDO DE LOS ELEMENTOS EN SUELOS, LA CORTEZA TERRESTRE Y SEDIMENTOS.....	51
TABLA 14. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA IDENTIFICAR LAS UNIDADES DEL TERRENO.	65
TABLA 15. DESCRIPTORES UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR LAS UNIDADES DEL TERRENO.	66
TABLA 16. DESCRIPCIÓN Y REPRESENTACIÓN ESTADÍSTICA DE LA EVALUACIÓN NATURAL DEL TERRENO DONDE SE LOCALIZA LA CUENCA QUE SE ESTUDIA Y SU EVOLUCIÓN EN 10 MILLONES DE AÑOS.	81
TABLA 17. TABLA CON LA SÍNTESIS INTERPRETACIÓN DE LOS PRINCIPALES VALORES O DESCRIPTORES GEOMORFOMÉTRICOS DEL SISTEMA FLUVIAL PARA LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI.	82
TABLA 18. EN LA SIGUIENTE TABLA SE PRESENTA EL ORDEN PREFERENCIAL DE LAS SECCIONES DE LAS CORRIENTES SEGÚN SU GRADO DE DESARROLLO EN EL SISTEMA FLUVIAL.....	88
TABLA 19. RECOPIACIÓN DE LOS VALORES ANORMALES POR MUESTRAS, QUE VAN DESDE MODERADAMENTE CONTAMINADO, HASTA EXTREMADAMENTE CONTAMINADOS UTILIZANDO EL ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN I_{GEO}	100
TABLA 20. PORCENTAJE DE LOS VALORES CALCULADOS PARA EL ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	100
TABLA 21. ESQUEMA DE LA TABLA QUE ENCONTRARÁ EN EL APÉNDICE CORRESPONDIENTE AL CAPÍTULO DE GEOQUÍMICA.	101
TABLA 22. ÁREA APORTADA POR CADA CLASE DE ELEVACIÓN. EN LA TABLA SOLO SE MUESTRA UNA PARTE DE LOS RESULTADOS. .	103
TABLA 23. MUESTRA EL PORCENTAJE DEL ÁREA OCUPADA POR LA ALTITUD QUE SE INDICA, ASÍ COMO EL PORCENTAJE ACUMULADO CONFORME SE AVANZA HASTA LA MÁXIMA CLASE REGISTRADA.....	104
TABLA 24. RESUMEN DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS PERIODOS ANUALES Y MENSUALES MÁS ALTOS PARA LAS ESTACIONES QUE RODEAN LA ZONA DE ESTUDIO.	107
TABLA 25. VALORES LÍMITE SUPERIOR E INFERIOR CON BASE EN 3 VECES LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR	111
TABLA 26. VALORES LÍMITE SUPERIOR E INFERIOR MODIFICADOS CON BASE EN LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR PROPUESTAS, PARA REALIZAR LOS CAMBIOS.	112
TABLA 27. MUESTRA EL PORCENTAJE DE LAS ÁREAS CON CAMBIOS SUPERIORES AL LS ESTABLECIDO Y EL ÁNGULO DE CAMBIO PREFERENTE.	121

Simbología

H	<i>Descarga</i>
Q	<i>Caudal o gasto</i>
L	<i>Carga de sedimentos</i>
Cc	<i>Capacidad del canal</i>
W	<i>Anchura del canal</i>
d	<i>Profundidad del canal</i>
n	<i>Rugosidad, Numero de Manning</i>
S	<i>Pendiente</i>
K	<i>Transporte de material</i>
D	<i>Diámetro del material en el lecho</i>
KE	<i>Energía cinética</i>
I₃₀	<i>Intensidad máxima con duración de 30 min.</i>
EP	<i>Energía potencial</i>
m	<i>masa</i>
I	<i>Elevación</i>
g	<i>gravedad</i>
EC	<i>Energía cinética</i>
v	<i>Velocidad de la corriente</i>
Z	<i>Grado de madurez de la topografía, elevación del terreno</i>
D_d	<i>Densidad del drenaje</i>
A_ψ	<i>Área total de cuenca</i>
R_h	<i>Tasa de relieve</i>
A_m	<i>Altura máxima</i>
P_c	<i>Perímetro de cuenca</i>
A_h	<i>Área horizontal proyectada de un sistema fluvial</i>
h	<i>Elevación del sistema fluvial</i>
ψ	<i>Orden máximo de tributarios</i>
u	<i>Orden de cualquier segmento</i>
N_u	<i>Número de cuentas de orden u</i>
p	<i>Promedio mensual más alto del registro histórico de datos</i>
P	<i>Promedio anual más alto del registro histórico de datos</i>
LI	<i>Límite inferior de cambio</i>
L_u	<i>Longitud total apartada por las cuentas de orden u</i>
Q_s	<i>Gasto de salida de la cuenca</i>
L_s	<i>Descarga de la carga suspendida</i>

D_m	<i>Material del lecho de tamaño medio</i>
LS	<i>Límite superior del cambio</i>
$TDT_{1,2}$	<i>Tasa de Denudación Total 1 y 2</i>
EMP	<i>Elevación Modal Promedio</i>
PRL	<i>Promedio de Relieve Local</i>
I_{geo}	<i>Índice de geoacumulación</i>
C_n	<i>Concentración media del elemento</i>
B_n	<i>Concentración de fondo geoquímico</i>

RESUMEN

En México no se cuenta con un sistema de geoindicadores apropiado para evaluar aspectos ambientales relacionados con los componentes abióticos, como lo son los sistemas fluviales. Cada año se producen pérdidas de 270 millones de dólares debido a la erosión de los márgenes de ríos y las presas pierden 1,100 millones de m^3 de capacidad debido al azolve, lo que las hace menos productivas, entre otros efectos relacionados a una mala administración de los recursos. Los geoindicadores son medidas (magnitud de frecuencias, ritmos y tendencias) de los procesos y fenómenos geológicos que ocurren en la superficie terrestre en períodos menores a 100 años. Este trabajo propone una metodología para el uso de las tasas de denudación total, erosión y depósito como geoindicadores para evaluar la influencia antropogénica en un sistema fluvial y como ésta impacta a los procesos geológicos a corto plazo. Este tipo de metodología tiene un carácter predictivo del sistema lo que es útil para la toma de decisiones y el aseguramiento de la sustentabilidad de éste. El sistema de estudio se localiza en la cuenca media del río Yaqui, en el sureste del estado de Sonora. Fisiográficamente se ubica dentro de la provincia de la Sierra Madre Occidental, en una región dominada por un clima semiseco a semicálido. Este trabajo se divide en tres secciones principales: i) Análisis geomorfológico del sistema fluvial para la definición de los geoindicadores que muestran mayor tasa de cambio; ii) Propuesta metodológica para la aplicación de los geoindicadores, y iii) Aplicación de la metodología al sistema fluvial de la cuenca media del valle del Yaqui.

Para la determinación de los geoindicadores que mostraran las mayores tasas de cambio se realizó un análisis cuantitativo de la configuración del sistema fluvial considerando un escenario a futuro suponiendo un desarrollo libre, mediante el empleo de un análisis estadístico del Modelo Digital de Elevación (MDE). Se consideraron 4 hojas topográficas INEGI a escala 1:50,000 para el área de estudio, incluyendo 4,103,750 datos de elevación del terreno, los cuales indicaron una elevación mínima de 159 m, una máxima de 1,670.4 m, una media de 626 m y una mediana de 588.33 m. La Elevación Modal Promedio (**EMP**) obtenida mediante la construcción de la curva hipsométrica, es de 550 m. Al aplicar la ecuación de la Tasa de Denudación Total (**TDT**), dada en m/Ma , se obtuvieron datos de $TDT_{1(modelación)}=16.45$ y $TDT_{2(descarga\ real)}=13.94$, y un Promedio de Relieve Local (**PRL**) de 228.1 m. De las **TDT_x** se deduce una tasa de erosión de 72,209 y 83,964 ton/año, respectivamente. El análisis climático se realizó considerando datos de siete estaciones meteorológicas en el área de estudio, con el fin de elegir el geoindicador que favorece la erosión. Se elaboró un mapa de suelos con datos de la Serie I del INEGI incluyendo la clase textural de los mismos; se encontró que el regosol y leptosol representan casi un 80% del área con clase textural predominante gruesa. También se elaboró una tabla con un índice de vulnerabilidad al intemperismo de acuerdo a la litología. Con los estudios climatológicos, edafológicos y geológicos realizados se crearon mapas para identificar cualitativamente las zonas de mayor vulnerabilidad al intemperismo y erosión. Se elaboró un mapa de presiones antropogénicas, incluyendo asentamientos humanos y zonas de actividad minera. Las anomalías geoquímicas se interpretaron de acuerdo al índice de geoacumulación (I_{geo}) para As, Cd, Cu, P, Pb, Sr, y Zn. Se generaron valores de fondo para el estado de Sonora con los siguientes resultados en ppm: As = 7.7, Cd = 0.17, Cu = 33, P = 670, Pb = 19, Sr = 320, U = 3.1, Zn = 95.

Los resultados indican que sin modificar la configuración de las variables actuales del sistema fluvial, se espera que en 10 millones de años los valores anteriormente mencionados sean de -4.5, 1,505, 462, 423 m, respectivamente. Se realizó una interpolación para simplificar la representación del MDE, mediante un polinomio de 9° con una bondad de ajuste (R^2) de 70.43%. El sistema fluvial posee un orden de 5°, con una

red de drenaje predominantemente del tipo dendrítico, y la cuenca posee una configuración transicional entre joven y madura, siendo esta última etapa la predominante.

Por medio del software Watershed Model Simulator 8.2 se encontró que la cuenca estudiada posee una densidad de drenaje de 0.47, y una longitud total de drenaje de 949.5 km. Se obtuvo el número de corrientes por el orden de clasificación, así como la longitud aportada por las mismas, las cuales resultaron ser de: 202, 44, 12, 3 y 1 corrientes, que representan 504.72, 240.7, 109.94, 57.21, 36.83 km de longitud, respectivamente. La ecuación $Y = 40.37X^2 - 354.1X + 808.3$ ($R^2 = 0.993$) en donde X es igual al orden de corriente y Y representa el aporte en kilómetros, simplifica el comportamiento y carácter de los distintos órdenes de corriente del sistema. El área de la cuenca es de 2006.3 km^3 , con un perímetro de 364.0 km, una pendiente general de 0.2797, y una longitud máxima de 62.41 km.

Para identificar los cambios en los ensambles del sistema fluvial se empleó el Sistema de Información Geográfica IDRISI y distintas técnicas de Sensoría Remota. Para lograr este fin, primero se removió el "ruido" en la imagen; posteriormente se redujo al máximo la influencia atmosférica debido a la bruma y otras interferencias de la misma índole. Después se exploraron los valores de reflectancia, agrupando las imágenes por fecha de obtención y por bandas, sin modificar su escala y contraste. Una vez organizada esta información, se realizaron las composiciones con las bandas de las imágenes LANDSAT TM y ETM+ exceptuando las bandas 6L y 6H, empleando distintas composiciones con la finalidad de encontrar representatividad y significado. Se realizó una clasificación libre, permitiendo el análisis de las imágenes en su totalidad, por medio de un clasificador suave, el cual permitió identificar firmas espectrales semejantes. Se determinaron los límites inferior y superior del cambio en los "cluster" (misma firma espectral) con base en tres veces la desviación estándar. Lo anterior se define un vector que indica dirección y magnitud del cambio proporcionando un carácter predictivo a la metodología.

La aplicación al sistema fluvial de la cuenca media del río Yaqui permite concluir que el canal de mayor orden jerárquico cubre el mínimo necesario de variables para representar el sistema fluvial, lo cual resulta en ahorro de tiempo y dinero al administrar el sistema, en especial si se cuenta con el soporte de una base de datos e imágenes satelitales de distintas fechas. Aunque la erosión ocurre en la mayor parte de sistema fluvial, el depósito de sedimentos se concentra localmente, en especial sobre la corriente principal, lo que hace más fácil detectar y por tanto monitorear los ensambles que se producen en ésta, convirtiendo los cambios sobre sus unidades geomorfológicas en quizás los geoindicadores más eficientes para medir y predecir los cambios del sistema fluvial de la cuenca media del río Yaqui.

ABSTRACT

In Mexico, there is a lack of an appropriate system of geo-indicators to evaluate environmental aspects related to the abiotic components, such as fluvial systems. Every year losses of 270 million dollars are produced because of erosion of the river banks. Dams lose 1100 million m³ of capacity due to the sediment accumulation, which makes them less productive among other effects related to a poor management of the resources. The geo-indicators are measurements (magnitude of frequencies, rhythms and tendencies) of the geological processes that occur on the terrestrial surface in periods shorter than 100 years. This work proposes a methodology for the use of geo-indicators to evaluate the anthropogenic influence on a fluvial system and how it impacts the geological processes in short term. This type of methodology has a predictive approach of the system, which is useful for decision-making and the ensuring of its sustainability. The study system is located at the medium basin of Yaqui river, southwest Sonora. Physiographically, it is located within the Sierra Madre Occidental, in a region with a semi-dry to semi-warm climate. This work is divided into three main parts: i) Geo-morfometrical analysis of the fluvial system for definition of the geo-indicators that show a major change rate; ii) Methodological proposal for the application of the geo-indicators, and iii) Application of the methodology on the fluvial system of the medium basin of Yaqui valley.

*For the determination of the geo-indicators that show the major change rates, a quantitative analysis was made of the fluvial system's configuration considering future scenery supposing a free development, by means of a statistical analysis of the Digital Elevation Model (DEM). Four INEGI topographical sheets at scale 1:50,000 were considered for the study area including 4,103,750 elevation data, which indicated a minimum raise of 159m, a maximum of 1670.4m, a medium of 626m, and a median of 588.33m. The Mean Modal Elevation (**MME**), obtained by the construction of the hypsometrical curve, is 550m. By applying the equation of Total Denudation Rate (**TDR**), given in m/Ma, the following data was obtained: $TDR_{1(modelation)}=16.45$ and $TDR_{2(actual\ fluxes)}=13.94$, and a Mean Local Relief (**MLR**) of 228.1m. It is deduced from the **TDRx** an erosion level of 72,209 and 83,964 ton/year respectively. The climatic analysis was made considering data from seven meteorological seasons in the study area aiming at choosing the geo-indicator that favors erosion. A lands map with data from Series I of INEGI was elaborated including their textural class. It was found out that regosol and leptosol represent almost an 80% of the area with textural class mainly thick. A chart with an index of vulnerability to weathering according to the lithology was also elaborated. Maps to identify qualitatively the zones of major vulnerability to weathering and erosion were created with the climatological, edaphological and geological studies made. A map of anthropogenic pressures was elaborated as well, including human settlements and mining activity zones. The geo-chemical anomalies were interpreted according to the index of geo-accumulation (I_{geo}) for As, Cd, Cu, P, Pb, Sr, and Zn. Bottom values were generated for the state of Sonora with the following results in ppm: As=7.7, Cd=0.17, Cu=33, P=670, Pb=19, Sr=320, U=3.1, Zn=95.*

The results indicate that without modifying the settings of the current variables of the fluvial system, it is expected that in 10 million years the mentioned values will be -4.5, 1,505, 462, 423 m, respectively. An interpolation was made in order to simplify the representation of the MDE through of a polynomial of 9° with a fit (R^2) of 70.43%. The fluvial system possesses an order of 5° with a drainage web mainly dendritic kind, and the basin possesses a transitional configuration between young and mature, being the last the predominant one.

By using the software Watershed Model Simulator 8.2, it was found that the study basin possesses a drainage density of 0.47 and a drainage total length of 949.5km. The number of currents was obtained by the order of classification as well as the length provided by them. These latter came to be: 202, 44, 12, 3, and 1 currents that represent 504.72, 240.7, 109.94, 57.21, 36.83km of length respectively. The equation $Y=40.37X^2 - 354.1X + 808.3$ ($R^2=0.993$) where $X=$ to the order of current and Y represents the contribution in kilometers, simplifies the behavior and character of the different current orders of the system. The area of the basin is 2006.3km^3 with a perimeter of 364.0 km, a general slope of 0.2797 and a maximum length of 62.41 km.

In order to identify the changes in the fluvial system assemblies, the System of Geographical Information IDRISI and different Remote Sensory techniques were employed. First the "noise" in the image was removed; then the atmospheric influence due to the mist was reduced at the maximum as well as other interferences of that nature. Next, the reflecting values were explored, grouping the images by means of (obtaining) date and bands, without modifying their scale and contrast. Once this information was organized, the compositions with the bands of the images LANDSAT TM and ETM+ excepting the bands 6L and 6H were made, employing different compositions with the purpose of finding representativeness and meaning. A free classification was made, allowing the total analysis of the images with of a soft classifier, which allowed identifying similar spectral signatures. The limits lower and higher of the changes in the clusters (same spectral signature) were determined in relation to three times the standard deviation. Based on the above, a vector that indicates direction and magnitude of the change giving a predictive character to the methodology was defined.

The application to the fluvial system of the Yaqui river medium basin allows concluding that the stream of major hierarchical order covers the minimum necessary of variables to represent the fluvial system. This results in time and money savings when organizing the system, especially if there is a support from a database and satellite images of distinct dates. Although erosion occurs in most of the fluvial system, the deposit of sediments concentrates locally, especially on the main current, which makes easier to detect and therefore to monitor the assemblies produced in it, this, converts the changes on its geo-morphological units into the most efficient geo-indicators to measure and predict the changes of the fluvial system in this medium basin of the Yaqui River.

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Existe un déficit en el manejo de los recursos naturales en el país, mismos que se han tratado de solucionar en base a la vinculación del problema de una forma “parcial”, es decir, sin tomar en cuenta que todo lo relacionado con el ambiente, es una compleja red de interacciones auto regulables, y no solo fenómenos de causa y efecto.

Por otro lado, existen mecanismos ampliamente utilizados alrededor del planeta, como lo son, los indicadores de sustentabilidad, mismos que se han acercado bastante a explicar: cómo, cuándo, por qué, etc., nuestros sistemas naturales, se comportan como lo hacen. Si bien, en México se han empleado estos indicadores (*p.e.* SEMARNAT, 2005; INEGI-SEMARNAP, 1997; INEGI-SEMARNAP, 1999; SEMARNAP, 2000), no existe algún parámetro en los mismos que indique que se han utilizado adecuadamente pese a que la misma naturaleza de los indicadores, señala que sin una escala y límites apropiados, éstos carecen de total significado para las tareas de gestión y monitoreo del sistema con el cual estamos interactuando. Para el caso de México, los indicadores que se han implementado, están orientados a aspectos que determinan la funcionalidad de un país, estado, ciudad y/o comunidad.

Los indicadores que se generen necesitan de cierta cantidad de datos con calidad, para poder ser alimentados. Desgraciadamente, en el país no se ha prestado atención a esta necesidad, tal como lo expresa la publicación *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*, INE-INEGI, 2000: “La capacidad de elaboración es mayor en los temas institucional, social y económico (100%, 85.4% y 82.6%, respectivamente). Los indicadores ambientales, en cambio, son de desarrollo reciente y su disponibilidad es de 80% porque, para algunos de ellos, todavía se requiere trabajar en cuanto a la generación de información básica (datos de alimentación)”.

Por otra parte la variación espacial de la sustentabilidad no ha tenido la consideración o atención necesaria (Troyer, 2002), por lo cual, los estudios espaciales de indicadores de sustentabilidad son prácticamente inexistentes. La continuidad, que es una condición indispensable en cualquier sistema de indicadores y la única forma de llevar un sistema al estado de sustentabilidad, no se encuentra tan desarrollada. Otro asunto de atención, se presenta en los numerosos informes ambientales y de sustentabilidad, donde se suelen ignorar los riesgos geológicos, al igual que otros componentes claves de carácter abiótico de los ecosistemas (Berger, 1998).

1.1.1 El caso mexicano

En México existe una lista de indicadores de sustentabilidad, mismos que se han agrupado en categorías temáticas que cubren los 40 capítulos de la agenda 21¹, clasificados en cuatro categorías que son: Social, Económica, Ambiental e Institucional. Debido a su naturaleza, los indicadores se enmarcan en un esquema de **presión-estado- respuesta (Modelo PER)**, distribuidos de la siguiente manera: 43 indicadores de Presión, 54 de Estado y 37 de Respuesta, que totalizan con 134 indicadores (INEGI-INE, 2000). En la Tabla 1 se muestra como están organizadas las agendas 21 de los países participantes, en la propuesta de la Comisión de Desarrollo Sustentable (CDS), la cual se formó durante la asamblea general de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en diciembre de 1992. Dentro de las responsabilidades de esta Comisión está revisar el progreso en la implementación de la Agenda 21 y la Declaración de Río sobre el desarrollo sustentable, la CDS se reúne anualmente en Nueva York.

Tabla 1. Indicadores propuestos por la CDS, organizados bajo los criterios temáticos tocados por los capítulos de la agenda 21 (United Nations, 2002).

Agenda 21: Listado de capítulos del desarrollo sustentable según categoría temática		
Capitulo y categoría		Numero de indicadores
Aspectos sociales		41
Aspectos Económicos		23
Aspectos ambientales		55
Aspectos institucionales		15
	Total	134

El esfuerzo y el trabajo desarrollado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), por elaborar un índice de indicadores de sustentabilidad (IDS), con la finalidad de frenar el deterioro ambiental y sentar las bases para revertirlo, tiene una instrumentación de 113 indicadores, de los 134 propuestos por la CDS (INE-INEGI, 2000).

De estos 113 indicadores generados, 39 son de presión, 43 de estado y 31 de respuesta (Figura 1). Las secretarías participantes califican como altamente satisfactorios el resultado obtenido, basando el éxito en relación al porcentaje calculado como el número de indicadores creados sobre el número de indicadores propuestos por la CDS. Como se verá más adelante, la creación y

¹ La agenda 21 es un programa de las Naciones Unidas (ONU) para promover el desarrollo sustentable, una lista detallada de asuntos que requieren atención, organizada cronológicamente. 21 hace referencia al siglo XXI (United Nations, 2002).

contextualización de estos indicadores debe mejorarse, ya que para cada caso, debe emplearse una escala en particular.

A continuación se presenta el resumen de los indicadores generados por México:

Categoría Del Indicador	Tipo de indicador							
	Presión		Estado		Respuesta		Total	
	Propuestos	Generados ¹	Propuestos	Generados ¹	Propuestos	Generados ¹	Propuestos	Generados ¹
Social	13	13	21	16	7	6	41	35
Económico	8	8	12	10	3	1	23	19
Ambiental	22	18	18	14	15	12	55	44
Institucional	0	0	3	3	12	12	15	15
Total	43	39	54	43	37	31	134	113

¹ Incluye los elaborados de acuerdo con la metodología de la CDS y los realizados en carácter alternativo.

Figura 1. Panorama actual de indicadores empleados o existentes en el contexto mexicano (INE-INEGI, 2000).

De estos indicadores que se generaron en México, solo se pueden emplear cinco (mismos que representan el 4.42% del total de indicadores), contextualizándolos al estudio de los sistemas fluviales, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Indicadores de desarrollo sustentable elaborados en México, y valoración para uso en el aseguramiento de la sustentabilidad de Sistemas Fluviales. (Elaboración a partir de INE-INEGI, 2000).

Indicadores para México			
Nombre	Aspecto	PER	¿Aplica para la evaluación de sistemas fluviales?
Concentración de coliformes fecales en agua dulce	Ambiental	E	Sí, siempre y cuando, se ajuste a la escalas necesarias.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en cuerpos de agua		E	
Cambios en el uso del suelo		P	
Cambios en la condición de las tierras		R	
Tierras afectadas por la desertificación		E	
Uso de pesticidas agrícolas		P	
Uso de fertilizantes		P	
P=presión, E=estado y R=respuesta			

1.2 JUSTIFICACIÓN

La evaluación de los ecosistemas del milenio (MEA, 2005)² concluye que en los últimos 50 años se han transformado los ecosistemas más rápida y extensamente que en ningún otro período de la historia humana; también afirma que estos cambios han contribuido a obtener grandes beneficios para el bienestar humano y el desarrollo económico, pero con crecientes costos ambientales y sociales.

El 72% de la precipitación pluvial anual en México (1,512 km³ de agua al año) se evapora para reintegrarse al ciclo hidrológico, 5% se infiltra y recarga los más de 653 acuíferos del país y el 25% restante (400 km³) escurre a los cuerpos de agua superficiales, entre los que destacan 39 ríos principales, cuyas cuencas ocupan 58% del territorio; 70 lagos principales; 137 lagunas costeras, y 14,000 cuerpos de agua interiores. Para el aprovechamiento de las aguas superficiales existen alrededor de 4,000 presas en México, cuya capacidad de almacenamiento es de 150 km³ (SEMARNAT, 2007).

El grado de presión sobre el recurso hídrico se utiliza como una medida de la vulnerabilidad del país frente a la escasez de agua e identifica si la tasa de extracción es sustentable a largo plazo³. Cuando el grado de presión es mayor a 40%, se considera que existe estrés hídrico severo (SEMARNAT, 2007). En el nivel regional se distinguen tres zonas totalmente diferentes en el país: el norte, con niveles de estrés hídrico elevados durante el 2006, con una presión de 87.07%, (SEMARNAT, 2007); el centro, con niveles medios de 20-40%, y el sur con niveles bajos de 0-20%.

En lo que se refiere a la generación de energía, el volumen concesionado hasta diciembre de 2006 fue de 158,566 millones de metros cúbicos, de los que se emplearon 140,295 millones de metros cúbicos para generar 13.2% de la energía del país (SEMARNAT, 2007). Actualmente, la capacidad instalada en las centrales hidroeléctricas representa 21.5% de la total instalada en el país (SENER, 2008).

La contaminación de los recursos hídricos es quizá uno de los problemas más graves de deterioro ambiental a los que México se enfrenta, tanto por el daño a los ecosistemas y habitats naturales, como por los riesgos a la salud humana y por la inutilización de caudales de agua potencialmente aprovechables.

² Es el estudio más importante y completo realizado a la fecha sobre el estado de los ecosistemas, terrestres y marinos, elaborado por más de 1,700 especialistas de casi todas las naciones del mundo, auspiciado por las Naciones Unidas y otras organizaciones internacionales y publicado por Island Press: <http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>

³ la cual se presenta como la relación del volumen total de agua concesionado sobre la disponibilidad natural media del agua.

De las 13 regiones hidrológico-administrativas del país, nueve de ellas presentan sitios de monitoreo cuya calidad del agua es clasificada como fuertemente contaminada: Península de Baja California, Noroeste (la cuenca del río Yaqui, es una de las que recibe mayor carga de contaminantes en el país), Pacífico Norte, Balsas, río Bravo, Lerma-Pacífico, Santiago, Golfo Norte, Golfo Centro y Valle de México, ya que presentan valores promedio demanda bioquímica de oxígeno (DBO) superiores a 30 mg/l (SEMARNAT, 2007).

En nuestro país, alrededor de 20 millones de personas habitan en áreas susceptibles al impacto de huracanes (alrededor de 800,000 km² del país); anualmente se producen daños por 270 millones de dólares en promedio debido a la erosión de las márgenes de los ríos; las presas pierden 1,100 millones de metros cúbicos de capacidad debido al azolve cada año, y se dragan alrededor de 300 millones de metros cúbicos en ríos y puertos (SEMARNAT, 2007).

Para los próximos años, la definición de fuentes alternas de suministro de agua, la disminución de los niveles de abatimiento y el mantenimiento del equilibrio de los acuíferos, la generación de acuerdos de distribución y el desarrollo de escenarios que permitan prever el efecto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en México serán asuntos que necesariamente deberán enfrentarse de manera integral bajo el principio de la sustentabilidad.

El punto crucial del desarrollo sustentable es “el cómo” armonizar la expansión productiva con la base de recursos que la hace posible. Para entender esto, se cita el caso de México, el cual cuenta desde 1988 con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (**LEGEEPA**), misma que establece, que el desarrollo sustentable se concibe como “el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de generaciones futuras”.

El Programa de la Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (**PNUMA**), definía a la gestión ambiental sustentable como una necesidad impostergable, debido a que también reconoce, que es la única forma de garantizar el mantenimiento y mejoramiento continuo en cantidad y calidad del patrimonio natural y el nivel de vida de las personas (PNUMA, 1987).

1.3 HIPÓTESIS

El trabajo sustenta que es posible la creación de un índice asequible para evaluar y predecir el comportamiento de los sistemas fluviales de una forma totalmente objetiva, por medio de geoindicadores, los cuales aportan la información suficiente para conducir a la comprensión del carácter y configuración del sistema a la escala espacio-temporal a la cual se quiera estudiar éste.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General:

Proponer una metodología para desarrollar un índice de indicadores de carácter geológico-ambiental (geoindicadores), para determinar la transición del ecosistema a lo largo de la vida útil de una presa ó hidroeléctrica, así como las modificaciones de éste debido a la presión ejercida por dicha obra civil de gran tamaño.

1.4.2 Específicos:

- Establecer y evaluar los geoindicadores para caracterizar el estado ecológico, y los posibles escenarios desencadenados por el estrés producido por la presión de un proyecto hidroeléctrico.
- Establecer directrices de ordenamiento territorial que contribuyan en la selección de las escalas de monitoreo y medición, así como la selección de indicadores para cada caso particular.
- Conocer y adaptar los indicadores que existen, y de ser posible, integrarlos al índice que se propone en este trabajo, siempre y cuando su naturaleza permita aplicarlos.
- Establecer los criterios mínimos necesarios, para crear una descripción del estado⁴, con un carácter totalmente objetivo y que éste sea representativo del sistema al cual se aplica.
- Determinar los parámetros necesarios, para asegurar la calidad y existencia de los datos de entrada de la metodología que se propone, sin que estos requieran de antecedentes históricos extensos ni de bases de datos que quizás no existan.
- Proponer una metodología asequible y sencilla.

⁴ Se refiere a la configuración y condición en la cual se encuentra el sistema natural que se estudia, bajo el marco de referencia: Presión-Estado-Respuesta (PER).

1.5 ÁREA DE ESTUDIO

1.5.1 Localización y accesos

El área de estudio se localiza en la parte centro sureste del estado de Sonora y está limitada por las coordenadas UTM 3,210,000N, 600,000W y 3,150,000N, 670,000W. Dentro de esta área se encuentran los poblados de Tónichi, Rebeico, Soyopa, Tecoripa y San Javier, entre otros poblados con menor cantidad de habitantes.

Las principales vías de acceso son por la carretera federal No. 16 Hermosillo- Yécora, que cruza el río Yaqui en el km 167, por el puente con el mismo nombre a 3 km aguas abajo del poblado de Tónichi. Del puente hacia el SSE se encuentra un camino de terracería transitable todo el año, por una distancia de 5 km sobre la margen izquierda del río, hasta un embarcadero ubicado a unos 600m aguas arriba del sitio que limita el área de estudio. Por la margen derecha existe otro acceso que parte de la carretera antes mencionada; en el entronque a San Antonio de la Huerta en el km 164, le sigue hacia el SSE, por una distancia de 10 km (Figura 2).

Otra vía principal de acceso es por la carretera federal No. 20 Hermosillo – Sahuaripa y que conecta con la Carretera Federal 16 por una carretera que pasa por los poblados de Rebeico, Soyopa y San Antonio de la Huerta (Figura 2).

1.5.2 Fisiografía y clima

El área de estudio presenta el siguiente grupo de características climáticas acomodadas de mayor a menor según el área que ocupan $BS1hw(x')$ semiseco semicálido, $BS1(h')hw(x')$ semiseco cálido, $BS0(h')hw(x')$ seco cálido, y en mínima expresión $(A)C(w0)(x')$ templado subhúmedo, localizado generalmente sobre la divisoria preferentemente al este. La cuenca se encuentra en el extremo poniente de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, la cual se formó a partir de la extrusión a gran cantidad de materiales volcánicos, que cubren a las litologías más antiguas, los cuales están predominantemente compuestos por rocas silíceas.

En esta región, en las partes altas de la sierra, dominan los bosques de encinos y coníferas. Sobre las vertientes occidentales se extienden las selvas caducifolias, y en los declives orientales los matorrales y pastizales. Los ríos que nacen en el norte de esta región drenan hacia el sur, lo cual se debe al fallamiento en bloques con diversas inclinaciones (INEGI 2000).

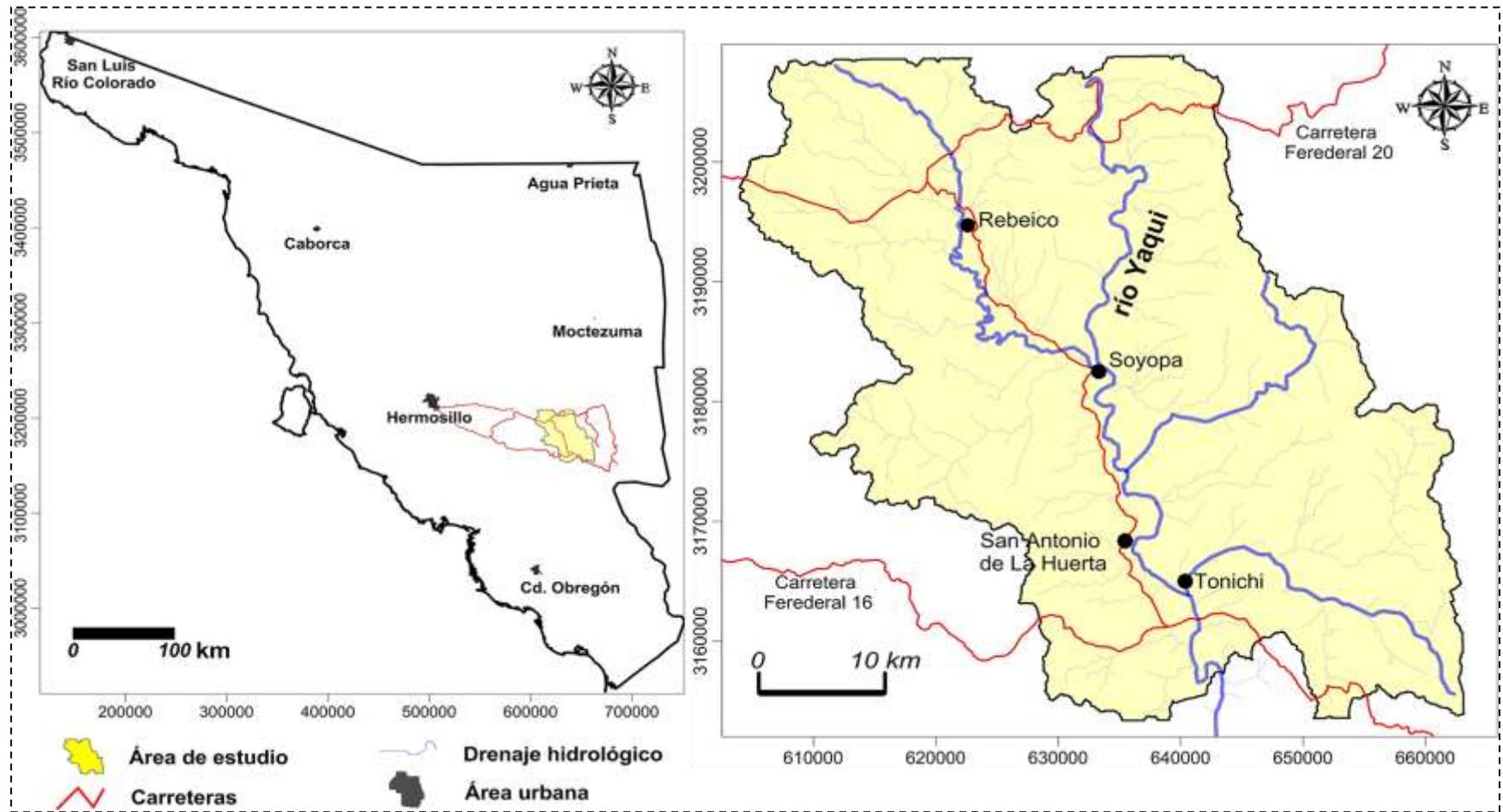


Figura 2. Localización del área de estudio.

1.5.3 Geología Regional

La cuenca media del río Yaqui, posee unidades litológicas cuyas edades varían desde el Paleozoico hasta el Holoceno e incluyen rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. En la Figura 3 se presenta la columna litológica descrita en el informe de prefactibilidad (SEZPN, 1994).

1.5.3.1 Paleozoico

Las rocas de edad paleozoica constituyen parte de la columna litológica regional y está formada por las unidades San Antonio y Soyopa del Ordovícico, constituidas por sedimentos clásticos y terrígenicos depositados en ambiente de continental a marino. Las rocas que forman estas unidades son dolomías, cuarcitas, ortocuarcitas, lutitas silíceas, lutitas carbonosas, calizas, areniscas silíceas y lutitas calcáreas (SEZPN, 1994).

El periodo de tiempo entre el Devónico y el Carbonífero está representado por la Formación Las Tierras, una gruesa secuencia de mármoles con bandas calcisilicatadas con niveles arenosos silíceos y pelíticos. El Pérmico está representado por el grupo Sierra Martínez constituida por estratos delgados a masivos de calizas con bandas y nódulos de pedernal, interestratificados con capas delgadas de lutitas (SEZPN, 1994).

1.5.3.2 Mesozoico

Las rocas mesozoicas en el área de estudio están conformadas por una secuencia de rocas en cuya base afloran las rocas del Triásico tardío del Grupo Barranca, constituido por tres formaciones de sedimentos de origen detrítico que son, de la base a la cima la Formación Arrayanes, formada por areniscas cuarcíticas intercaladas con lutitas y conglomerados; la Formación Santa Clara, compuesta por areniscas intercaladas con lutitas negras y mantos de carbón y grafito y La Formación Coyotes, compuesta por areniscas cuarcíticas intercaladas con lutitas y conglomerados. Sus afloramientos son los más escasos en la cuenca, sin embargo éstas afloran hacia el sur del área de estudio.

En cuanto al Jurásico y Cretácico, estos períodos están integrados por la Formación Tarahumara, la cual forma parte del complejo volcánico de la parte central del Estado de Sonora, que incluye una intercalación de sedimentos carbonatados. La Formación Tarahumara es predominantemente andesítica.

Se incluyen intrusivos de composición que varía de granito a diorita, que representan el Cretácico Superior y Eoceno. Estas rocas se generaron en el evento responsable de los grandes plutones en el Estado. Posee una amplia distribución en el área de estudio.

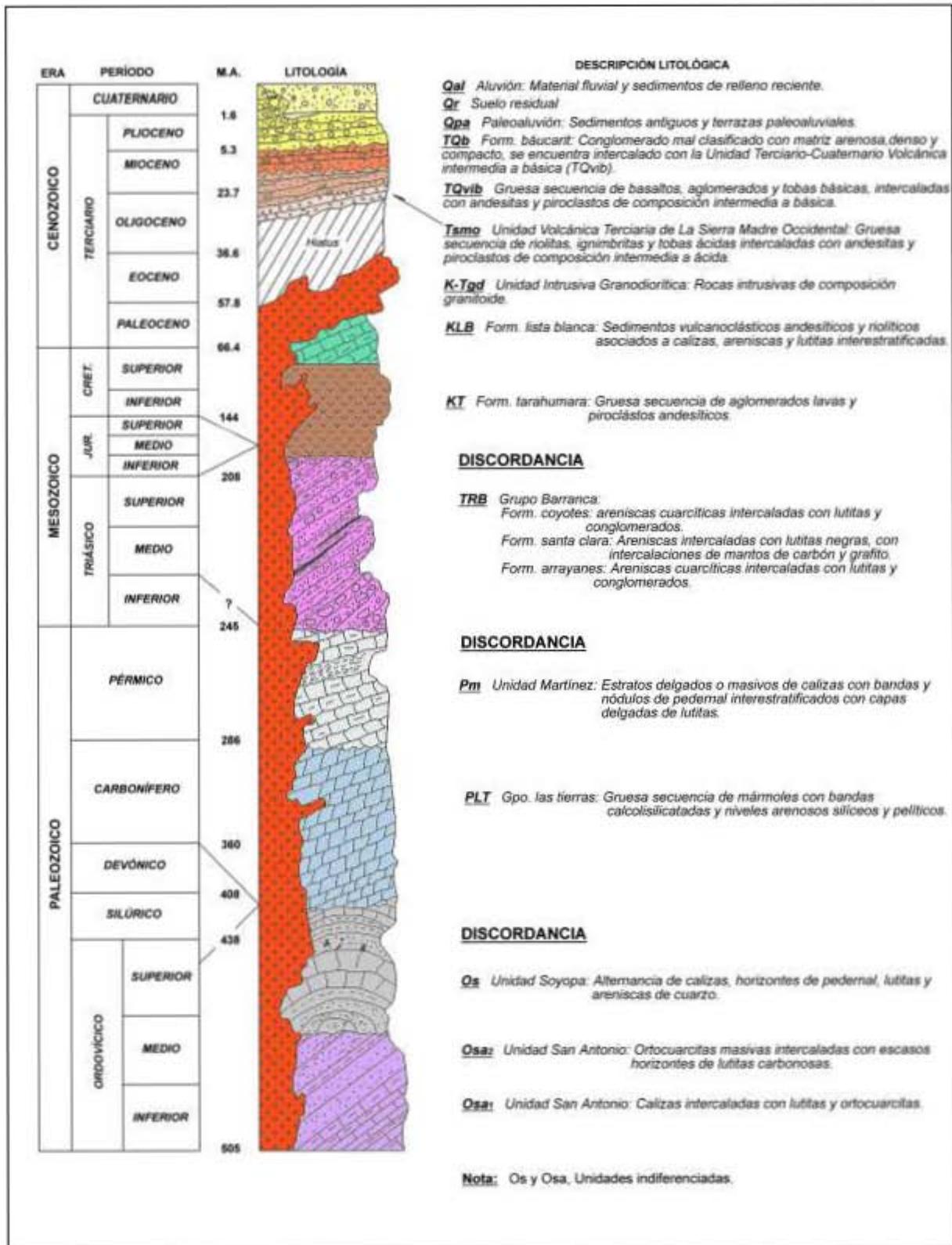


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de varias regiones a lo largo de la cuenca del río Yaqui (SEZPN, 1994).

1.5.3.3 Terciario

La unidad comprendida entre el Oligoceno y Plioceno es la de mayor importancia en el área de estudio, dada su abundancia y distribución, la cual está limitada al relleno de fosas tectónicas originadas a partir del evento distensivo del Terciario medio, denominado Sierras y Valles Paralelos (*Basin and Range*), el cual está caracterizado por grandes fallas normales con rumbo NNW – SSE. Los rellenos de estas fosas tectónicas están compuestos, por los sedimentos continentales de la Formación Báucarit, en algunas localidades este cubierta por la secuencia vulcanosedimentaria definida como formación Lista Blanca.

1.5.3.4 Cuaternario

Los depósitos del Cuaternario cubren de forma discordante las rocas descritas y están compuestos por tres unidades: el paleoaluvión, constituido por sedimentos antiguos de lagos desecados y terrazas; el aluvión, formado por material fluvial y sedimentos recientes, cuya distribución es caótica y depende en gran medida de las características del encajonamiento del río, **cuentas** y tributarios de la cuenca media del río Yaqui.

CAPÍTULO II – FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES SOBRE LA SUSTENTABILIDAD, INDICADORES Y GEOINDICADORES

Charles Lyell, en su obra *Los fundamentos de la geología (1830)*, se refería a la influencia del hombre sobre la Tierra y señalaba que la tala de árboles y el drenaje de los lagos y pantanos tendía a variar en gran manera el estado de la superficie habitable; sin embargo, él creía que las fuerzas generadas por el hombre eran despreciables comparado con la fuerza ejercida por la naturaleza. No es de extrañar que Lyell pensara de esta manera, pues podemos justificar su pensamiento basados en el contexto tecnológico de la época en la cual vivió, período que comprende el inicio de la revolución industrial.

A finales de la década de 1980 y principios de la década de 1990, comienza una nueva modalidad de desarrollo, con una perspectiva ambiental y conciencia sobre los límites permitidos (resiliencia⁵), actuando a favor de las futuras generaciones y la justicia social; en otras palabras, un desarrollo sustentable.

Para alcanzar este estado es necesario incorporar a nuestros análisis, indicadores ambientales, los cuales son medidas que hacen perceptible una tendencia o fenómeno que no es inmediatamente detectable. La **IUGS** (*International Union of Geological Sciences*) decidió, en 1992, a través de su Comisión de Ciencias Geológicas para el Planteamiento Ambiental (**COGEOENVIRONMENT**), establecer indicadores geológicos para utilizar en los informes ambientales y en el manejo de ecosistemas. Los geoindicadores son medidas, magnitudes frecuencias, ritmos y tendencias de procesos y fenómenos geológicos que ocurren en la superficie terrestre y están sujetos a cambios ambientales significativos en períodos menores a 100 años (Berger, 1996).

El concepto de desarrollo sustentable se conoció por medio de una publicación de la *World Conservation Strategy* (Estrategia Mundial de Conservación), realizada en 1980 por la *International Union for the Conservation of Nature* (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). Sin embargo, el concepto de sustentabilidad se hizo popular hasta 1987, cuando la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo de las Naciones Unidas realizó un informe denominado **Informe Brundtland**, que transformó al desarrollo sustentable en un instrumento conceptual para tratar los tópicos relacionados con la protección al medio ambiente.

La palabra indicador proviene del latín *indicare* cuyo significado es indicar, mostrar algo con indicios y señales (Ministry of Environmental and Energy, 1995). Por tanto, el uso de un indicador

⁵ (del latín *resilio*, *resilire*: saltar hacia atrás, rebotar) su significado depende del contexto, la resiliencia en los sistemas naturales, se refiere a la capacidad del sistema de absorber y/o adaptarse (soportar) perturbaciones (presión).

implica el uso de un objeto que refleja algo distinto al mismo, normalmente más complejo. Otra definición, sería ver a un indicador como la “medida de la parte observable de un fenómeno que permite valorar otra porción no observable de dicho fenómeno” (Chevalier et al., 1992).

Por otra parte, el Instituto Francés de Medio Ambiente define a un indicador como un “dato que ha sido seleccionado a partir de un conjunto estadístico más amplio por poseer una significación y una representatividad particulares” (Sánchez, 2002). Sea cual fuere su función y escala, los indicadores deben cumplir con tres aspectos básicos (Adriaanse, 1993):

- Simplificación
- Cuantificación
- Comunicación

Esta clase de indicadores son considerados por muchos, como una herramienta metodológica nueva, que proporciona valores cualitativos y cuantitativos, para ayudar en la toma de decisiones sobre las intervenciones en el medio ambiente, con base en información objetiva, reduciendo la incertidumbre en la gestión del sistema ambiental que se trate (Bell et al., 1999).

Los indicadores se organizan en índices, lo cuales a su vez se pueden agrupar de diversas formas, según su aplicación: por temas, sectores, escala espacial (global, regional, local), medio de aplicación (agua, aire, suelo, recursos bióticos o abióticos), etc., siendo el objetivo la selección de indicadores que describan la totalidad de los efectos en el sistema. La representatividad de los indicadores, está condicionada a la calidad de la información en la cual están basados.

En la actualidad no existe ningún procedimiento estándar y formal para la elaboración de indicadores, pues, se han utilizado criterios en función de las particularidades y necesidades de cada sistema. Sin embargo, existe un modelo clásico y ampliamente adaptado, propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico⁶ (OCDE), denominado indicadores de Presión-Estado-Respuesta (Figura 4); en el cual las actividades humanas **presionan** sobre el ambiente (contaminación, uso de recursos), modificando el **estado** de ese ambiente (biodiversidad, integridad ecológica, terreno), etc., lo cual tiene un **respuesta** humana mediante políticas y acciones que intentan controlar dicha presión (López, 2008).

Este índice debe ser por definición una herramienta metodológica de la sustentabilidad, debe ser capaz de ubicarse en un contexto dinámico, ya que ningún sistema natural permanece estático o constante en el tiempo. Además debe adaptarse a los campos de variación del conocimiento, así como a la percepción y respuestas, de los tomadores de decisiones a la hora al enfrentar problemas ambientales, contextualizándolos dentro de las tres grandes esferas que componen al concepto teórico de la sustentabilidad, las esferas ambientales, económicas y sociales.

⁶ Es una organización de cooperación internacional, compuesta por 34 países, cuyo objetivo es coordinar sus políticas económicas y sociales. Con sede en París Francia.

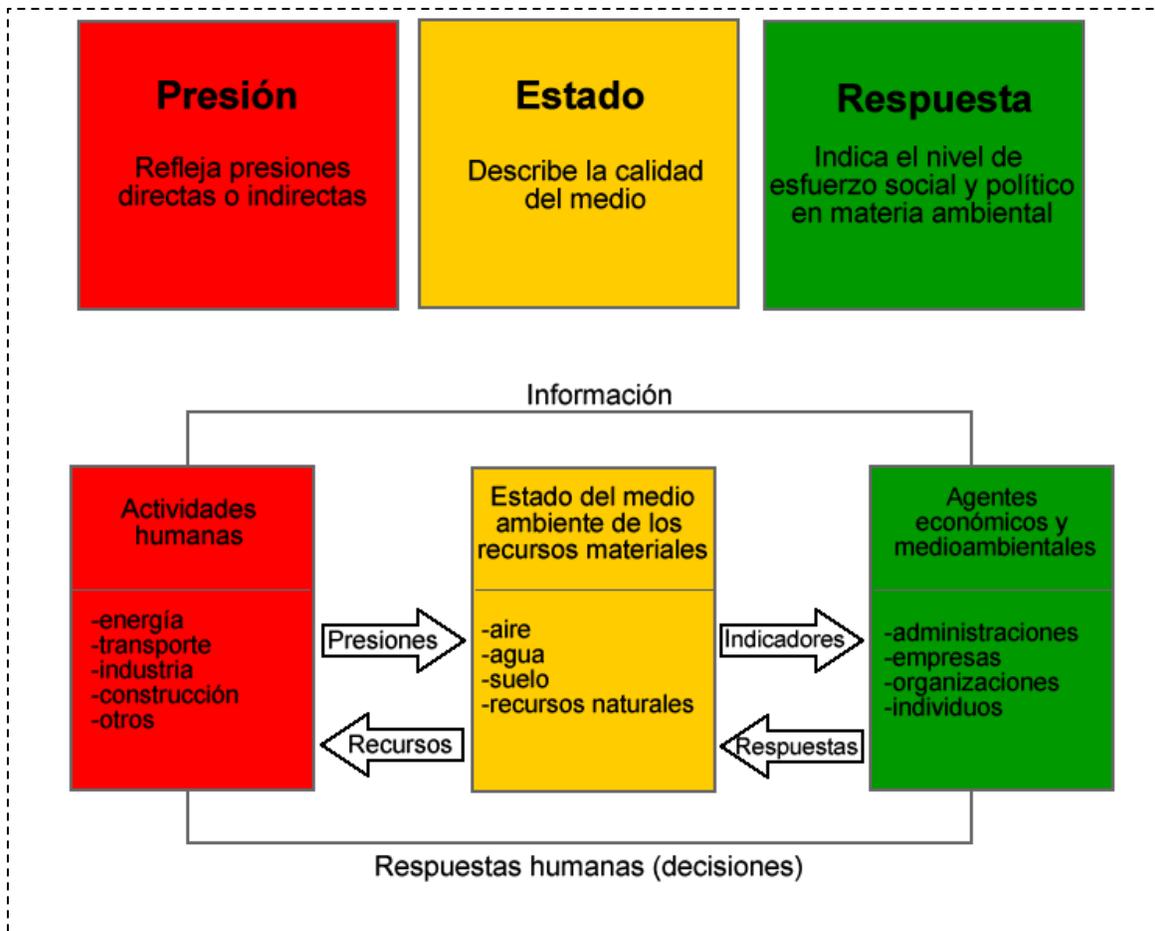


Figura 4. Modelo PER para indicadores (Adaptado de OCDE, 1993).

La carencia de información estadística, de modelos conceptuales consistentes y de medios técnicos, recortan el alcance de medición de los indicadores tanto ambientales como de sustentabilidad, los cuales presentan un dominio desde la perspectiva económica-social en los mismos indicadores ambientales, lo que hace que éstos no resulten adecuados para reflejar la evolución del medio físico, y se pasa de una posición determinante de la esfera ambiental a otra subordinada y además subjetiva (Bermejo, 2002; Ramírez, 2002).

Los modelos matemáticos de los ecosistemas ignoran casi siempre el espacio, lo cual no es reflejo de una realidad ya que todo ecosistema ocupa un lugar en el espacio y posee capacidad de interacción entre sus elementos y sus alrededores, en función de sus posiciones relativas (Margalef, 1982). La observación hecha por Margalef mantiene una vigencia actual, lo cual ha acarreado que tanto los indicadores medioambientales como de sustentabilidad sean tratados con frecuencia de forma anespacial⁷. Sin embargo, en los últimos años, los avances en los sistemas de información geográfica y teledetección han servido para corregir este problema, con lo cual la

⁷ Que no posee una referencia geográfica o espacial.

mejora de los indicadores de sustentabilidad ha sido notable; sobre todo en aquellos indicadores ambientales.

El modelo PER, presenta la limitación de no considerar la existencia de causalidades bidireccionales ni de respuestas involuntarias de los sistemas naturales, sociales y económicos (Spangenberg, 1998). Es pues, un sistema antropocéntrico, que tiende a subvalorar los mecanismos de autorregulación de los sistemas que componen el entorno natural.

Por su parte los geoindicadores fueron propuestos a mediados de los noventa por un grupo de trabajo *Commission on Geological Sciences for Environmental Planning* (COGEOENVIRONMENT), perteneciente a la *International Union of Geological Sciences (IUGS)*, cuyos resultados fueron presentados gracias a la edición posterior realizada por A.R. Berger y W.J. Iams en su obra *“Geoindicators: Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems”*, contando con veinte y siete parámetros o geoindicadores, los cuales son capaces de describir cambios importantes, frecuentes y a una escala de tiempo no superior a cien años; por medio de parámetros simples, referidos a tasas de cambio mayoritariamente en la sección transversal del cauce del río a una escala ideal para su implementación en un programa de monitoreo de carácter administrativo para dependencias gubernamentales por ejemplo; pero de poca utilidad para evaluar el estado, y posibles escenarios debido a presiones de origen natural o antropogénico sobre el sistema fluvial a estudiar.

2.2 DISEÑO DE INDICADORES

2.2.1 principios básicos

Todo indicador debe contextualizarse en un sistema espacial escalable y medible. Los valores que toman los indicadores han de estudiarse en relación con la forma en que éstos varían en el espacio y tiempo. La escala temporal elegida ha de adecuarse a nuestros propósitos y capacidad de medición. La sensibilidad del indicador, debe ser tal que no pasen inadvertidas las perturbaciones para periodos de tiempo cortos, mismos que consideran los geoindicadores.

El sistema de indicadores, deben asegurar la comparación entre los indicadores que lo conforman. Para ello, se debe cuidar la escalabilidad matemática, de manera tal que las variables guarden entre sí, relaciones que permitan la interpretación cuantitativa y cualitativa de los resultados a través de operaciones matemáticas (Hardi y Zdan, 1997).

2.2.1.1 Escala (espacio-temporal)

Cualquier estudio que se realice por medio de indicadores, debe partir desde un enfoque multiescalar, ya que la decisión de escala, extensión y resolución dictan de forma crítica los patrones del comportamiento en el sistema de estudio (Gibson et al., 2000). La compatibilidad escalar, será posible siempre y cuando tengamos en cuenta que nuestro sistema, se basa en la apreciación global del mismo, y no en el estudio aislado de sus partes.

Por lo cual, es importante que tanto la propiedad de espacio y tiempo posean una escala que permita su comparación, medición y sensibilidad; parámetros que permiten la interpretación cuantitativa y cualitativa de los geoindicadores y que componen los principios rectores del diseño y operación de cualquier indicador, incluyendo a los geoindicadores. Además de estos principios, universalmente aceptados (conocidos como principios de Bellagio), se propone incluir la objetividad como fundamental para una interpretación acertiva sobre lo que está sucediendo en el sistema fluvial.

2.3 CLIMA Y SU EFECTO EN EL TERRENO

La escorrentía es un proceso dependiente de la precipitación total anual. El incremento de la escorrentía influye en la erosión del canal hasta que los canales del río se reestablecen a nuevas condiciones de equilibrio. En este sentido, los canales del río ajustan continuamente su morfología en respuesta a ambos del régimen hidrológico y de la carga de sedimentos impuesta por las condiciones del drenaje de la cuenca (Bogen, 2006; Peizhen et al., 2001). Se ha documentado un incremento en la tasa de sedimentación en los sistemas fluviales a nivel mundial en los últimos 2 millones de años. Esta observación se ha dado en una variedad de ambientes fluviales tanto en sistemas orogénicos activos como inactivos y se ha atribuido principalmente a variaciones en las condiciones climáticas resultando en la respuesta morfométrica de los sistemas fluviales a los cambios frecuentes y abruptos de temperatura, precipitación y vegetación (Peizhen et al., 2001).

Cambios del 25% en la precipitación, conlleva a un cambio de un 50% en la escorrentía, lo cual muestra la sensibilidad del caudal a los cambios de precipitación. Si cambiamos una unidad en la precipitación o en un 10%, el efecto en la escorrentía se hará manifiesto en 10 unidades de cambio o en un 45% su configuración. A esto podemos agregar, que la precipitación en zonas áridas muestra mayor variabilidad comparado con la de los climas húmedos (Leopold, 1959; Gordon y Famiglietti, 2004).

Las **variables morfológicas independientes** ajustan su respuesta en función de la interacción con variables que controlan aspectos independientes tanto hidrológicos como sedimentológicos de la cuenca. Las principales variables independientes son la energía de la corriente, el tamaño del sedimento junto con las características de su distribución y la forma de las partículas clasificadas por su tamaño como gravas, ya que estas variables reflejan la energía de la corriente y las propiedades del sedimento. Las variables independientes son las que configuran el transporte de sedimentos, por tanto son las que dan forma a los canales del sistema fluvial. Por otra parte, las **variables morfológicas dependientes** son las referidas tanto a la geometría del canal como en la de toda la cuenca. Los patrones de drenaje son resultado de los procesos relacionados a la estructura y litología que se encuentran como basamento en el área de estudio, mismos que pueden ser tomados como patrones geométricos para su estudio, en conjunto con las propiedades litológicas y climáticas con respecto al espacio y tiempo.

2.3.1 Textura y patrones de drenaje

El patrón de drenaje de una cuenca es el arreglo general de los canales de sus tributarios, los cuales reflejan la influencia de factores como la pendiente inicial, litología, controles estructurales, así como los antecedentes geomorfológicos y geológicos recientes de la cuenca.

La clasificación de los patrones de drenaje más habituales se muestra en la Figura 5.

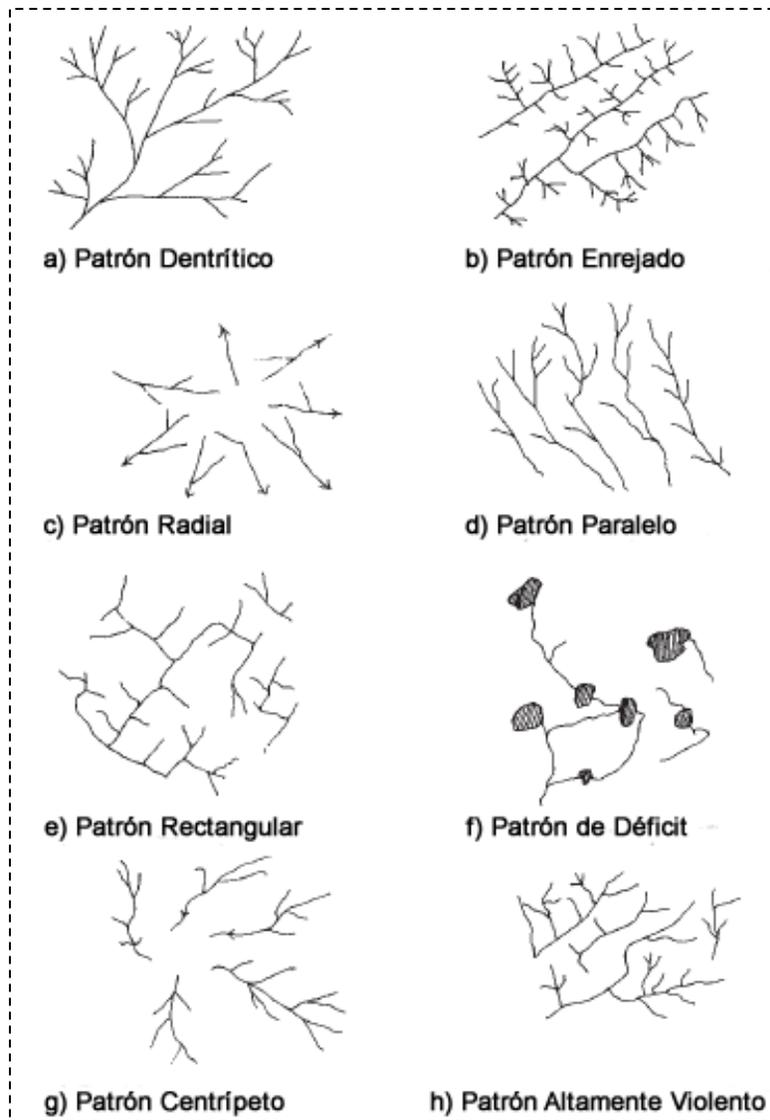


Figura 5. Distintos tipos de drenaje: (a) *Patrón dendrítico*, patrón de drenaje más común, caracterizado por bifurcaciones irregulares de sus tributarios en diversas direcciones formando entre ellas, generalmente ángulos menores a 90° . Estos patrones se desarrollan sobre rocas de resistencia uniforme, los cuales indican una carencia de control estructural, localizado en casi todos los horizontes de rocas sedimentarias o en áreas con cantidades mayoritarias de rocas ígneas. (b) *Patrón Enrejado*, sistema de corrientes sub-paralelas, usualmente sobre las fallas de la formación de rocas o entre rasgos topográficos paralelos recientemente depositados por el viento, agua o hielo. (c) *Patrón Radial*, este tipo de patrón es encontrado en los flancos de los domos o volcanes y otros varios tipos de colinas de forma cónica o sub-cónica. (d) *Patrón Paralelo*, se localiza en regiones con pendientes pronunciadas o con fuertes controles estructurales que marcan un espaciado regular y paralelo entre los canales. (e) *Patrón Rectangular*, las corrientes tributarias forman en relación a las corrientes de mayor orden patrones de conexión en ángulos rectos, los cuales se encuentran de manera común en áreas donde se interceptan estructuras en ángulos perpendiculares. (f) *Patrón de Déficit*, estos indican una

completa carencia de control estructural o litológico; este patrón ocurre generalmente asociado a cuencas⁸ irregulares que aportan o parten de lagos y pantanos, los cuales son pocos y de muy poca longitud. (g) *Patrón Centrípeto*, en este patrón las corrientes convergen en una depresión central. (h) *Patrón altamente violento*, este patrón es característico de áreas con una geología compleja; es decir, son el resultado de las diferencias litológicas, pendientes regionales, la presencia de fallas y estructuras, y una marcada actividad geológica. (Modificado de Garde, 2006).

2.3.1.1 Orden de corriente

El análisis morfológico de los sistemas fluviales facilita la comparación entre distintos sistemas fluviales o cuencas hidrológicas, con la finalidad de obtener relaciones entre los distintos aspectos que describen los patrones de drenaje, y para definir ciertas propiedades significativas útiles para entender el funcionamiento de las mismas en relación a su entorno.

Los estudios morfométricos en las cuencas hidrográficas realizadas por Horton (1945), Strahler (1952), Rzhnitsyn (1960) y otros, demuestran que los parámetros relevantes en la configuración morfométrica de las cuencas, se componen por rasgos como los patrones de drenaje, pendientes y relieve, mismos que constituyen los parámetros de estado estacionario en el sistema fluvial; los cuales controlan la cantidad de sedimentos y del flujo en tránsito de los mismos.

2.3.2 Forma de cuenca

La forma que poseen los canales depende de la interacción entre el flujo y los materiales erosionables en el límite del canal. Dichas interacciones varían considerablemente para distintas escalas tanto temporales como espaciales. La forma de la cuenca afecta a las características hidrológicas de la misma.

2.3.3 Litología

Tanto la litología como la estructura de las rocas que componen las cuencas, poseen un papel de primera importancia, ya que determinan las características de erosión, entre otras. Además, la naturaleza y tipo de vegetación es parcialmente controlada por el tipo de roca. Por tanto la razón de la carga de sedimentos y la descarga de agua dependen del tipo de roca.

⁸ El término de cuenta se refiere a las corrientes de primer orden o grado, es decir aquellas a las cuales no se les une ninguna corriente.

2.3.4 Densidad de drenaje y frecuencia de corrientes

Se sugiere el empleo de una escala que defina la densidad de drenaje, ya que es poco práctico y ambiguo el uso de términos relativos para expresar la densidad de drenaje, como lo serían los términos bajo, medio y alto.

Las cuencas son entidades bien diferenciadas topográfica e hidrológicamente, las cuales poseen una densidad de drenaje acorde, o como reflejo de los controles geomorfológicos, litológicos, climáticos, vegetativos y antropogénicas. La densidad de drenaje consiste en la medida acumulativa de la longitud de todas las pequeñas corrientes (tributarias) aunadas a las corrientes mayores mostradas en el drenaje de la cuenca.

La densidad de drenaje no varía generalmente con el orden de corriente entre distintas cuencas. Sin embargo, Morisawa (1968) señala que la densidad de drenaje de toda la cuenca tiende a aproximarse a la media de la densidad del drenaje de primer orden; ya que son las cuencas las que aportan la mayor parte de la longitud total del drenaje del sistema fluvial en la matemática para calcular la densidad.

2.3.5 Aspectos del relieve

El relieve puede ser expresado como una *tasa de relieve* R_h , la cual expresa la razón del máximo y mínimo relieve contra la distancia máxima a horizontal, la cual suele ser una línea paralela a la corriente principal (Schumm, 1956). Melton (1958) define el relieve relativo como el máximo valor del relieve o altura máxima A_m dividido por el perímetro de la cuenca P_c . Otra serie de parámetros adimensionales fueron introducidos por Strahler (1957), como lo son:

- El **número de rugosidad** que representa el producto del valor máximo de A_m y la densidad de drenaje D_d .
- El **número de geometría** definido como $(A_m D_d / S)$ donde S es el valor de la pendiente de la base de la cuenca.

2.3.6 Curvas hipsométricas

Anderson y Anderson (2010), definen las curvas hipsométricas como la distribución estadística de la topografía representada en forma de integral. Esta se refiere a la superficie de área como una función de la elevación, dicho de otra forma, la integral del área con respecto a la elevación, comenzando con la elevación más baja registrada (Figura 6).

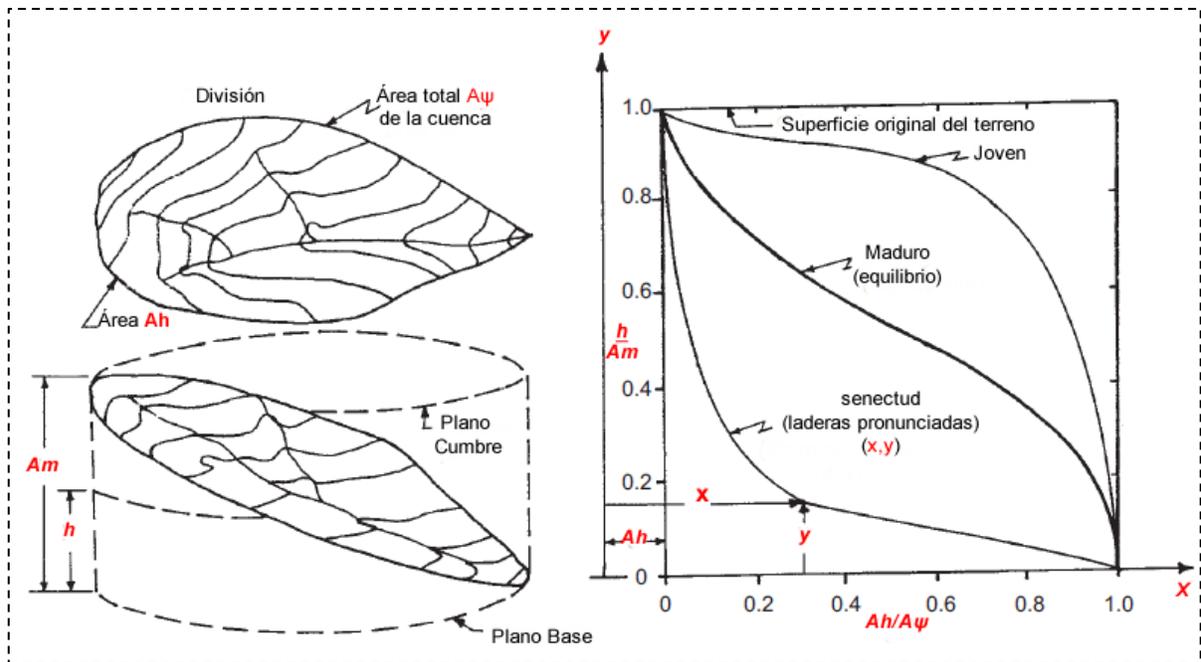


Figura 6. Representación gráfica de la curva hipsométrica; z se refiere al exponente que representa el grado de madurez de la topografía, el cual crece de forma directamente proporcional a la "edad". (Modificado de Garde,2006).

En la Figura 6 se puede observar las distintas etapas topográficas en el desarrollo de un sistema fluvial. Las curvas hipsométricas se encuentran estrechamente relacionadas con las características hidrológicas del sistema fluvial de la cuenca. Lo cual explica que la distribución de la elevación en el drenaje de la cuenca se relaciona con la cantidad de flujo disponible (almacenado), que a su vez controla la suavidad de las curvas hidrográficas, el tiempo de respuesta y los picos de caudal máximo o incluso extraordinario.

2.3.7 Evolución de los patrones de drenaje

La pendiente del canal decrece de manera exponencial en relación con el orden de corriente; es decir, los canales de mayor orden poseen gradientes más planos. En cuencas similares a la misma distancia entre sus divisorias y el canal principal, el gradiente de canal de las corrientes será igual, incluso con la variabilidad esperada a través de la configuración natural del drenaje (Hack, 1957). Por tanto, si en una área de litología uniforme dos canales de corriente adyacentes son creados a la misma elevación, y éstos poseen distinta longitud, el más largo de ellos tenderá hacia elevaciones más bajas, aún en el mismo corte trasversal. La Figura 7 ilustra el fenómeno anteriormente descrito.

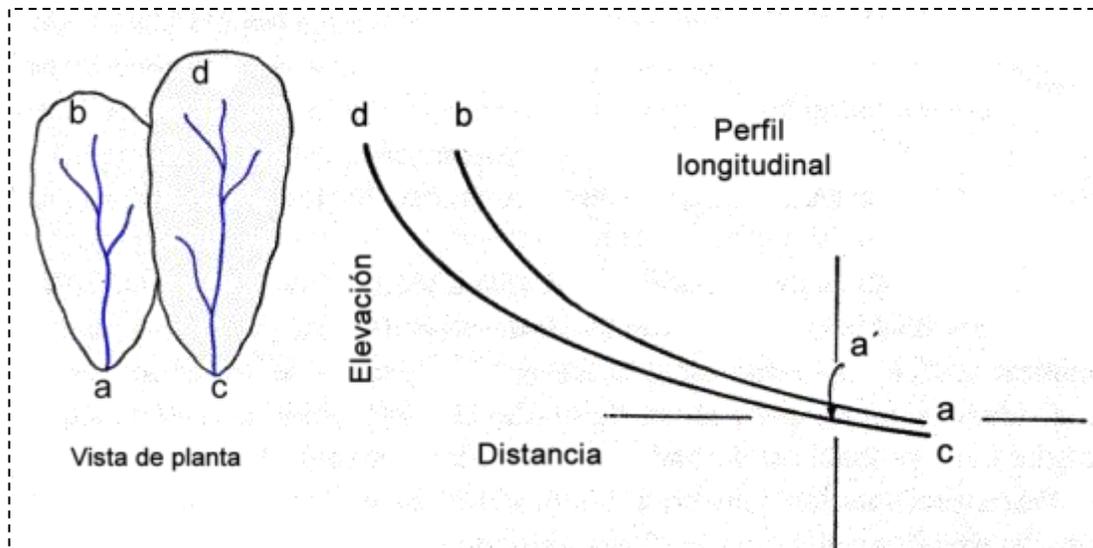


Figura 7. Demostración gráfica del comportamiento de la elevación-distancia en la creación o evolución del perfil longitudinal de los cauces del río o escorrentía. (Modificado de Luna, 1964).

Las corrientes **ab** y **cd** son comparables excepto en longitud y por tanto en el área de drenaje. Los perfiles longitudinales son exactamente iguales ($da' = ba$) si son originados a la misma elevación. Pero debido a que **cd** es más largo que **ab**, **c** tiende a una elevación menor que **a**. Si por alguna razón, la división entre ambas corrientes fuese retirada (erosionada), el agua fluiría desde el canal de captación más pequeño hacia el más grande, y la corriente más larga terminará capturando el área de drenaje de la corriente más pequeña.

Todo lo descrito anteriormente nos lleva a pensar que la red de drenaje puede ser construida o desarrollada aplicando dos principios:

1. Cuando el potencial de erosión excede la resistencia a la erosión, un nuevo canal será formado o si éste ya existe, será extendido.
2. Asumiendo que la erosión es una función del ángulo y la longitud de pendiente, el argumento general acerca de la contribución por cuentas descansa en el desarrollo de una red de drenaje en la cual, por lo menos cualitativamente, la porción geométrica respeta las propiedades geométricas del drenaje natural de la cuenca (Horton, 1945).

Por tanto, al ir cambiando la escala, también cambiará el número de canales y su longitud de forma proporcional. La longitud de una cuenca se incrementa de alguna forma más rápidamente que su anchura promedio, de ahí que las cuencas posean esa forma tan peculiar alargada conforme a su evolución.

2.4 PRESIÓN ANTRÓPICA

En la actualidad el impacto producido por los seres humanos y sus actividades modifica el medio natural. Por ejemplo la agricultura ha modificado los ecosistemas terrestres con la introducción de especies, cambios en usos de suelo (Vitousek *et al.*, 1997). Como consecuencia, los procesos geomorfológicos también se han visto acelerados debido a la erosión del suelo y las diversas actividades que impactan los sistemas fluviales (Collier *et al.*, 1996; Graf, 1999; Magilligan *et al.*, 2003; Magilligan y Nislow, 2005).

La construcción de presas altera dramáticamente los procesos fundamentales en la regulación de magnitudes, tasas de agua, sedimento, y aporte de nutrientes en las cuencas (Vitousek *et al.*, 1997; Jackson *et al.*, 2001). También se ven alterados los patrones hidrogeomorfológicos de los sistemas fluviales, a escalas tanto regionales como continentales (Figura 8).

Las presas representan una fuente puntual de alteración del flujo y transferencia de materiales (sedimentos) (Poff y Hart, 2002). Estas estructuras provocan una larga lista de efectos en la configuración de flujos, regímenes de sedimentación, condiciones que pueden ser escaladas en proporción con el tamaño de la presa y/o embalse (lo cual determina el tiempo de retención hidráulica) relativo a la corriente (Poff y Hart, 2002).

Sin embargo, apenas en los últimos años se le ha dado importancia a las configuraciones del flujo, lo cual ha sido reconocido como un tema principal para la administración de las presas (Stanford *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 2003; Bunn y Arthington, 2002; Richter *et al.*, 2003).

Las presas, generalmente reducen la variabilidad del flujo y estabilizan los regímenes de los mismos. Sin embargo, algunas presas o embalses pueden incrementar la variación del flujo de forma parcial, particularmente aquellas que almacenan agua con fines de generación eléctrica, las cuales modifican el flujo aguas debajo de la presa de forma casi instantánea en respuesta de la demanda eléctrica en horas pico o bajo condiciones extraordinarias de demanda. Vörösmarty *et al.*, (2003) reportan que de $4-5 \times 10^9$ toneladas de material erosionado el 30% del flujo particulado es actualmente acumulado detrás de los reservorios; Poff *et al.*, (2003) estima que cerca del 60% de las pérdidas de los suelos provenientes de campos de cultivo es depositado en las colinas adyacentes, en planicies de inundación y detrás de las presas, en las corrientes que conducen a éstas.

2.4.1 Respuestas morfológicas y sedimentológicas en las corrientes debido al impacto humano

La Tabla 3 ilustra los mayores tipos de influencia, directos e indirectos, además da un ejemplo de la magnitud de dichas influencias. Este amplio rango de causas que provocan cambios en los canales, están interrelacionados de tal forma que la diversidad de efectos varía en función de la

magnitud y frecuencia con las que éstos se presentan; a pesar de que la mayoría de los cambios que se han reportado están relacionados con los cambios en la capacidad del canal o en la sección transversal del mismo (Gregory, 1987).

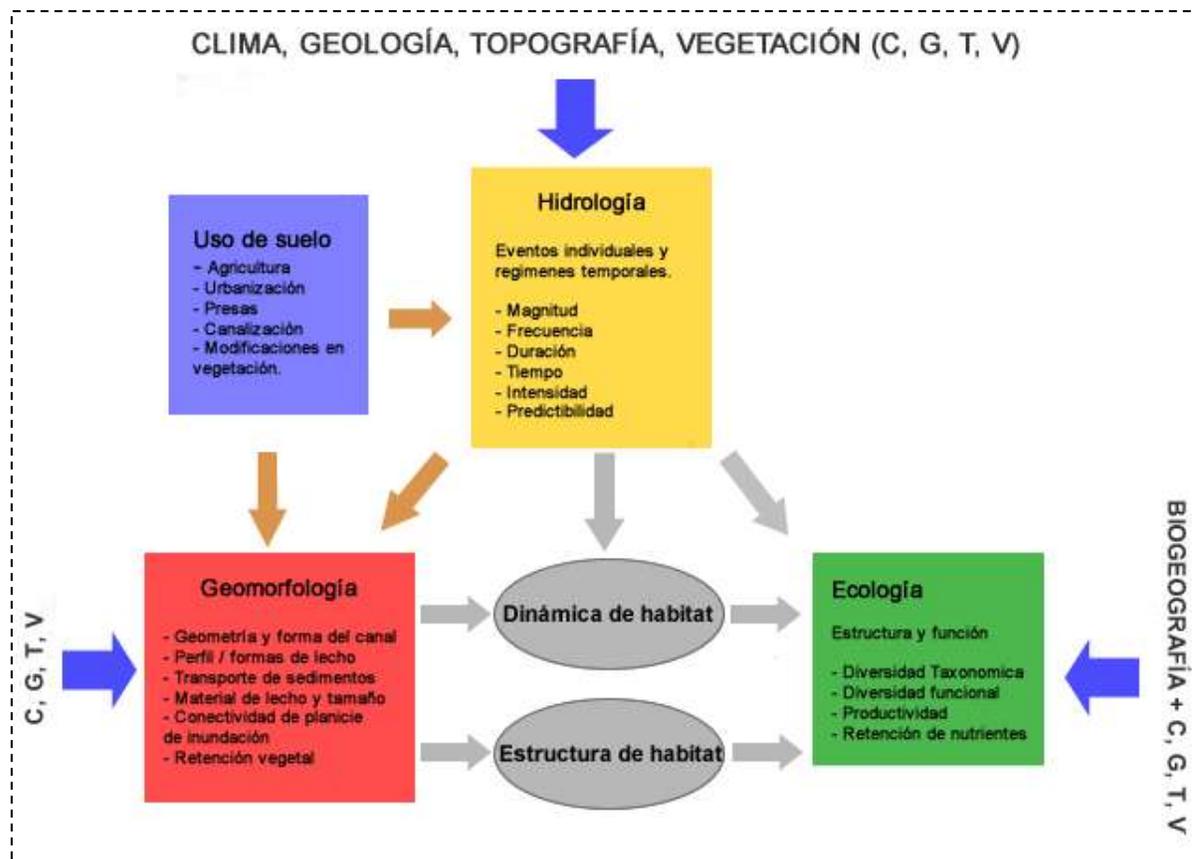


Figura 8. Ilustración conceptual de las relaciones existentes entre la hidrología, geomorfología, ecología y las corrientes de los ríos en los sistemas fluviales, y como las presiones humanas, como el uso de suelo modifica los procesos hidrológicos y geomorfológicos, los cuales inducen a distintas respuestas ecológicas. (Digitalización de Poff et al., 2006).

Tabla 3. Muestra las diversas causas y variables que afectan a los sistemas fluviales, utilizando como geoindicador principal los canales de corriente. La descarga es representada con la letra **H**, donde los incrementos de flujo son designados por **H+**, y el decremento del mismo por **H-**. De forma similar, el transporte de sedimentos, representa su incremento con **L+** y su decremento con **L-**. (Gregory, 2006)

Qué causa el cambio	Procesos: Hidrológico (H), Sedimentario (L).	Que puede cambiar	
		Canal de corriente	
Canal		Ajuste local	Ajuste espacialmente extensivo
Sección transversal del canal			
Construcción de presa	H- L- luego S+	Erosión aguas abajo de la cortina	Aguas abajo la corriente puede haber reducido la capacidad de canal sin embargo estas puede funcionar como una trampa para los sedimentos.
Derivación de flujo	H-	Denudación después de la derivación, posible	No aplica

		erosión cerca del lugar donde el drenaje regresa al canal.	
Flujo de retorno, drenajes y desembocaduras	H+		No aplica
Cruce de puente	H+	Erosión alrededor de los pilares	No aplica
Desagües bajo caminos y carreteras	H+	Erosión al final de la corriente que desemboca.	No aplica
Alcance de canal			
Limpieza de detritos y vegetación del canal.	L+	El transporte de sedimentos incrementa y puede presentar una aceleración en la erosión.	No aplica
Pastoreo	L+	Posible erosión localizada en el talud y canal	No aplica
Construcción de embalse y dique	H+		Posibles efectos aguas abajo.
Canalización	H+ L+		El incremento de la velocidad del flujo, puede conducir a efectos aguas abajo. Posible recesión de la pendiente aguas arriba de la canalización.
Desmonte de la vegetación ribereña	L+	Posible erosión localizada en el talud y canal	No aplica
Remoción de sedimentos, extracción de material del lecho	L+	Ajustes localizados en el canal	Transferencia de sedimentos aguas abajo o posible afectación de la morfología del canal debido a la erosión.
Adición de sedimentos	L+	Posible sedimentación localizada	Puede ocurrir una sedimentación aguas abajo y como también aguas arriba.
Invasión de especies vegetales exóticas	L-	Posible estabilización de secciones del canal y talud	Puede reducir la transferencia de sedimentos aguas abajo.
Reforestación	L- pero puede incrementar por segmentos	Posible disminución progresiva de la capacidad del canal, pero depende de la administración de la red de drenaje asociado a éste.	
Medidas de conservación	H- L-	Posible disminución progresiva de la capacidad del canal, pero depende de la administración de la red de drenaje asociado a éste.	
Restauración y técnicas similares	H- L-	Diseño de las características del canal	Reducción de la erosión, y depósito aguas abajo.
Red de drenaje de la cuenca			
Esquema de drenaje	H+	Posible ajuste en canal de donde el flujo ha sido extraído	No aplica
Drenaje con fines de agricultura	H+	Posibles efectos localizados donde el drenaje desemboca en el canal.	No aplica
Redes de irrigación	H-	Posible ajuste en el canal donde el flujo es extraído	Si se tienen diversas ubicaciones donde el flujo es extraído, puede conducir a efectos notables.
Zanja	H-	Posible ajuste en el	No aplica

		canal, como resultado del flujo extraído	
Drenaje de escorrentía	H+	Posible erosión alrededor del área de descarga	Si se tienen numerosos desemboques se puede ver incrementado los picos de flujo, induciendo la erosión aguas abajo.
Espacial			
Deforestación	H+ L+		El desarrollo de una cárcava puede ocurrir debido a la recesión de la pendiente aguas arriba. Mientras que aguas abajo puede cambiar el canal y también puede incrementar su capacidad dependiendo de su disponibilidad de recepción de sedimentos.
Pastoreo	L+	Efectos locales por degradación de margen del canal	No aplica
Fuego, incendio	H+ L+	El canal cambia después de eventos relacionados con fuego.	No aplica
Agricultura y arado	H+ L+	Efectos localizados donde se unen las corrientes tributarias	No aplica
Medidas de conservación, sobre el uso de suelos	H- L-	Disminución progresiva de la capacidad del canal, pero depende del manejo de la red de drenaje asociado a este.	
Construcción de edificios	L+	Afectación al canal debido a las grandes cargas locales de sedimento	El drenaje temporal complementa la red de drenaje.

La Figura 9 muestra los posibles escenarios que resultan del cambio de magnitud y sentido de las variables relacionadas con el uso del suelo, dentro de un sistema fluvial o cuenca hidrológica. Esta es más fácil de entender si se parte del concepto de Estado (dentro del modelo PER), en el cual, el uso que se le da al suelo representa esta variable del modelo y muestra todas las conexiones que lo configuran dentro del sistema fluvial; una visión distinta pero similar en cuanto a la forma de conectar el sistema resulta si se presenta el uso del suelo como la variable de Respuesta, sin embargo es difícil describirlo porque existen muchas más variables que son impactadas que aquellas que podemos controlar o presionar.

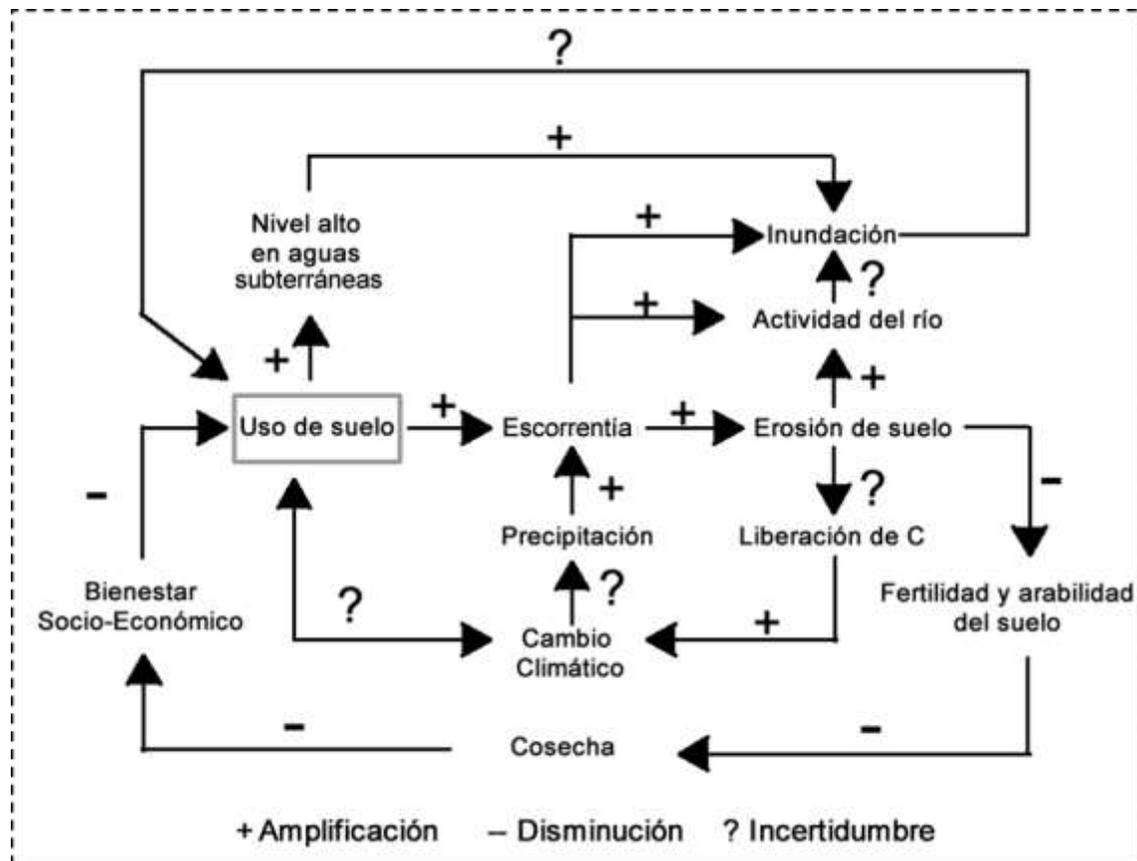


Figura 9. Las interacciones de las presiones humanas impactan tanto positiva como negativamente al sistema de estudio. Según sea la dinámica desarrollada en el uso del suelo tendrá una repercusión en las tasas de erosión del suelo. La intensificación del uso de suelo puede conducir a una amplificación de los mecanismos de respuesta. (Dotterweich, 2008).

2.5 PRESAS Y MORFOLOGÍA

2.5.1 Estudio de la transformación del canal

El primer punto a considerar en la predicción del cambio del canal, es el referente al balance de masa de sedimentos que fluye o se transporta por el sistema y sus alrededores. Generalmente, para cumplir con este fin, se sub-divide el sistema en secciones, con la finalidad de caracterizar o señalar una deficiencia, aumento o equilibrio, de forma localizada.

La importancia de lo anterior se debe a que el “desbalance” en la carga de sedimentos de un canal, provoca cambios o transformaciones considerables, por lo que la alteración en la concentración de los sedimentos o carga suspendida, puede ser considerada como la primera extensión de la degradación (Stevaux *et al.*, 2009).

La certeza o incertidumbre a la hora de realizar los balances de masa es muy variable y, depende en gran medida de la configuración del drenaje de la cuenca, es decir, el grado de jerarquías que describan el drenaje, su densidad y por supuesto, de cómo esté configurado o segmentado el sistema para su estudio. Por tanto, se entiende que algunas partes del canal pueden ser más o menos susceptibles para ciertas variables, como podría ser la anchura del canal y la elevación del lecho, es decir, las tasas y magnitudes de los cambios en una parte del canal, no son necesariamente representativos de la magnitud y tasas de cambio para otras partes del canal.

A finales de 1970 (Petts y Gurnell, 2005) se había establecido un modelo bastante complejo de los ajustes del canal frente a los distintos estímulos que pudieran ocurrir, o por lo menos los conocidos hasta entonces, entre los que se incluye la elaboración y operación de una presa. Este modelo incluye diferentes etapas finales, consecuencia de las distintas combinaciones de cambio en el régimen de flujo y carga de sedimentos (Figura 10), y las distintas tasas y secuencias temporales de cambio (Figura 11).

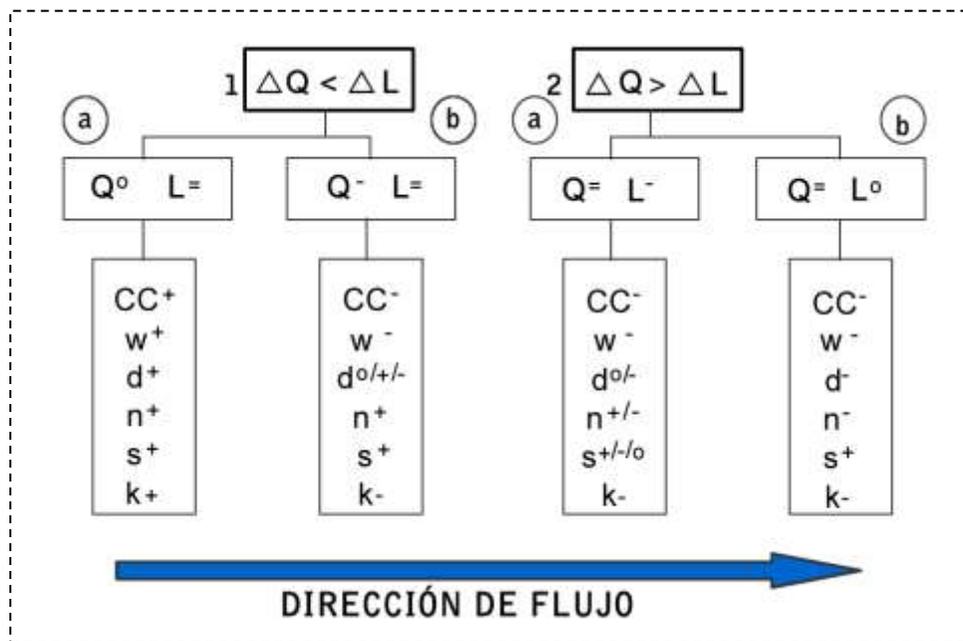


Figura 10. Escenarios de ajustes en el canal aguas abajo de la cortina de la presa, como respuesta a los cambios relativos a: el caudal o gasto (**Q**) y carga de sedimentos (**L**). Donde los cambios en el canal están dominados en **1** por la reducción en **L**, mientras que en **2** existe una regulación de **Q**. Las condiciones extremas se presentan en los escenarios **1a** y **2b**, de la secuencia normal de cambios en el canal: **1a-1b-2a-2b**, la cual se presenta u ocurre hipotéticamente aguas abajo de la cortina de la presa. Es importante hacer notar que la velocidad de las transformaciones son dependientes y directamente proporcionales a la velocidad de corriente y a los gradientes que presionen en la modificación y esculpido del sistema fluvial, mientras que la magnitud de los efectos y/o reacciones decrecen inversamente con el transcurrir normal del flujo de la corriente, es decir, el impacto de la presión ejercida por una presa decrece aguas debajo de la cortina del embalse para un sistema fluvial. Los superíndices indican la magnitud del cambio: (**o**) significa que no hay cambio, (**+**) incremento, (**-**) disminución y, (**=**) una disminución mayor. Las variables morfológicas son: (**Cc**) capacidad de canal, (**W**) anchura del canal, (**d**) profundidad del canal, (**n**) rugosidad, (**S**) pendiente y (**K**) transporte de material. (Modificado de Schumm, 1969; Petts y Gurnell, 2005).

La Figura 10, está compuesta por cuatro escenarios, los cuales se adaptan a la observación empírica del trabajo desarrollado por Schumm (1969) en diversas cuencas de los Estados Unidos de América. La Tabla 4 recoge la descripción de los escenarios. La secuencia de cambios (**1a-1b-2a-2b**) puede ser encontrada aguas abajo a lo largo de un río o corriente regulada con una secuencia **reiniciada**⁹, como ocurre por ejemplo: cuando una corriente posee sedimentos fácilmente erosionables (**2b-1a-1b-2a-2b**). Debajo de las confluencias de las corrientes tributarias, se pueden apreciar cambios locales, mismos que pueden seguir la siguiente secuencia 1b-2b-2a-1b.

Tabla 4. Descripción de los escenarios que se presentan al presionar un sistema fluvial con el desarrollo de una presa (a partir de Petts y Gurnell, 2005).

Escenario	Condición y/o modificación	Efecto
1	Muestra los efectos de reservorios en ríos con gran cantidad de carga de sedimentos.	Estos reservorios poseen un impacto pequeño sobre las inundaciones, la vegetación ribereña muestra un crecimiento mínimo.
1a Condiciones extremas	Ocurre en el lecho, cuando el agua está libre de sedimentos, ésta produce una degradación.	La mayoría de las presas impactan de esta forma, los cambios son más dramáticos en los meandros, lechos rocosos y canales.
1b	La pendiente puede verse disminuida por la degradación. Lo que produce canales con dimensiones reducidas.	Aunque ocurre una disminución de pendiente, los efectos de la sedimentación lateral son apreciables, lo cual da pauta a la construcción de nuevas planicies de inundación a elevaciones más bajas que las ya formadas.
2	Muestra los impactos de las presas sobre los ríos, cuando se reduce la carga de sedimentos o cuando la regulación del flujo es extrema.	El ajuste del canal está caracterizado por la reducción en la sección transversal del canal (ancho) y por tanto la capacidad del mismo.
2a	Existe una reducción en la carga de sedimentos, que acompaña a la regulación extrema del flujo.	La capacidad del canal se ve reducida, lo cual se ve acompañado de un estrechamiento y un posible depósito de sedimentos en el lecho lo cual puede afectar la pendiente y rugosidad del mismo, con lo que finalmente, el transporte se ve reducido.
2b Condiciones extremas	La regulación del flujo extrema, no es acompañada de cambio alguno en la carga de sedimentos, lo cual rara veces ocurre en la naturaleza, no sin ocurrir antes el escenario 2a.	Existe un cambio negativo o de reducción en la capacidad del canal, ancho, profundidad, rugosidad y transporte, excepto para la pendiente del lecho, el cual aumenta. Lo que indica finalmente que se ha alcanzado un estado de cuasi-equilibrio con el nuevo nivel "base".

Debe tomarse en cuenta casos excepcionales en los que la inclusión de una presa en un sistema fluvial no modifica sus regímenes de erosión, tal como ocurre en corrientes con lechos de sedimentos muy gruesos, cohesivos o con una vasta población de vegetación ribereña (Petts y Gurnell, 2005). Siendo el único cambio aparente el referente a la reducción del nivel máximo

⁹ En este trabajo se entiende como secuencia reiniciada, a aquel sistema fluvial que acaba de sufrir un evento extraordinario que borre los rasgos de trabajo del flujo normal del mismo.

normal de las aguas de la corriente. En estos casos, se necesita de una avenida extraordinaria para que se lleve a cabo un cambio o alguna modificación en el canal, debido a la relación erosión-depósito.

Los cambios en los canales se deben a distintos mecanismos, configuraciones y escalas, por lo que las respuestas de los canales con el tiempo pueden ser simples o complejos (Figura 11). Para abordar esta complejidad o simplicidad en las manifestaciones que presentan los canales, podemos dividir el proceso de respuesta en un tiempo de reacción y en otro de relajación; los cuales deben de reflejar tanto las magnitudes, como las frecuencias de la efectividad aplicada al trabajo geomorfológico de los eventos y, de las condiciones en que ocurren al momento del inicio de su actividad en la presa.

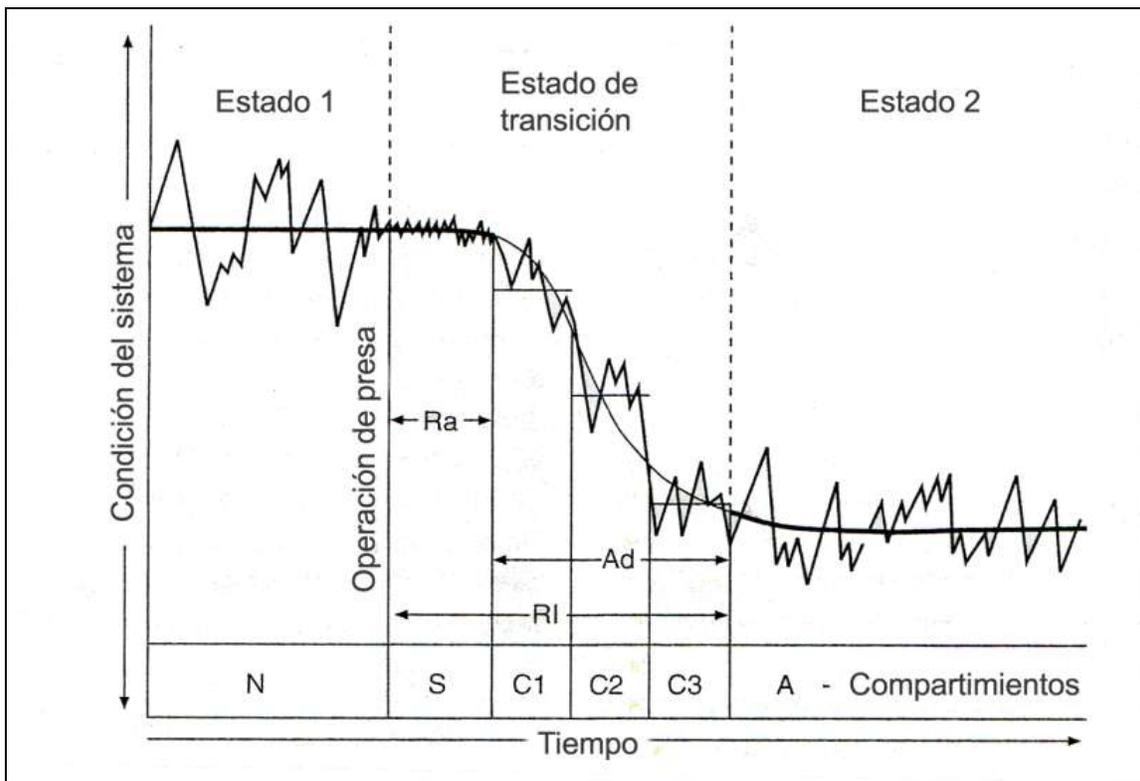


Figura 11. Trayectoria hipotética de la transformación posterior a la construcción de una presa. Los cambios van desde el estado 1 o régimen natural (N) hacia el estado 2 o alterado (A), pasando a través de un periodo de relajación (R1) conformado por una fase de reacción (Ra) y una fase de ajuste (Ad). La fase de relajación comprende además una secuencia de estados o fases transitorias. Las cuales incluyen una fase de acomodo (S), en la cual el control o regulación estricta de la corriente se adapta a su canal original, para entonces comenzar con las fases de cambio en el canal (C1 a C3), en estas fases se regulan las cargas de sedimentos *ad hoc* al gasto y nueva secuencia del flujo. (Petts y Gurnell, 2005).

Generalmente, entre mayor sea la carga de sedimentos, mayor será la velocidad en los procesos morfológicos (Wang *et al.*, 2007). Mientras que la pérdida o interrupción de las inundaciones

máximas anuales, se traduce en la desaceleración en la migración lateral del cauce del río en las llanuras de inundación (Shields *et al.*, 2000).

2.5.2 Regulación del flujo

Petts (1984) demostró que la regulación del flujo de los ríos, que claramente presentan las presas, representa la más grande influencia de interferencia hidrológica hecha por el hombre, influenciando un amplio espectro de las escalas tanto espaciales como temporales.

Estudios recientes (Stevaux *et al.*, 2009) han mostrado un nuevo tipo de proceso erosivo inducido por las presas. El mecanismo erosivo se crea por la oscilación diaria de los niveles de agua, debida a la operación normal de una presa, la cual genera altos gradientes hidráulicos en el nivel del agua subterránea, incrementando la velocidad de flujo del agua superficial que impacta las formas en el cauce del río. Wellmeyer *et al.*, (2005), encontró un patrón inducido por las presas, que muestra que durante los primeros cuatro años de operación existe una tendencia a aumentar el tamaño en la granulometría del material del lecho de manera significativa, y al cabo de cuatro a seis años, se comienzan a depositar gravas de forma discreta pero a distancias considerables, de 25 a 30 km aguas abajo.

2.5.3 El papel de la vegetación ribereña

La mejor forma de explicar el papel que juega la vegetación ribereña en los sistemas fluviales, es quizás por medio de la siguiente figura (Figura 12), la cual muestra las tres posibles trayectorias que sigue un cambio de canal (A, B y C), para corrientes no reguladas y su explicación en la Tabla 5 (Gurnell y Petts, 2002).

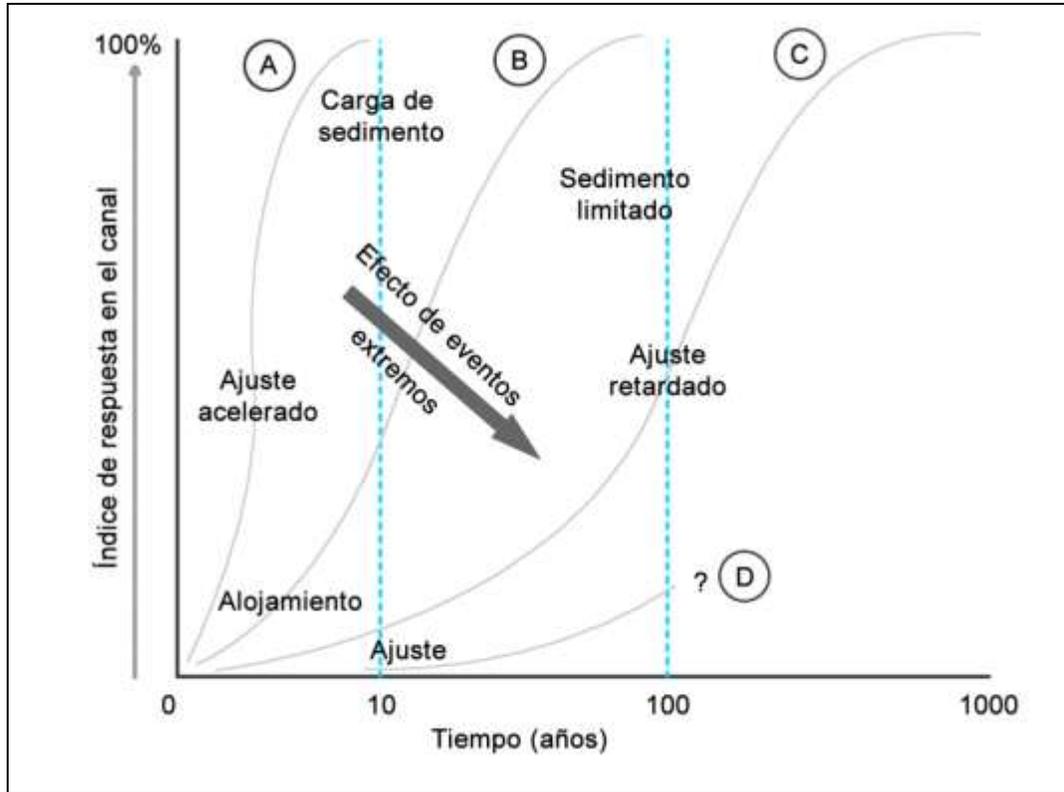


Figura 12. Posibles trayectorias que puede seguir un sistema fluvial para llegar al estado 2 o alcanzar un nuevo cuasi-equilibrio, considerando la intervención de la vegetación riberña. En (A), el sistema fluvial experimenta un cambio rápido debido a la repoblación de la vegetación, la cual encuentra en este tipo de ajuste o trayectoria, las condiciones óptimas o por lo menos suficientes para crecer y poblar el sistema. El papel que juega la vegetación, tiene un efecto directo en los patrones de sedimentación–erosión durante la transformación del canal. En (B), se tiene un contenido considerable de materia orgánica procedente de la vegetación, el cual sirve para atrapar sedimentos y soportar el desarrollo de la vegetación por núcleos o sectores. La trayectoria (C), nos señala que el crecimiento de la vegetación es limitada ya que la baja cantidad o control de sedimentos priva de soporte a las semillas, dispersándolas e incluso removilizándolas una vez germinadas. La ultima trayectoria (D), nos señala cambios extremadamente lentos, por lo cual carecen de interés, por lo menos para ser considerados en los geoindicadores. (Modificado de Gurnell y Petts, 2002).

Tabla 5. Posibles trayectorias de cambio morfológico en un canal, su asociación vegetal y el mecanismo que este sigue (A partir de Petts y Gurnell, 2002).

Trayectoria	Velocidad de cambio	Asociación	Mecanismo
A	rápida	Alta carga de sedimentos y disponibilidad de piezas de vegetación con la capacidad de crecer	Este material vegetal crece rápidamente, debido al soporte de la rápida acumulación de sedimento fino, el cual ofrece protección a las semillas y brotes.
B	media	Baja carga de sedimentos y el material vegetal disponible es bajo o muerto	El material vegetal muerto actúa como una trampa de sedimentos y material orgánico, estimulando el desarrollo de las semillas y brotes.
C	baja	Ausencia de material vegetal y un depósito difuso de sedimentos	El material vegetal crece en densidades bajas y muy lentamente, debido a las condiciones precarias de alimento.

2.6 GEOQUÍMICA: FONDO, ANOMALÍAS Y POSIBLES FUENTES

Los sedimentos pueden actuar como contenedores potenciales o como fuentes de varios contaminantes en los sistemas fluviales (Adams *et al.*, 1992; Christophoridis y Fytianos, 2006) bajo distintas condiciones ambientales.

Los fenómenos de almacenamiento y dispersión de los metales en sedimentos en los sistemas fluviales, pueden vincularse directamente a los procesos de transporte de sedimentos (Walling *et al.*, 2003), tipo de canal y los procesos de sedimentación que se lleven a cabo en la planicie de inundación (Middelkoop, 2000) y regímenes de inundación (Dennis *et al.*, 2003). El 90% de los metales contaminantes en los ríos son transportados en una forma asociada a partículas movilizadas por la corriente del río u otro nivel dentro del sistema fluvial (Martin & Meybeck, 1979).

2.6.1 Dispersión de metales en sedimentos en cuencas hidrológicas

La habilidad para identificar y cuantificar el aporte de metales desde cada fuente(s) es un elemento clave para un manejo efectivo de las cuencas y para el control de la contaminación en el sistema.

Por medio del análisis espectral, es decir, por el estudio de las longitudes de ondas del espectro de luz, utilizando sensores remotos, no posible detectar concentración de metales, sin embargo, se puede determinar los minerales que albergan estos contaminantes (Ferrier, 1999). Existe en la actualidad una librería con más de 1,500 firmas espectrales de minerales, componentes orgánicos y volátiles, vegetación y materiales manufacturados que pueden asociarse con los metales pesados en los sistemas fluviales. Esta librería ha sido desarrollada por la entidad *U.S. Geological Survey (USGS)*.

2.7 EROSIÓN

Aunque la resistencia a la erosión del suelo depende en parte de su posición topográfica, pendiente, litología, clima, etcétera, las propiedades del suelo son sin duda las más importantes. El grado de erosión varía con la textura del suelo, la estabilidad de sus agregados, su capacidad de infiltración, contenido químico y materia orgánica.

Los constituyentes químicos y orgánicos del suelo son importantes debido a su influencia sobre la estabilidad de los agregados. Los suelos con menos de un 3.5% de contenido orgánico, pueden ser considerados como erosionables (Evans 1980). Por otra parte, Voroney *et al.*, (1981) sugiere que el grado de erosión de los suelos disminuye proporcionalmente con el incremento del contenido orgánico de los suelos sobre un rango de 0 – 10 %. Por otra parte, Ekwue (1990) encontró que la disgregación del suelo por el impacto de las gotas de lluvia disminuyen exponencialmente con el incremento del contenido orgánico sobre un rango de 0 – 12%. Un exceso de carbonato de calcio en las fracciones de arcilla y limo del suelo también conducen a una alta erosión (Merzouk y Blake, 1991).

2.7.1 Vegetación

La vegetación o la cubierta vegetal reduce las tasas de erosión del suelo; su efectividad depende de la altura y continuidad de la vegetación. Evidencias experimentales indican que la relación erosión-cubierta no es lineal. Al incrementar la cubierta vegetal desde cero a un valor correspondiente, existe una rápida disminución en la pérdida de suelos. La Tabla 6 muestra la relación erosión-cubierta vegetal generalizada. Este es un esquema de fácil seguimiento por medio de la sensoría remota, lo que le convierte en un geoindicador de gran importancia y significado.

Tabla 6. Relación entre el porcentaje de cubierta vegetal y el porcentaje de reducción en la pérdida de suelos. (Elwell, 1980).

% de cubierta vegetal	100	80	60	40	20	10	5
% de pérdida de suelos	0.5	1.5	5	10	32	60	70

2.7.2 La dinámica del proceso de erosión del suelo

2.7.2.1 Variabilidad temporal y espacial

La variabilidad temporal del clima especialmente de las tormentas, es extremadamente importante para evaluar la tasa de erosión del suelo (Renschler *et al.*, 1999). El total de erosión del suelo puede, en algunos casos, ser dominada por algunos eventos extremos, de ahí que el monitoreo así como algunos estudios de simulación necesiten desarrollarse en períodos considerablemente largos para capturar estos eventos erosivos; Baffaut *et al.* (1996) recomienda considerar mínimo de 50 a 100 años. Sin embargo, los eventos de baja magnitud y alta frecuencia pueden ser más significativos para tasas de erosión a largo plazo.

La variabilidad espacial y las interacciones físicas, químicas, y biológicas relevantes que controlan los procesos erosivos a distintas escalas se encuentran resumidas en la Tabla 7.

Tabla 7. Escalas de interés espacial y temporal, así como sus variables y propiedades que dominan los procesos que se desarrollan en la escala indicada (Renschler y Harbor, 2002).

Propiedad:	Terreno	Ladera	Campo	Granja	Divisorias	Región
Topografía	Micro relieve	Forma de pendiente	Red de drenaje			
Uso de suelo	Cubierta vegetal		Tipo de vegetación	Patrones de uso		
Suelos	Textura del suelo		Litología / geología			
	Agregados		Tipo de patrones del suelo			
Clima	Observaciones detalladas		Red de estaciones meteorológicas			
Proceso:						
Lluvia	Distribución temporal			Distribución espacial		
Balance hídrico	Infiltración, evaporación, transpiración					
Escorrentía	Flujo por surcos			Flujo en canal		
Erosión	Disgregación	Surcos	Erosión de canal			
	Interconexión de surcos		Cárcava	Trasladación de canal		
Transporte de sedimentos	Flujo superficial		Flujo concentrado			
	Depósito de corto plazo			Depósito de largo plazo		
Área de interés	< 100m ²	< 1 Ha	< 1 km ²	< 100 km ²	< 10,000 km ²	

A diferentes escalas, diferentes grupos de procesos son los que dominan, por lo cual, un enfoque efectivo de cualquier modelo cambia con respecto a la escala. Por lo que se debe prestar especial atención al proceso de que se trate, ya que si éste no está en la misma escala que el conjunto de geoindicadores, se debe ajustar la escala de acuerdo a las variables que se pretenden medir, ya que la calidad de los resultados del modelo dependen de este ajuste (Renschler *et al.*, 1999).

La erosión es el resultado del sistema para alcanzar el equilibrio, en base el ajuste de nuevos valores en sus componentes químicas, físicas o agentes dinámicos de cambio (viento, agua, momento, hielo y temperatura) y energéticas que componen el sistema fluvial. No se hace una distinción propiamente en cuanto a la erosión como la suma del aporte erosionado por los agentes dinámicos de cambio; sino como un todo, ya que determinar el valor exacto de cada uno de estos “tipos” de erosión, implicaría una caracterización más amplia y que escapan a los intereses de este trabajo. Además, que al incluir más variables al sistema de estimación, se adhiere más incertidumbre y subjetividad al método de evaluación.

2.7.3 Los modelos basados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)

Los modelos basados en la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (**USLE**) son las herramientas más empleadas para predecir la producción de sedimentos (Kinnell, 2004; Yoder *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2010), los cuales se crearon con la finalidad de ayudar a los agricultores a minimizar las pérdidas del suelo en los campos de cultivo (Wischmeier y Smith, 1978). Los modelos USLE predicen la erosión en un campo delimitado, sin considerar su entorno y/o contexto.

Varios investigadores y desarrolladores, han recomendado evitar el empleo de los modelos basados en USLE a escala de cuenca (Wischmeier y Smith 1978; Risse et al., 1993; Kinnell, 2004; Chen et al., 2010). Sin embargo, éstos continúan empleándose pese a las recomendaciones (Kinnell, 2004; Yoder et al., 2004). Esfuerzos previos para validar los modelos USLE recaen en la estimación de la erosión en unidades de terreno individuales y en la predicción de la generación de sedimentos en corrientes pequeñas, con resultados exitosos; sin embargo a escalas regionales no ha sucedido así (*e.g.* Angimal et al., 2003), ya que los modelos basados en USLE no se encuentra suficientemente verificados a dicha escala (Trimble and Crosson, 2000).

La estimación de la erosión en cuencas es realizada comúnmente con base en estaciones de muestreo ubicadas aguas abajo, las cuales permiten observar y relacionar las tasas de erosión medida mediante métodos empíricos. Por su parte, los métodos USLE predicen las tasas de erosión con base en las características de forma, tamaño de la cuenca y la pendiente del canal de mayor grado (Vanoni, 1975; Maner, 1958; William y Berndt, 1972). En un experimento conducido por Van Rompaey et al., (2003) para validar la certeza de las estimaciones de las ecuaciones basadas en USLE empleando datos de 98 cuencas a escala regional en Europa, indican que éstas proveen predicciones pobres comparándolos con la tasa recuperada por las estaciones de muestreo.

Una de las principales dificultades para emplear estos modelos de erosión a escala regional, es incorporar la complejidad inmersa dentro de esta escala, así como el detalle que requieren los factores que constituyen las ecuaciones de los modelos USLE. Dentro de estos factores, los que posee mayor influencia en la estimación en las tasas de erosión son los factores referentes a la topografía (**LS**), ya que éstos controlan el factor de erosividad por lluvia (**R**), la cual está fuertemente asociada a la influencia topográfica. Los patrones de cubierta también se asocian con las diferencias topográficas de la cuenca: un bajo valor de (**C**), se asocia con suelos empleados para cultivo, los cuales fomentan la inestabilidad y favorecen la erosión. La constante de cubierta (**C**) ignora la interacción con otros factores geográficos, como las variaciones en los patrones climáticos y el desarrollo de la vegetación a lo largo de los gradientes latitudinales (Risse et al., 1993). Las discrepancias en la escala del modelo también afecta la confianza para caracterizar el grado de erosión del suelo (**K**).

Otra limitación significativa, es que estos modelos únicamente consideran la generación de sedimentos por efectos de los flujos de escorrentía (Prosser et al., 2001), ignorando los procesos de erosión entre las corrientes del drenaje en el sistema, la erosión de las laderas de las corriente y la resuspensión del material depositado, los cuales puede contribuir significativamente con la carga de sedimentos (Trimple, 1997). La erosión de los bancos de corriente puede ser predominantemente importante, especialmente en los sitios donde los depósitos estratificados se encuentran mal consolidados (Campo y Desloges, 1994; Nagle et al., 2007).

La importancia de los procesos hidrológicos y su control sobre los procesos de transporte de sedimentos, los cuales son conducidos por las lluvias, sugieren que la escala de tiempo que

emplean los modelos USLE pueden ser inapropiados para predecir la descarga de sedimentos en cuencas, ya que éstos predicen tasas promedio de erosión anual en términos superiores a 20 años, tiempo considerado como superior en comparación con los eventos extremos que son despreciables a escala de cuenca, los cuales suelen reconfigurar el sistema fluvial o por lo menos partes de éste (e.g. Jordan et al., 1997; Chen et al., 2010). Otra razón de la débil relación entre los resultados predictivos de los modelos USLE y el sedimento registrado empíricamente, es la insuficiente relación reflejada entre los patrones del clima en los factores de entrada de los modelos USLE, lo cual resulta en tasas inconsistentes de aportación de sedimentos en relación con la cantidad e intensidad de las lluvias (e.g. Lenzi et al., 2003; Kinnell, 2004). Por tanto es importante evitar el empleo de los modelos USLE para obtener predicciones a escala de cuenca y considerar sus resultados como argumentos válidos para administrar cuencas (Kinnell, 2004; Trimble y Crosson, 2000). El método propuesto por Wilkinson y McElroy (2007), emplea la tasa de denudación total, la elevación modal promedio, entre otros parámetros relacionados con la topografía cuenca, relacionándolos con el carácter y configuración del sistema fluvial por medio de su curva hipsométrica. El método ha sido aplicado a 33 cuencas de grandes ríos obteniendo hasta hoy las mejores correlaciones a esta escala, ($r^2 = 0.79$ y 0.65) siendo esta la razón para su empleo en este trabajo.

2.7.4 *El contexto global de la erosión*

La influencia de la topografía y el clima sobre la erosión continental es claramente evidente en la distribución global de los sedimentos que son depositados en los océanos (Figura 13).

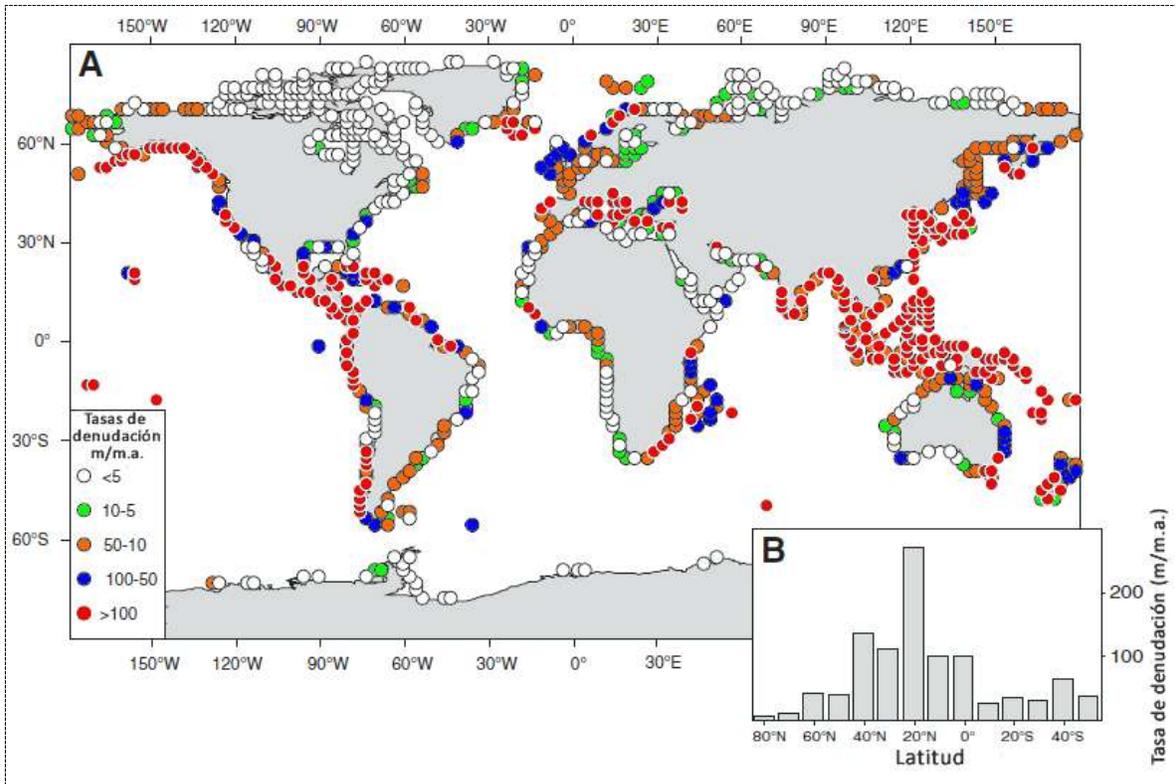


Figura 13. Distribución espacial de las tasas de denudación continental (m/m.a.). **(A)** Valores de los flujos derivados de las masas suspendidas en las corrientes ribereñas según Ludwig *et al.* (1996), considerando una carga suspendida/lecho de 10 Gt y una tasa de carga particulada/solución con valor 6 Gt. Esto representa un flujo de red de intemperismo de ~ 21 Gt/año derivado en su mayoría por la superficie continental descubierta ($\sim 118 \times 10^6$ km²), lo cual requiere una tasa de denudación promedio de ~ 71 m/m.a. (es importante notar que las tasas más altas de producción de sedimentos ocurren a través de la región costera a bajas latitudes y adyacentes a regiones de rápida ascensión. **(B)** Distribución de las tasas de denudación en función de la latitud. (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007)

Varios estudios han establecido relaciones significativas entre la carga de sedimentos que un río transporta y algunos índices de la topografía de sus cuencas, las cuales poseen una variabilidad descrita con base en alguna función matemática que satisface la dinámica entre las tasas de erosión y la elevación promedio, el relieve local y la pendiente de la cuenca (figura 14). Montgomery y Brandon (2002) sugieren que la naturaleza de la relación ya sea lineal, exponencial, y/o a cierta potencia, para las tasas de erosión de un área en particular, depende de las distintas variables que prevalecen y dan forma a dicho sitio.

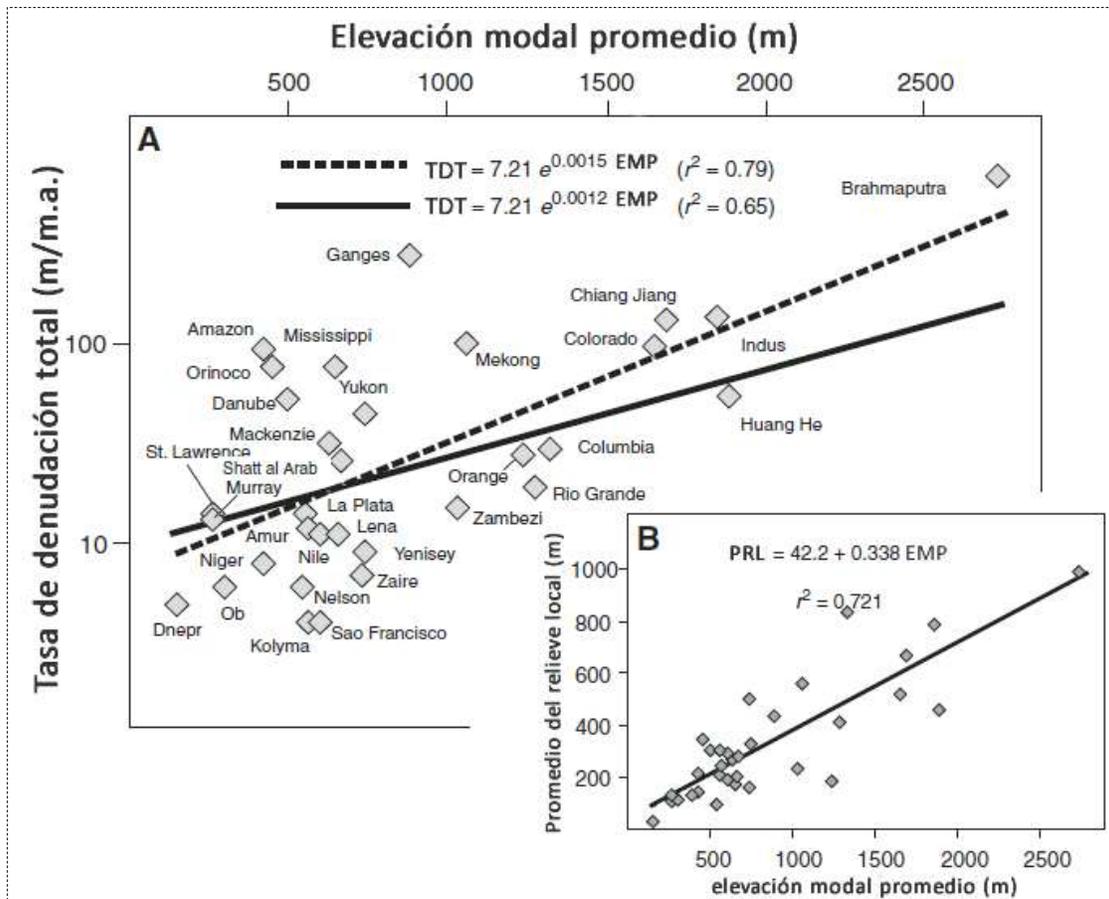


Figura 14. Tasas de denudación de distintas cuencas de ríos y datos topográficos de Summerfield y Hulton (1994). (A) Relación entre la elevación modal promedio (EMP) y la tasa de denudación total (químico y mecánico) (TDT) para 33 grandes ríos, los cuales drenan un ~39% ($52 \times 10^6 \text{ km}^2$) de la superficie expuesta del planeta. La línea discontinua es la que mejor se ajusta a los datos, como una función exponencial (la tasa de denudación se incrementa un ~15% con cada metro de elevación incrementado); por su parte, la línea continua representa un mejor arreglo con las estimaciones actuales para la carga de algunos grandes ríos, con una producción de sedimentos global actual de ~21 Gt/año. (B) Relación lineal entre la elevación modal promedio y el promedio del relieve local (PRL). (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007).

Considerando las relaciones entre la elevación de la superficie y las tasas de denudación del trabajo de Summerfield y Hulton (1994), las tasas de erosión más bajas (7.21 m/m.a.) ocurren sobre las superficies cercanas al nivel del mar, donde el relieve y las pendientes son posiblemente las mínimas; por encima de esta elevación, las tasas de erosión se incrementan en un ~15% por cada metro de elevación incrementado (Figura 15).

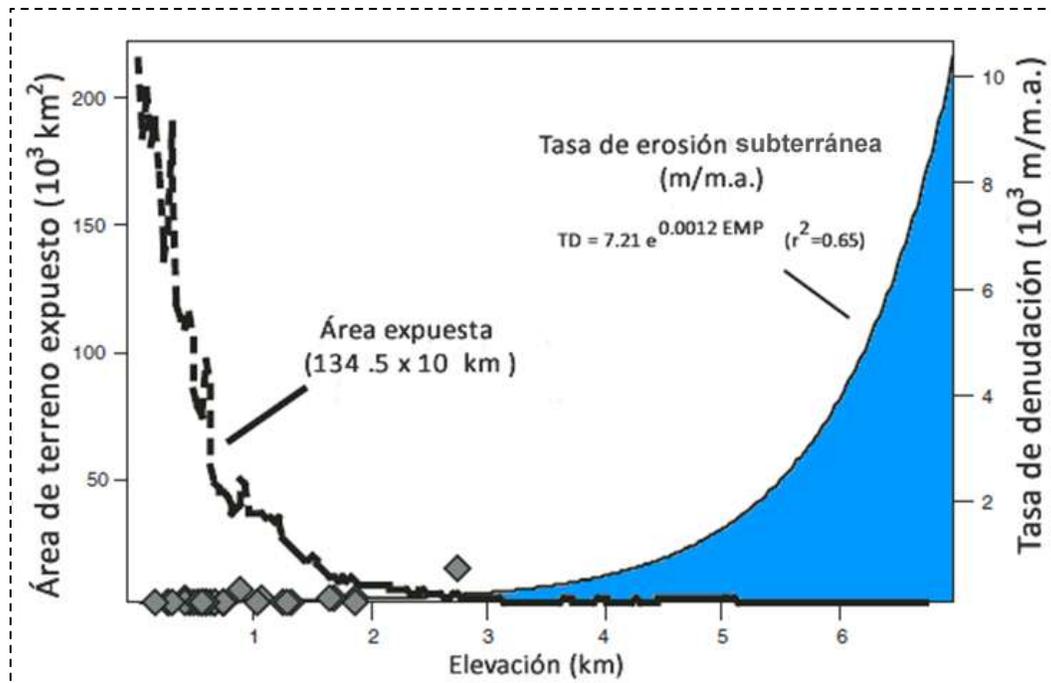


Figura 15. Áreas continentales libres de hielo (expuestas) de **GTOPO30** (líneas discontinuas; eje izquierdo), y las tasas de erosión subterránea anticipadas (línea sólida; eje derecho) como una función de la elevación (eje horizontal), y la relación entre la elevación modal promedio (**EMP**) y la tasa de denudación (**TD**). Los rombos representan las tasas de denudación de las áreas de cuenca de diversos ríos (Summerfield y Hulton, 1994; Figura 14). La línea sólida es una extrapolación de estos datos sometidos por las cargas de sedimentos de los ríos a nivel global (Syvitski *et al.*, 2005; línea sólida en la figura 14). (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007).

A escala mundial, la retención de sedimentos por presas pequeñas (~4 Gt/año) es despreciable en comparación con la cantidad que es aportada por las tierras de cultivo (~63 Gt/año) (Wilkinson y McElroy, 2007). Incluso si se compara con distintas eras geológicas, se verá que ninguna de ellas sobrepasa las tasas de erosión anual actual de los ríos del planeta y mucho menos la tasa de erosión debido a las tierras de cultivo; para obtener el flujo de masa anual perdido a causa de las tierras de cultivo, sería necesario sumar los flujos de masa desde el Triásico Inferior (hace ~251 m.a) hasta el Plioceno (hace ~2.6 m.a.), es decir un periodo de ~248.4 millones de años, (Figura 16).

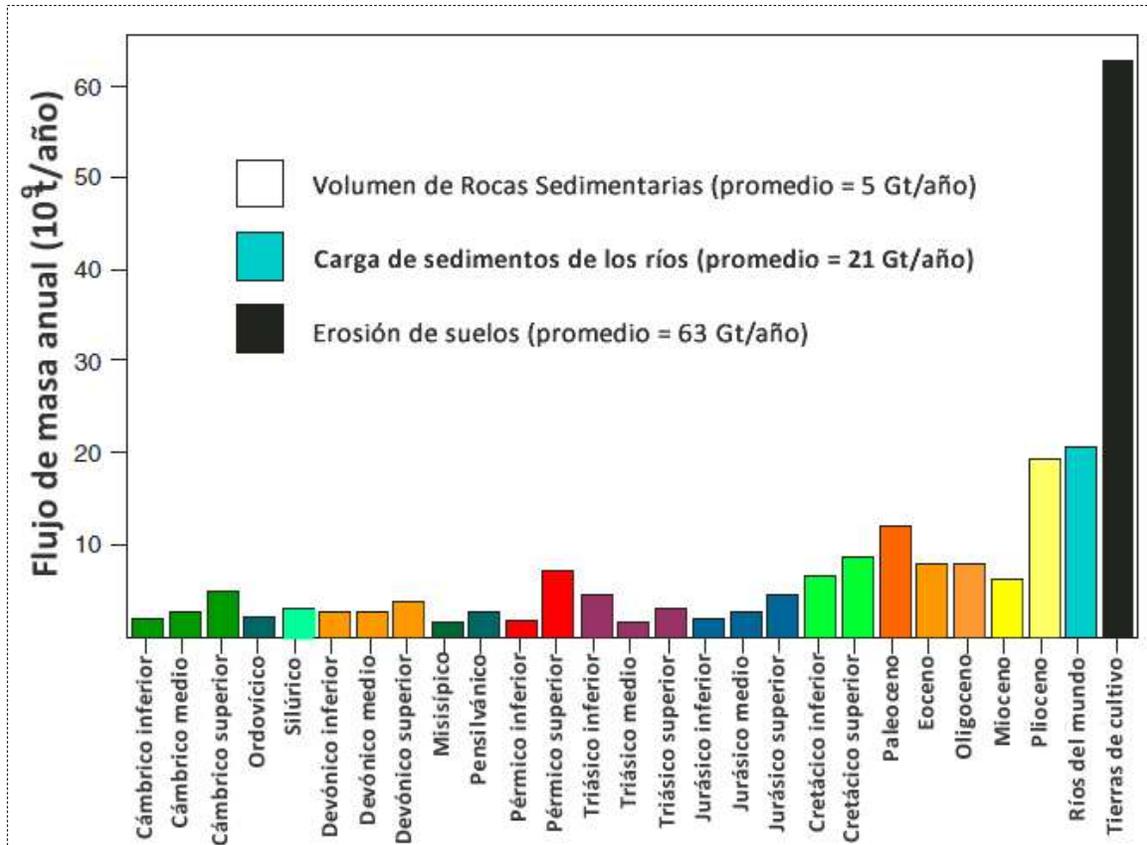


Figura 16. Tasas anuales de erosión global y datos de los volúmenes de rocas sedimentarias (barras de colores), la carga de los ríos del mundo (barra azul), y la pérdida de tierras de cultivo (barra negra). Notar que la tasa de erosión inferida para la pérdida de suelo es ~3 veces la sugerida para la carga de sedimentos de los ríos del mundo y de los volúmenes de sedimento aportados durante el Plioceno (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007).

2.8 CAMBIO GEOMORFOLÓGICO, DE PLANTA Y EN LOS PATRONES DEL SISTEMA FLUVIAL DEBIDOS A LA PRESIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA EMBALSE

2.8.1 Tipos de degradación

La degradación que ocurre en las corrientes puede avanzar en la dirección de la corriente o en sentido contrario, dependiendo de la causa básica que la origina (Galay, 1983). Si la reducción en la pendiente es causada por la descarga de la carga suspendida (L_s), la reducción del material del lecho de tamaño medio (D_m) o un incremento de Q al principio de la cabecera de corriente conducirá a un proceso de degradación aguas abajo, por otra parte, si la pendiente experimenta un incremento al final de la corriente, un incremento del caudal aguas arriba Q , el gasto de salida de la cuenca (Q_s) y el diámetro del material del lecho (D) permanecerán sin cambio, sin embargo

se llevará a cabo un proceso de degradación aguas arriba. Otro escenario en el cual existe una degradación aguas arriba ocurre si el nivel de agua del cuerpo en donde la corriente que deposita los sedimentos modifica negativamente su valor.

Es importante reconocer que los procesos de degradación aguas arriba suceden en lapsos menores que los que se llevan aguas abajo; esto es debido a la sensibilidad sobre el material del lecho y su dependencia respecto a la pendiente de corriente; es decir, conforme se avanza aguas abajo la pendiente tiende a encontrarse totalmente horizontal, por lo que las descargas del material en el lecho tienden al mismo valor.

2.8.2 Cambios en los canales del río

Wolman y Leopold (1957) encontraron que mientras las corrientes aluviales muestran una continua tendencia a migrar lateralmente sobre un período de años, en algunos casos los canales de corriente mantienen razonablemente estable su posición y sufren un pequeño movimiento lateral en un período considerablemente largo. Este movimiento lateral puede ser continuo o discontinuo; y entre más grande sean las corrientes que sufren este tipo de movimiento, mayor serán las tasas de migración, cuyas unidades son de distancia sobre tiempo; el fenómeno se explica debido a las variaciones en la carga de sedimentos transportada por el río.

2.8.2.1 Controles de forma y ajuste del canal

Todo sistema fluvial posee fluctuaciones en las variables que lo configuran a través del tiempo; de las cuales, i) las fluctuaciones del flujo y ii) la carga de sedimentos parecieran ser las más recurrentes, lo cual se traduce en ajustes permanentes que toman lugar a través de procesos de degradación, re-trabajo y depósito de sedimentos. A este par de variables se les llama **variables de transformación o conducción**, ya que estas conducen los procesos de transformación (Figura 17).

Es importante reconocer que todo el contexto de un sistema impone sobre sí límites, y/o condiciones de alcance local. Generalmente, estos límites se asocian con la disponibilidad de la energía, ya que los ajustes en el canal se limitan a la magnitud de los gradientes que existen o se modifican en el sistema fluvial, en especial al tratarse de corrientes con bancos cohesivos o que están protegidos por la vegetación. Por otra parte, al conjunto de restricciones se les denomina **condiciones de frontera** y se incluyen en el mismo confinamiento del valle, sustrato del canal, pendiente del valle y a la vegetación.

No todos los canales se encuentran en equilibrio, aunque debe entenderse el término de equilibrio más bien como un estado estacionario, en el cual, la tasa de creación es igual a la de destrucción. En la naturaleza existen varios canales en desequilibrio o en un estado no estacionario. Lo cual

significa que el canal puede estar respondiendo a términos de reajustes, como resultado de cambios antiguos tanto en su flujo como en el régimen de sedimentos.

Los distintos componentes de la morfología del canal cambian a velocidades distintas o a escalas temporales diferentes (Figura 18). Esto sucede así, ya que existen componentes que son más sensibles que otras, y por tanto unas se ajustan más rápido que otras. Morfológicamente los ajustes poseen un retraso después de que han experimentado algún cambio o estímulo.

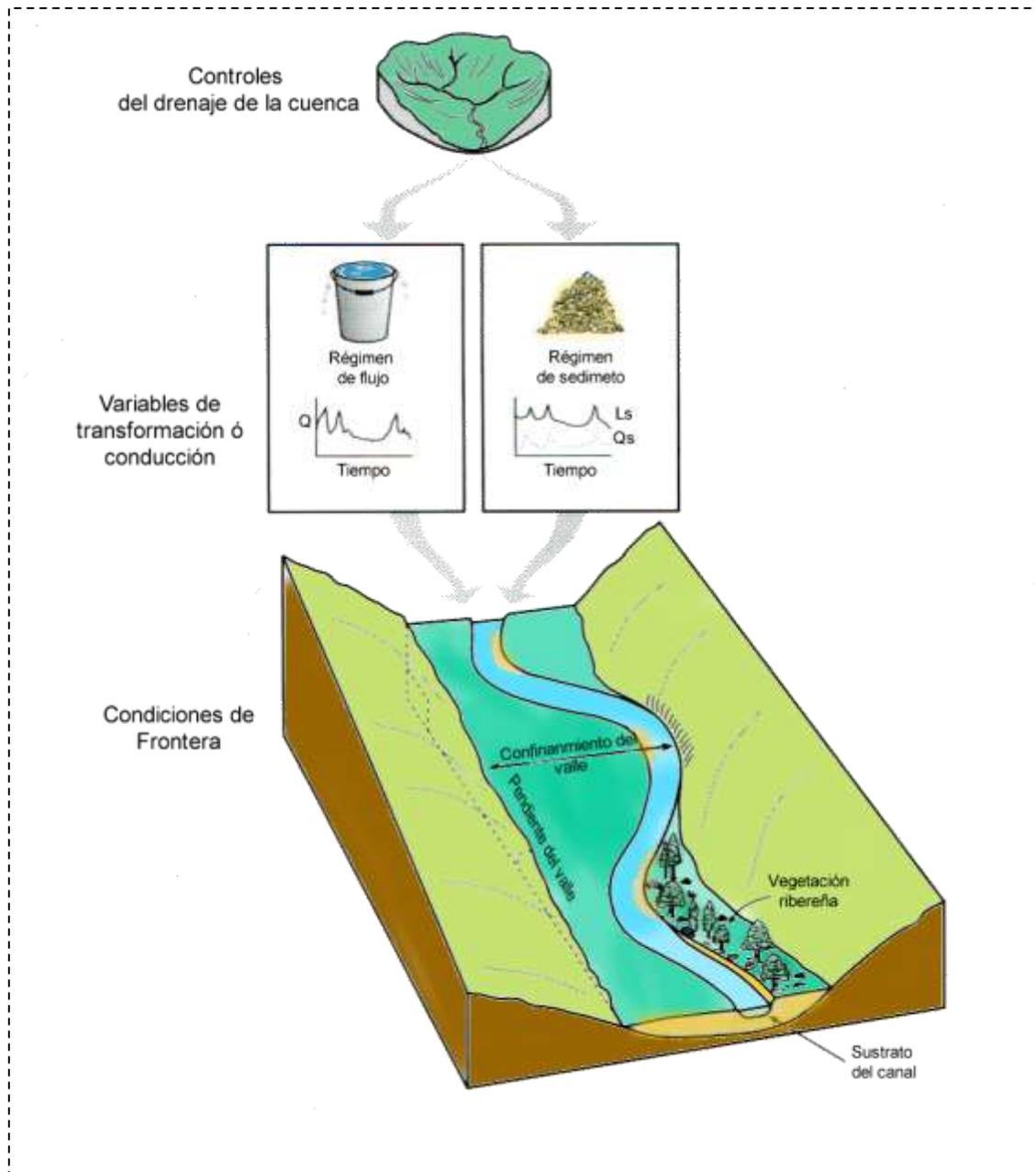


Figura 17. Las variables de transformación y las condiciones de frontera que controlan la forma y comportamiento del canal. (Modificado de Ro, 2008).

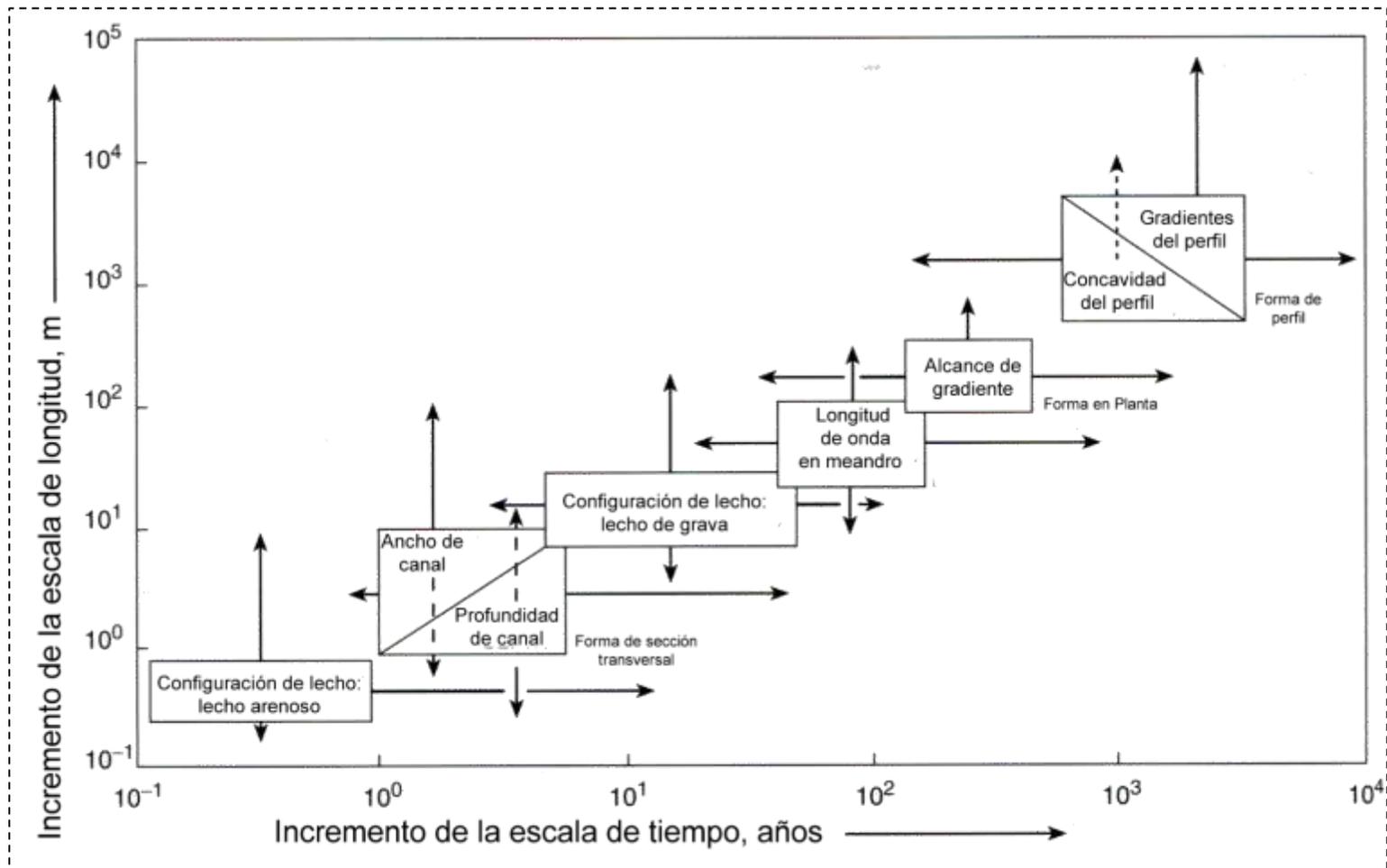


Figura 18. Diagrama esquemático de la escala de tiempo para el ajuste de varias componentes de forma del canal con las dimensiones de longitud dadas en una cuenca hipotética de tamaño intermedio. (Knighton, 1998).

2.8.2.2 Mecanismo del cambio

Se considera que todo sistema fluvial que presenta cambios, posee cuatro **grados de libertad** o variables que pueden ser modificados, estos son: la sección transversal del canal, la pendiente, la forma de planta y la rugosidad del lecho.

Las modificaciones en la forma y tamaño de la sección transversal se asocian a los cambios en la profundidad y anchura del canal a causa de los procesos erosivos en los bancos del canal, los procesos de incisión en el lecho, o depósito. La pendiente del canal puede ser modificada en distintas formas, por ejemplo una retroalimentación negativa reduce la pendiente en secciones abruptas por medio de procesos erosivos e incrementa en partes la pendiente por medio del depósito de sedimentos. Los incrementos o disminuciones en la longitud del canal también afectan la pendiente del canal, tal y como se ilustra en la Figura 19. La forma de planta se modifica en función de la energía disponible; por ejemplo, un periodo de baja energía puede crear unidades geomorfológicas en el ensamblado que indiquen depósito, o un periodo de lluvias extraordinario puede borrar todo registro anterior. Por su parte la rugosidad del lecho ofrece una contra parte de la energía disponible ya que ésta ofrece oposición al tránsito del río, haciendo que la energía de este disminuya en las áreas que entran en contacto, por eso se sabe que en la parte media del canal el flujo posee mayor velocidad.

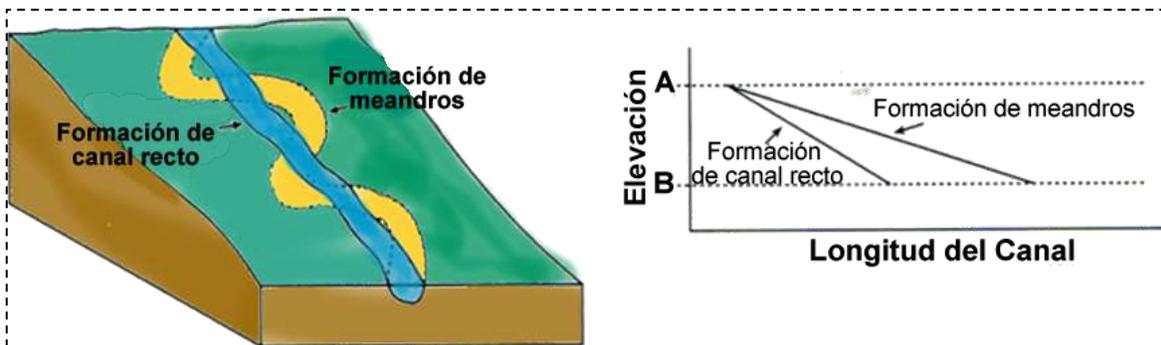


Figura 19. Desarrollo de meandros entre los puntos A y B, y formación de canal recto con una reducción en la pendiente del canal entre los puntos A y B. (Modificado de Ro, 2008).

Los cambios en las secciones transversales del río, ya sean abruptos o graduales, son resultado de las variables hidrológicas, hidráulicas (energía cinética) y del propio transporte del material. Con estas variables el sistema fluvial emplea dos grados de libertad. Generalmente son estos grados de libertad los que el sistema fluvial trata de equilibrar cuando una presión modifica el equilibrio anterior del sistema. Por tanto es importante pensar en los sistemas fluviales como sistemas dinámicos y bifásicos, compuestos esencialmente de agua y sedimento (procedente del cauce principal o de las corrientes que componen la cuenca).

CAPÍTULO III – METODOLOGÍA

Los datos de trabajo fueron obtenidos de diversas fuentes según se presenta la Tabla 8. Dentro del conjunto de actividades realizadas se tiene el acopio de información, la búsqueda en la red, visitas a instituciones y con especialistas en la materia, así como la depuración y transformación de los datos que las diversas instituciones facilitaron.

Tabla 8. Fuentes de información, facilitadores y accesibilidad

Nombre de la base de datos	Organismo facilitador
Modelos Digitales de Elevación (MDE)	INEGI
Datos meteorológicos	CNA
Datos geoquímicos	SGM
Mapas geológicos	SGM
Informes Geológicos (técnicos)	SGM Y CFE
Vectores y polígonos geoestructurales	SGM Y CFE
Imágenes de satélite LANDSAT	NASA
<i>INEGI – Instituto Nacional de Estadística y Geografía</i> <i>CNA – Comisión Nacional del Agua</i> <i>SGM – Servicio Geológico Mexicano</i> <i>CFE – Comisión Federal de Electricidad</i> <i>NASA – National Aeronautics and Space Administration</i>	

El *software* empleado se presenta en la Tabla 9. En este capítulo se indicará el empleo de cada uno de estos paquetes sin entrar en muchos detalles sobre el procedimiento que se realizó con los mismos, ya que esta no es la finalidad principal del trabajo, sin embargo se dará una descripción para la reproducibilidad de la metodología.

Tabla 9. *Software* empleado en la transformación de los datos crudos y la elaboración del presente trabajo.

Nombre del paquete	Empleo en el desarrollo de la metodología
IDRISI Taiga	Sistema de información geográfica, sensoría remota y análisis del terreno como patrones, regresiones matemáticas para la determinación de ecuaciones de estado del sistema, comportamiento del terreno y análisis de los MDE's del área de estudio.
Excel 2011	Tratamiento estadísticos, preparación de datos, realización de cálculos mediante hojas programadas
Word 2011	Captura y procesamiento de de texto
Autocad 2010-2011	Elaboración de mapas y como visualizador
Global Mapper 12	Tratamiento y conversión de formatos entre distintos paquetes y como visualizador
Surfer 10	Tratamiento estadístico y elaboración de mapas geoquímicos
Grapher 8	Elaboración de gráficas climatológicas y análisis de patrones climáticos
WMS 8.2	Análisis del MDE para la elaboración de la red hidrológica a estudiar, así como el análisis de los patrones de drenaje de la cuenca y subcuencas.
Google Earth	Como visualizador y como herramienta para consultar datos en la elaboración de mapas.

3.1 CLIMA

El estudio de las precipitaciones, se examinó por estaciones, ya que durante cada evento, las características climáticas e hidrológicas varían. Las estaciones se configuraron para el presente estudio como lo muestra la Tabla 10:

Tabla 10. Distribución de las cuatro estaciones que se desarrollan en la cuenca media del río Yaqui

Estación	Inicio	Fin
Invierno	21 de Diciembre	20 de Marzo
Primavera	21 de Marzo	20 de Junio
Verano	21 de Junio	20 de Septiembre
Otoño	21 de Septiembre	20 de Diciembre

A continuación se detalla la ubicación geográfica de cada estación considerada en el estudio, debido a que su ubicación geográfica es importante para estudios posteriores relacionados con la intensidad y/o agresividad de la lluvia, entre otros factores que marcan o constituyen el grado de sensibilidad de la cuenca frente al intemperismo y el transporte de sedimentos (Tabla 11). Cabe señalar que dichas estaciones son las más cercanas y que además rodean la zona de estudio.

Tabla 11. Localización de las estaciones meteorológicas consultadas para contextualizar las condiciones meteorológicas de la cuenca media del río Yaqui. El sistema de proyección empleado posee el *datum* **WGS84**. (Elaborado con datos de WWW.SMN.CONAGUA.GOB.MX)

Nombre de la estación	Latitud	Longitud
La Estrella	28.9808333	-109.6525
El Novillo	28.9975	-109.6475
San Javier	28.6158333	-109.748333
Tónichi	28.6	-109.566667
Plutarco Elías Calles	29.01	-109.66
Rebeiquito	28.9625	-109.778333
Onavas	28.4866667	-109.545833

Los datos crudos se obtuvieron de la página de la Comisión Nacional del Agua (**CONAGUA**) por medio de la consulta de las distintas estaciones meteorológicas, las cuales arrojan los valores en tablas con formato de texto (*.txt). Estos valores se importaron a una hoja de cálculo Excel donde se hizo el tratamiento para separar los datos en distintas columnas y filas según los criterios de clasificación en temperatura, días con lluvia, cantidad de lluvia, etc.

Una vez separada esta tabla, se procedió a crear distintos criterios para interpretar los datos, como la suma de la cantidad de lluvia por años, por meses, y obtener los mayores registros; lo mismo se hizo para las temperaturas. De estas tablas se tomaron los datos necesarios para el

estudio de la agresividad de la lluvia y todo lo referente con el tratamiento meteorológico de la zona de estudio. La base de datos empleada posee un registro histórico de 25 años (1982 – 2007)¹⁰

3.2 PRESIÓN ANTRÓPICA

Se buscó información concerniente al uso de suelo, a partir de las bases de datos del SGM, INEGI, informes de CFE y tesis.

Se identificaron áreas relacionadas con las actividades humanas que afectan el sistema hidromorfológico, así como el contexto geográfico, la presión y el grado de vulnerabilidad asociados al sistema de estudio. Se realizó un inventario de todas las obras mineras y zonas mineralizadas en el área de estudio con datos proporcionados por el SGM, mismos que fueron tratados con Excel de la misma forma ordenándolos por columnas y filas, luego aplicando filtros para discriminar su localización, tipo de minado, y su estatus en la actualidad (en operación o no).

En la zona no existe actividad agrícola o pecuaria que sea considerada como importante, y que se conozca como una posible causa de las anomalías geoquímicas debidas al fosforo en la zona de estudio. Las zonas que presentan estas actividades, según datos del INEGI sobre el uso de suelos de la serie 4, se encuentran preferentemente cerca del cause del río Yaqui y sobre la zona NW de la cuenca, lo que difiere de los puntos donde nacen las anomalías geoquímicas de este elemento químico (**Ver anexo: Geoquímica del fósforo**).

3.3 GEOQUÍMICA: FONDO, ANOMALÍAS Y POSIBLES FUENTES

Para identificar el fondo geoquímico se usaron los datos del SGM en formato *.SHP, de los cuales se consultaron la bases de datos ligadas a estos archivos en el *software* IDRISI. A partir de los archivos *.SHP se construyeron bases de datos en Excel para llevar un control más estricto de los datos y una manipulación más simple para realizar consultas e imprimir resultados parciales. Una vez reorganizada la información por elemento, se calcularon “geoindicadores de contaminación” con los cuales se identifican las anomalías en sedimentos y que emplean el siguiente índice:

¹⁰ Se empleo el manual M-PRY-CAR1-06-003/00 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

3.3.1. Índice de geoacumulación (I_{geo})

El nivel de contaminación de sedimentos y suelos se determinará con base en el índice de geoacumulación (I_{geo}), descrito por Muller (1969). Los valores del I_{geo} se calculan usando la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde, C_n se refiere a la concentración medida del elemento; B_n a la concentración del fondo geoquímico del elemento (por ejemplo: el valor promedio de los sedimentos). El factor de 1.5 es introducido con la finalidad de corregir posibles variaciones en los valores de fondo, producidos por efectos litogénicos. Los valores de I_{geo} para calificar la calidad de los sedimentos evaluados, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Rangos que puede tomar el índice de geoacumulación (I_{geo}) y su condición cualitativa. (Modificado de Muller, 1969).

I_{geo}	Estado de contaminación
>5	Extremadamente contaminado
4-5	De fuerte a extremadamente contaminado
3-4	Fuertemente contaminado
2-3	De moderado a fuertemente contaminado
1-2	Moderadamente contaminado
0-1	Sin contaminación a moderadamente contaminado
<0	Sin contaminación

Se crearon mapas basados en la Tabla 13 considerando únicamente el índice de geoacumulación para el As, Cd, Cu, P, Pb, Sr, U y Zn, ya que según la lista del inventario de las zonas mineras y mineralizadas son estos elementos los que presentan mayor ocurrencia en los procesos que ahí se lleva a cabo o poseen mayor riesgo para la salud del ecosistema fluvial y del mismo sistema. Los mapas se construyeron con el programa *Surfer* versión 10.

La importancia de estos índices radica en que nos permite conocer las tasas de erosión y depósito, así como el comportamiento de los metales en el ambiente fluvial, y asociarlo a una clase de sedimentos ya sea según su mineralogía o lugar de procedencia (ambiente de generación de sedimentos o el proceso de depósito). Identificar las posibles fuentes es una tarea difícil y que implica visitas a campo, sin embargo el comportamiento mostrado en las figuras presentadas en el capítulo de resultados (Figura 39-45) da una idea clara sobre donde comienza la dispersión de los sedimentos “contaminados”, más no si el origen de la contaminación de éstos.

Tabla 13. Contenido de los elementos en suelos, la corteza terrestre y sedimentos. (A partir de Sparks, 2003).

Elemento	Suelos (mg kg ⁻¹)				Corteza terrestre (Promedio) ^b	Sedimentos (Promedio) ^b
	Media ^a	Rango ^a	Media ^b	Rango ^b		
As	7.2	<0.1-97	6	0.10-40	1.5	7.7
Cd	-	-	0.35	0.01-2	0.11	0.17
Cu	25	<1-700	30	2-250	50	33
P	430	<20-6,800	800	35-5,300	1,000	670
Pb	19	<10-700	35	2-300	14	19
Sr	240	<5-3,000	250	4-2,000	370	320
U	2.7	0.29-11	2	0.70-9	2.4	3.1
Zn	60	<5-2,900	90	1-900	75	95

^aDe **U.S. Geological Survey Professional Paper 1270 (1984)**. Representa los análisis de suelos y otros materiales continentales tomados del territorio de los Estados Unidos de America (regolitos, arena de desierto, dunas, depositos de *loess* y aluviales con poco o ningun contenido de material orgánica).

^bDe **Bowen (1979)**. Representan los análisis de suelo tomado de diversas partes del mundo.

3.3.1.1 FONDO GEOQUÍMICO DEL ESTADO DE SONORA

Los mapas de fondo geoquímico para el estado de Sonora, se elaboraron con datos del SGM y fueron tratados con el método estadístico *kriging*; se emplearon los datos disponibles para construir los mapas de distribución geoquímica en sedimentos para el estado de Sonora. Los mapas resultantes y el sumario estadístico correspondiente se encuentran en el **Anexo Fondo Geoquímico del Estado de Sonora en el CD que acompaña este trabajo**.

3.4 EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN

La intensidad de la lluvia, muestra una correlación significativa con la producción de sedimentos en los ríos (Fournier 1960), por medio de la razón p^2/P , donde p es el promedio mensual más alto y P se refiere al promedio anual más alto. Este es estrictamente un índice que trabaja con las concentraciones de precipitación en períodos individuales como son los meses.

En menor medida se puede encontrar una correlación significativa entre la razón p^2/P y la textura del drenaje, definida como el número de corrientes de primer orden por unidad de área (Morgan 1976). Debido a que la textura del drenaje es análoga a la densidad de corriente, p^2/P puede ser considerado como un indicador de la erosión de éstas. En contraste, el promedio anual de los valores de erosión reflejan el riesgo de erosión debido al diámetro de las gotas de lluvia, inundación y escorrentía (Morgan 1976). Si se sobreponen los mapas de p^2/P y potencial de

erosión debido a otros factores antes mencionados, se obtiene una imagen compuesta de la vulnerabilidad del terreno a la erosión.

Para el desarrollo de este cálculo, fue necesario recurrir a los productos de los análisis realizados a los datos climatológicos iniciales y calcular para cada estación su **P** y **p**, y con base en estos resultados calcular la agresividad de la lluvia mediante la interpolación con el método estadístico *Kriging* en el paquete *Surfer*.

Otro aspecto importante considerado es la temperatura y su variabilidad, ya que esta variable juega un papel importante en el intemperismo de las formaciones rocosas en particular en zonas áridas con variabilidad en la temperatura. Se crearon mapas con el registro de temperaturas, así como gráficas mostrando la variabilidad de las temperaturas alcanzadas en las distintas secciones de la cuenca estudiada; estos procedimientos se realizaron con los paquetes *Surfer* y *Grapher*.

3.4.1. Procesos y mecanismos de erosión

La severidad de la erosión depende además de la cantidad de material disponible debido a la disgregación litológica, de la capacidad de los agentes de erosión para transportarlo. Cuando los agentes poseen mayor capacidad para transportar más material del que es aportado por la disgregación, el tipo de erosión puede describirse con base en la disgregación. Por otra parte, si se dispone de mayor material del que se puede transportar, la erosión se encuentra limitada por el transporte.

La energía disponible para que ocurra la erosión es prácticamente representada por su forma potencial y cinética. La energía potencial (**EP**) resulta de diferenciar la elevación de un cuerpo con respecto a otro. Lo cual, es el producto de la masa de las gotas de lluvia (**m**) por la diferencia de elevación (**l**) y la aceleración debido a la gravedad (**g**), por lo que:

$$EP = mlg \quad (\text{ecuación 2})$$

Cuyas unidades son kg, m y m/s respectivamente, la resultante de esto es un valor en *Joules*. La energía potencial para la erosión es transformada en energía cinética (**KE**), la energía del movimiento, la cual relaciona la masa y velocidad (**v**) del agente erosionante como la expresión que sigue:

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{ecuación 3})$$

Para el desarrollo de estas ecuaciones fue necesario recurrir primeramente el Modelo Digital de Elevación (**MDE**) de la zona de estudio. Empleando el paquete *Global Mapper* se convirtió el MDE al formato **ASCII** (archivo de texto con los datos XYZ), para posteriormente tratar los datos en varias hojas de Excel. Para el cálculo de la **EP**, se consideró que las nubes que originan la lluvias

sobre la zona de estudio son del tipo nimbos¹¹, las cuales generalmente se encuentran a una altura de 1,800 metros relativos al terreno, por lo que en la hoja de cálculo se restó la elevación del terreno (**Z**) a este valor, obteniendo así el valor de (**I**) en la ecuación; la masa (**m**) de una gota de lluvia es de aproximadamente 0.000065 kg (Houze, 1993) y la (**g**) se considera como 9.81 m/s². En cuanto al cálculo de la **KE** el procedimiento incorpora el cálculo de la velocidad del viento. En primera instancia se calcula que la gota desciende en caída libre, y posteriormente se realiza una corrección por la velocidad del viento promedio, que en la zona que es de 1.11 m/s o 4 km/h. Finalmente los resultados para cada uno de los tipos de energía se substituyen en lugar de la (**Z**) y se construyen los mapas empleando el método de *Kriging* en *Surfer*.

3.4.2. Vegetación

También se realizaron análisis y comparativas por medio de imágenes satelitales Landsat, empleando firmas creadas con las distintas bandas con las que se trabajaron las imágenes Landsat para distintas fechas con las cuales se calculó la diferencia de pixeles con posibilidad de contener masa vegetal, mediante el uso de las bandas 3,4,5 y 7. Cabe mencionar que se realizaron diversos tratamientos a las imágenes¹² antes de su empleo, así como una serie de regresiones para encontrar divergencia en las anomalías, tomando como posibles anomalías valores con una variación de por lo menos 3σ .

3.4.3. Evaluación cuantitativa de la erosión

El cálculo de la carga de sedimentos que transporta el río Yaqui se consideró con base en el trabajo de Summerfield y Hulton (1994). Se desarrollaron tratamientos estadísticos apoyados con IDRISI sobre los MDE del área de estudio para encontrar diversos índices topográficos necesarios para la aplicación de las formulas propuestas por Wilkinson y McElroy, 2007. Gran parte del tratamiento necesario para encontrar la Elevación Modal Promedio se hizo con la interacción entre *Excel* e *IDRISI* considerando histogramas normales y de frecuencia acumulada para identificar rangos de cambios abruptos en las frecuencias en los porcentajes de acumulación y elevación.

A partir de la Elevación Modal Promedio (**EMP**), se determinó la Tasa de Denudación Total (**TDT**) con las unidades de metros sobre un millón de años (m/Ma), de acuerdo a Wilkinson y McElroy (2007).

¹¹ Son nubes localizadas en las partes baja y media de la atmósfera, capaces de formar precipitaciones y rayos.

$$TDT_1 = 7.21e^{0.0015EMP} (r^2 = 0.79) \text{ (ecuación 4)}$$

$$TDT_2 = 7.21e^{0.0012EMP} (r^2 = 0.65) \text{ (ecuación 5)}$$

La determinación del Promedio de Relieve Local (**PRL**), (unidades en metros) se realizó de acuerdo a:

$$PRL = 42.2 + 0.338 EMP (r^2 = 0.721) \text{ (ecuación 6)}$$

La estimación de la cantidad de material que se removerá o transportará de la cuenca, se calcula multiplicando la **TDT_x** [km/Ma] por el área (km²) que ocupa la cuenca, obteniendo el volumen de material que será removido de la cuenca; el resultado de esta operación está dada en km³/Ma. Finalmente se convierten las unidades a m³/año o bien a km³/año, según se prefiera.

Lo siguiente es incorporar la densidad de la roca predominante en la zona, que es la arenisca de la Formación Baucarit con una densidad de 2.58 gr/cm³; ya que se estima que esta aflora en un 90% de los casos en las cartas Tónichi y La Dura (De la O Villanueva, 1993) y/o también puede emplearse la densidad del granito como material representativo de la corteza terrestre (Anderson y Anderson 2010) que es de 2.7 gr/cm³.

3.4.3.1 Evaluación cualitativa de la erosión

Como ya se ha mencionado las variables que intervienen en el proceso de la erosión y el depósito son muy diversos y cada sitio sobre la Tierra tiene formas muy diversas de configurarlas; aún en el mismo sitio la forma predominante de intemperismo o erosión puede variar debido a las fluctuaciones en el clima, presiones antropogénicas, entre otras razones. Por lo tanto se propone un manejo cualitativo de la erosión por medio de mapas, con los cuales se puede estimar con mayor detalle el tipo de proceso erosivo más representativo según la configuración del sistema a un tiempo en concreto.

3.5. ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL SISTEMA FLUVIAL DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI.

3.5.1. Textura y patrones de drenaje

Los patrones de drenaje se determinaron por medio del empleo del MDE del área de estudio, utilizando el *software Watersher Modeling System (WMS)*, el cual delimita la divisoria de la cuenca y determina el drenaje, así como los descriptores básicos para la cuenca. Es importante que los

datos del MDE estén dados en el sistema geográfico de coordenadas UTM, ya que el programa es totalmente numérico y no admite valores en grados minutos y segundos. Por su parte la textura del drenaje se determina de manera visual, comparando el drenaje elaborado por WMS con los patrones descritos en la Figura 5.

3.5.1.1 Orden de corrientes

En este trabajo se eligió el método presentado por Strahler en 1952 para clasificar el orden de las corrientes del sistema fluvial en estudio. Las corrientes que no reciben aporte de ninguna otra corriente son calificadas como **cuentas**. Y se denominan como **tributarios** a aquellas corrientes alimentadas por lo menos por dos cuentas. Las corrientes de segundo orden en adelante se denominan para su fácil identificación en este trabajo como **tributarios**; dos tributarios de segundo orden crean un tributario de tercer orden al juntarse, y así sucesivamente. Cuando dos tributarios de distinto orden se juntan, no alteran el orden jerárquico del tributario al cual son incorporados, permaneciendo el orden de la corriente de mayor orden hasta que dos tributarios del mayor orden obtenido se junten en un tributario nuevo, el cual determinara el orden del sistema fluvial y el orden de la cuenca. Horton (1945) introdujo el término de orden de corriente, que se refiere a la medida de la posición jerárquica de la corriente en relación a sus cuentas y tributarios (Figura 20). Las corrientes se clasifican como sigue:

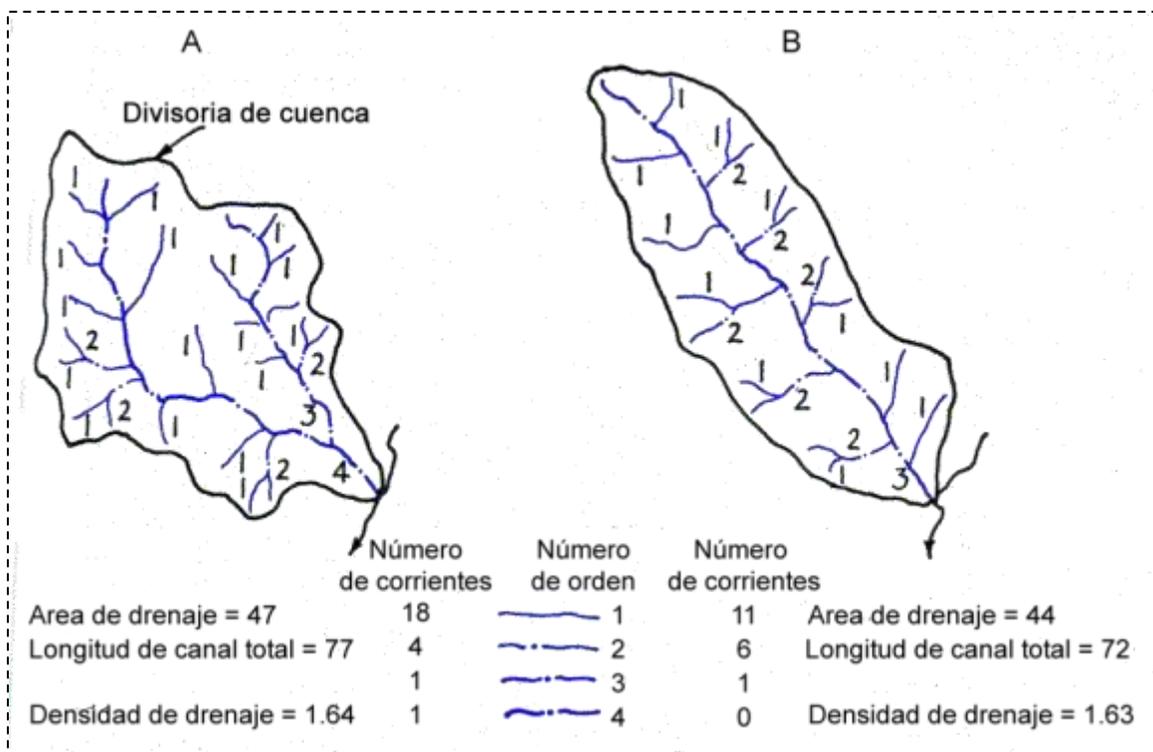


Figura 20. Ejemplo de la clasificación de cuentas y corrientes tributarias en cuencas distintas. (Modificado de Luna, 1964). **Primer orden:** la corriente de primera formación es una cuenta la cual no posee afluentes; **Segundo orden:** la

corriente producto es un tributario, la cual posee por lo menos dos cuentas; **Tercer orden**: el tributario de este orden posee por lo menos dos tributarios de segundo orden.

3.5.1.2. Leyes de Horton

Horton (1945) demostró que el orden de corriente está relacionado con el número de cuentas y tributarios, longitud de canal y el área de drenaje por medio de una simple relación geométrica; esto es, el orden de corriente contra las variables anteriormente mencionadas como rectas en escala semilogarítmica (Figura 21).

Consideremos el sistema fluvial de una cuenca cualquiera, la cual posee un orden máximo de tributarios ψ , siendo u el orden de cualquier segmento y N_u el número de cuentas de orden u . Robert Elmer Horton, considerado como el padre de la hidrología moderna, encontró que si se grafica el $\log(N_u)$ contra u para cualquier sistema fluvial, los datos de iteración dibujan una única línea recta conforme N_u disminuye y u aumenta. De hecho, se ha encontrado que el total de la longitud de corriente o cuenta de un orden dado, es inversamente proporcional.

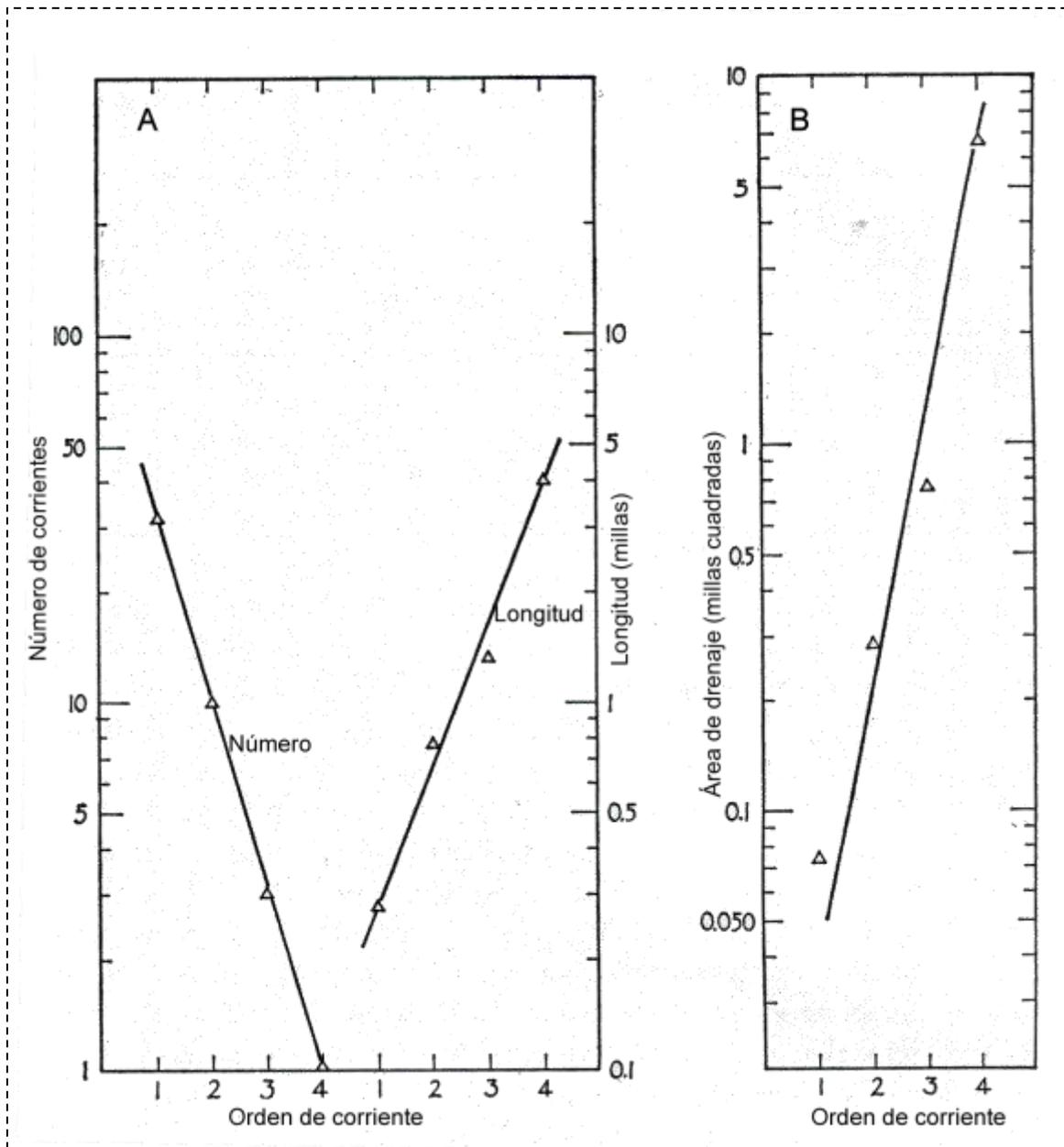


Figura 21. Correlación entre los parámetros de número de corrientes tributarias, longitud del canal, área de drenaje y el orden de corrientes, en escala semilogarítmica. (Luna, 1964).

Como se vio desde un principio, el área de drenaje se incrementa abruptamente en la formación y evolución de tributarios, mientras que la longitud se incrementa continuamente exista o no un incremento en el orden de los tributarios; lo que significa que casi el 50% de las corrientes son tributarios o poseen órdenes superiores ($>2^\circ$). Otra implicación, es la manifestación de la totalidad de área que un orden dado constituye, la cual suele ser menor que el área total ocupada por un orden de menor jerarquía.

Empleando un conteo de los distintos órdenes de corrientes que conforman el sistema fluvial para la cuenca de estudio y capturando los datos en *Excel*, se ordenaron por el grado de corriente, en la misma lista se registró la extensión, entre otros parámetros. Los datos que se obtuvieron se ingresaron al *software Grapher*, donde se crearon las gráficas tanto para corroborar la ley de Horton como para describir la orientación preferencial de las distintas corrientes.

3.5.2. Densidad de drenaje

La forma más simple de la expresión para el cálculo de la densidad del drenaje es la presentada por Leopold (1964), la cual posee la siguiente forma:

$$D_d = \frac{\sum L_u}{A_\psi} \quad (\text{ecuación 7})$$

La expresión anterior lleva como unidades km^{-1} . El número que representa la densidad de drenaje significa el número de canales por unidad de área, o puede interpretarse como una medida de la cercanía entre los canales. Las densidades del drenaje varían en rangos muy dispares según las características del material en el subsuelo, la vegetación, relieve y clima. Visto desde otra perspectiva la densidad de drenaje no es más que el balance de las fuerzas erosivas y de la resistencia de la superficie del terreno.

3.5.3. Tasa de relieve

Schumm (1954) encontró que la tasa de relieve R_h se correlaciona bien con la pérdida anual de sedimentos; tal relación tiene la siguiente forma matemática:

$$\log(\text{pérdida anual de sedimentos}) \sim R_h \quad (\text{ecuación 8})$$

La tasa de relieve posee una fuerte influencia sobre la pérdida de sedimentos debido a la fuerza que esta ejerce sobre la superficie, la cual se relaciona directamente con R_h . Sin embargo se deben considerar otros factores como la lluvia y la cubierta vegetal las cuales afectan tanto positiva como negativamente la pérdida de sedimentos. La representación de la relación de R_h y la pérdida anual de sedimentos para la cuenca en estudio se representa en la Figura 22.

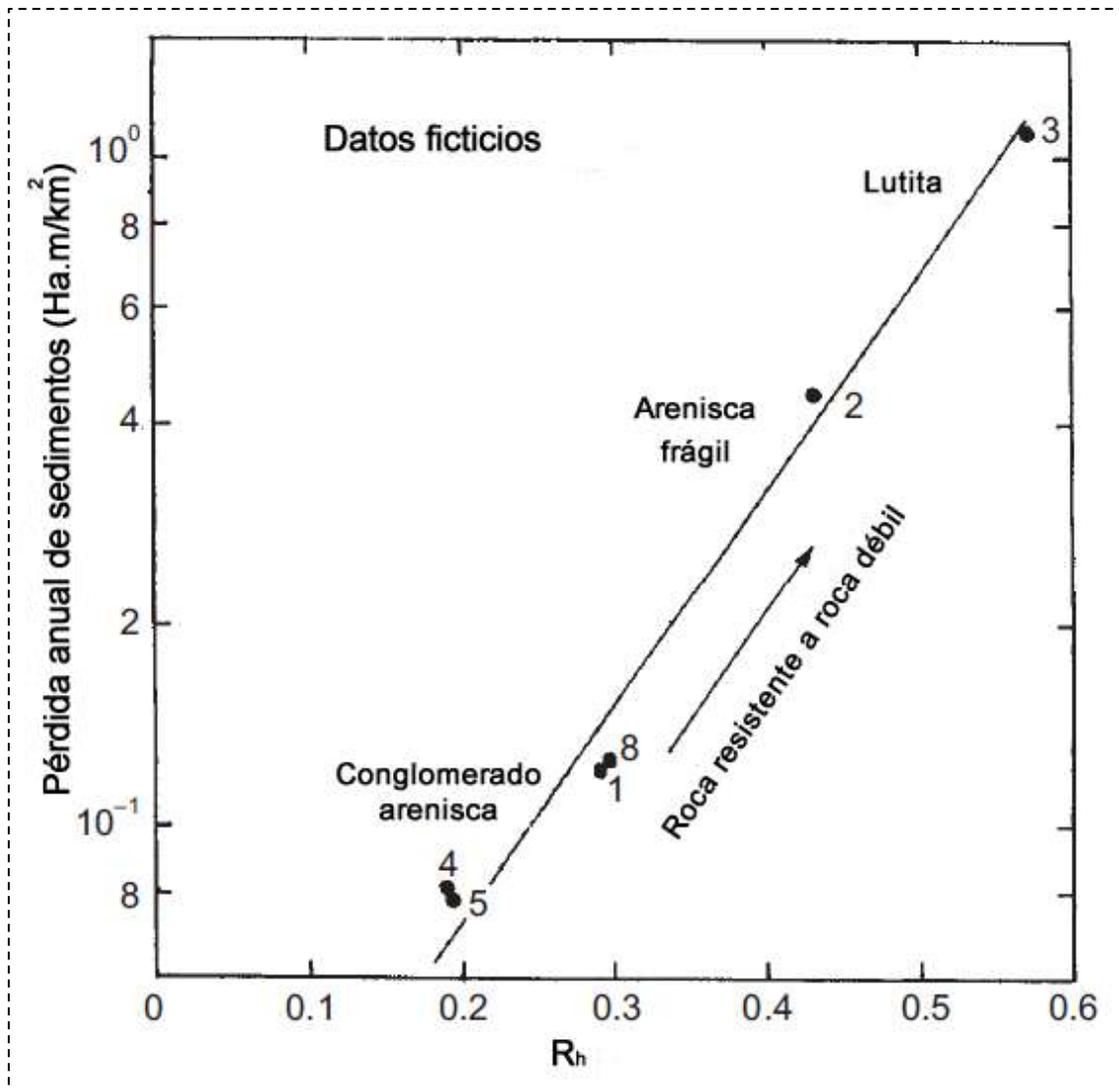


Figura 22. Relación de R_h con la pérdida anual de sedimentos. (Leopold, 1964).

Como el cálculo de R_h no resulta tan evidente o por lo menos no se cuenta con la ecuación directa, se realizó la interpolación de la curva de la Figura 23, con lo cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Y = 2.05R_h - 0.4 \quad (\text{ecuación 9})$$

En la ecuación anterior (Y) representa la pérdida anual de sedimentos; la ecuación posee un coeficiente de correlación de 0.9157, considerada para fines prácticos como buena.

3.5.4. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica puede ser empleada como un indicador de la evolución de la topografía de la cuenca. La curva hipsométrica sirve para indicarnos el grado de madurez o evolución de cualquier cuenca.

$$\int_0^1 f(x)dx \quad \text{donde: } f(x) = \frac{h}{A_m} \quad \text{y } x = A_h/A_\psi \quad (\text{ecuación 10})$$

Donde:

h = altura con respecto a la que se calcula el área de madurez curva hipsométrica

A_m = área integrada de la cuenca con respecto a una altura **h**

A_h = área correspondiente a una altura **h**

A_ψ = área total de la cuenca

La integral básicamente representa la cantidad de roca que resta por erosionar. De aquí se deduce que a la etapa de juventud le corresponden valores altos en la integral, mientras que en la etapa de madurez el valor del área bajo la curva disminuye.

El procedimiento para la construcción de la curva hipsométrica es prácticamente el mismo que el desarrollado para calcular la EMP, solo que en ambos ejes se establecen porcentajes o se normalizan los valores de ambos ejes a la unidad como valor máximo.

Este capítulo presenta los resultados mediante el empleo de los sub-capítulos 4.1 para la presentación de la metodología que se propone y 4.2 para mostrar los resultados de su aplicación.

4.1. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD DEL SISTEMA FLUVIAL DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI

Un Índice de geoindicadores es un sistema coherente de procedimientos integrados a escalas particulares; en nuestro caso la escala de cuenca es suficiente ya que todas las características geomorfológicas son consideradas y explican el comportamiento del sistema fluvial, así como los vínculos que en ella existen. Además, provee una base física con la capacidad de describir y explicar la distribución, los procesos y formas que se crean o evolucionan en el sistema fluvial, así como la capacidad de predecir el comportamiento del sistema durante distintos períodos de su vida.

El índice, aporta recursos suficientes para describir tanto el carácter como el comportamiento del sistema a lo largo de la cuenca, proveyendo una base geomorfológica para evaluar por qué el sistema tiene determinada forma, y cómo evoluciona con el tiempo. El índice de geoindicadores posee una base jerárquica anidada (conjunto de geoformas o ensamble), que se estructura en distintas escalas y que van de mayor a menor como: **cuenca, unidades de terreno, unidades geomorfológicas y unidades hidráulicas.**

- **Escala de cuenca:** establece el tipo y configuración de las unidades de terreno dentro de la divisoria.
- **Escala de unidades del terreno:** controlan el rango y alcance de las unidades formadas a lo largo de los cursos de las distintas corrientes.
- **Escala de unidades geomorfológicas:** Se refiere a las formas de los ríos y a los procesos que las esculpen, se interpretan empleando la construcción de bloques, las cuales provienen de una base para evaluar el comportamiento del río en sus distintas etapas, mediante el análisis de su capacidad y las formas que se asocian a los distintos niveles energéticos o madurez.
- **Escala de unidades hidráulicas:** comprenden áreas físicas de substratos homogéneos, así como el flujo de geoformas anidadas a través de distintas unidades geomorfológicas con origen similar.

El sistema de geoindicadores no es únicamente un resumen cuantitativo del carácter del río, su comportamiento, condición, respuesta frente a distintas presiones y su evolución, ya que éste

proporciona principios guía con la finalidad de evaluar las distintas piezas que componen el sistema fluvial de forma cuantitativa y cualitativa. Lo cual permite una fase posterior para el diseño de un sistema de monitoreo secuencial el cual escapa a los alcances de la presente metodología. La aproximación que se obtiene con la primera etapa de esta metodología es suficientemente flexible y abierta para la interpretación de posibles escenarios en el sistema fluvial.

A un conjunto de geoindicadores, se le denomina índice de geoindicadores; en esta metodología el índice está compuesto por dos etapas (Figura 23); en la primera etapa se identifican, interpretan y elaboran los mapas con las unidades geomorfológicas del río en la cuenca. Mientras que en la segunda etapa, se llevan a cabo tareas encaminadas al diseño de un mecanismo para monitorear el correcto funcionamiento y predicción de los escenarios debido a cambios provocados por las presiones ejercidas sobre el sistema fluvial; esta segunda etapa posee un carácter totalmente administrativo y es planeado y ejecutado por tomadores de decisiones e instituciones encargadas del buen manejo de los recursos naturales.

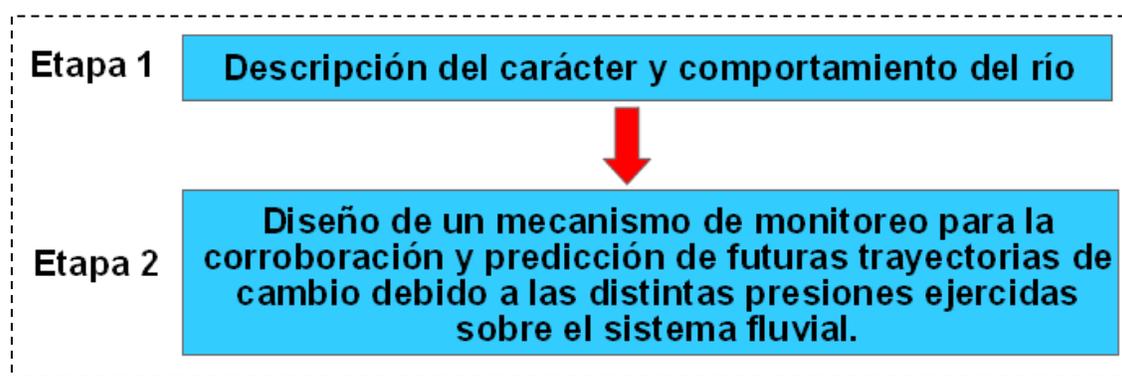


Figura 23. Etapas para la conformación de un índice de geoindicadores.

4.1.1 Etapa 1: Inspección del carácter y comportamiento del río

En esta etapa se evalúa el carácter y comportamiento del río por medio del estudio de la anidación jerárquica asociada al sistema fluvial (Figura 24). La evaluación del carácter y el comportamiento del río, contemplan el contexto como todo aquel fenómeno que sucede dentro de sus límites; así como de las condiciones en las unidades del terreno a distintas escalas, siempre y cuando estén anidadas dentro de la escala de cuenca. Esta primera etapa está conformada por tres pasos, como se presenta en la Figura 25.

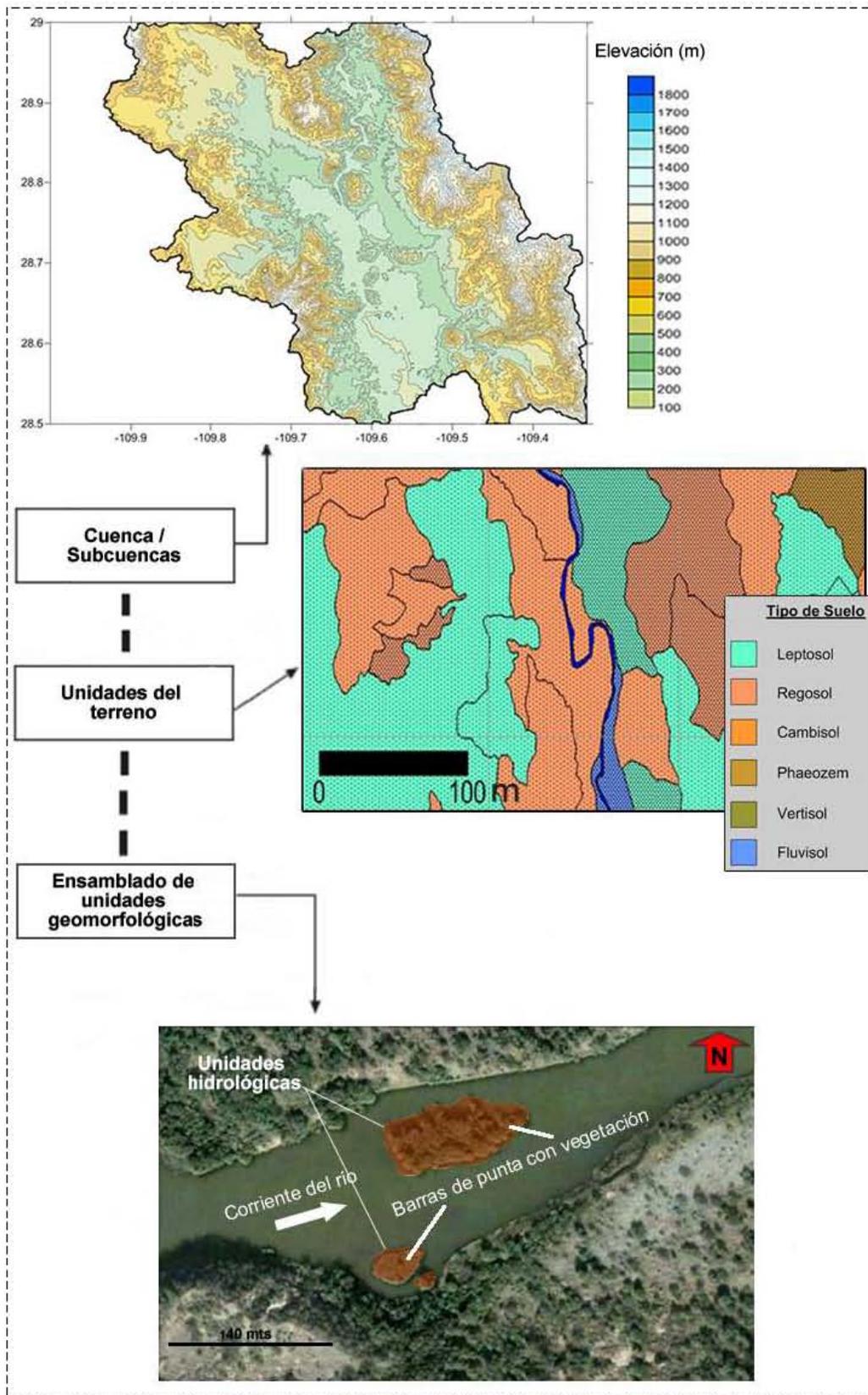


Figura 24. Jerarquía anidada de las unidades geomorfológicas del sistema fluvial.

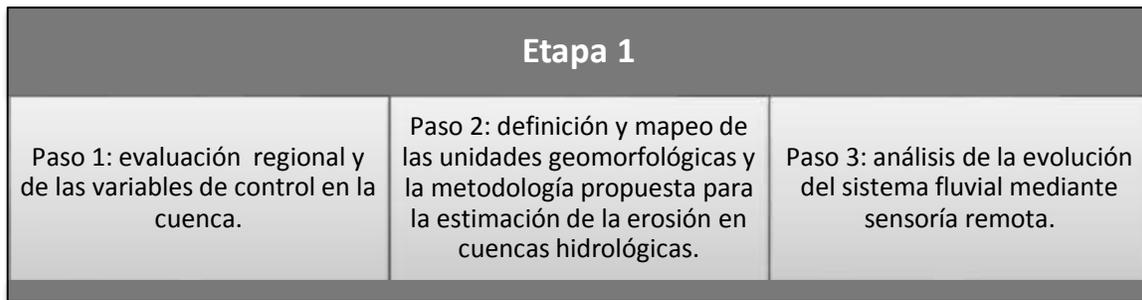


Figura 25. Etapa 1 de la evaluación de las unidades geomorfológicas del sistema fluvial.

4.1.1.1. Etapa 1, paso 1: análisis del escenario regional y de cuenca

El siguiente diagrama de flujo explica los pasos que integran el paso 1 de la etapa 1 de la metodología (Figura 26). El desarrollo de estos pasos se emplea para evaluar a una escala de cuenca las condiciones límite y sus controles con los cuales el sistema fluvial opera; con estos pasos prácticamente se establece el estado del sistema fluvial.

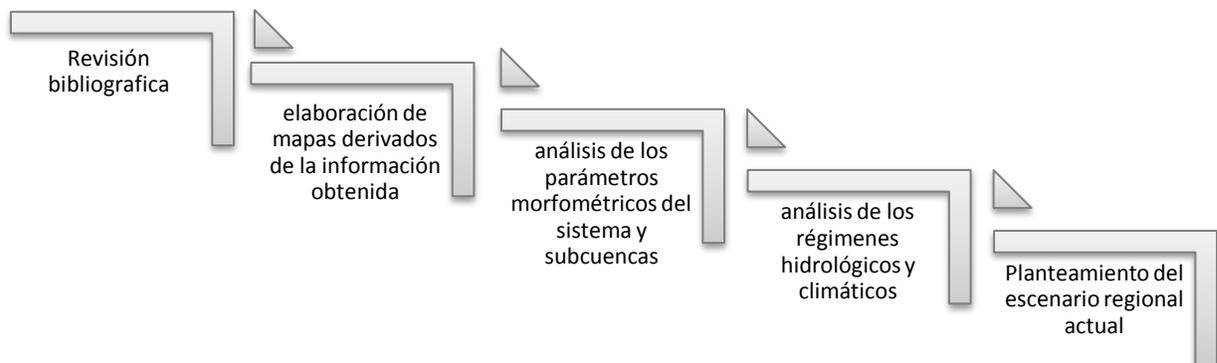


Figura 26. Etapa 1, paso 1: procedimiento utilizado para producir un escenario regional.

4.1.1.1.1. Elaboración de mapas preliminares

Cada unidad del sistema está integrada por el terreno y diversos factores ambientales, los cuales deben ser suficientemente consistentes para mostrar el arreglo de las características y de los procesos que les dan origen. La identificación y mapeo de estas características y procesos se toma como base para describir el carácter fisiográfico, posición del terreno, geología y relieve (Tabla 14), con la finalidad de dotar de significado a los datos que se generan durante todos los pasos que integran la metodología propuesta.

Tabla 14. Parámetros utilizados para identificar las unidades del terreno.

Identificación de características	Significado
Carácter fisiográfico o morfología del terreno	Las características de los patrones de las formas del terreno, los cuales se asocian a controles evolutivos de la cuenca en períodos largos, como son los aspectos tectónicos, estructurales, geológicos, litológicos, ajustes del nivel del mar, condiciones climáticas e hidrológicas, los cuales dictan el carácter de la configuración del valle en los cuales operan los estilos del sistema fluvial.
Posición del terreno	Se refiere al proceso que controla la distribución en la zona e identifica las características de los patrones en las sub-cuencas y la distribución espacial de las geoformas (estilos) en ellos.
Geología	Identifica los controles geológicos en la morfología del terreno y carácter y comportamiento del río, los cuales se manifiestan a través de los controles estructurales y litológicos. Los controles estructurales dictan la geometría y configuración del valle, inducidos por patrones de plegamiento, fallamiento, etc., y los factores asociados para determinar el grado y patrones de disección del terreno. Los controles litológicos determinan la viabilidad y calibre del material, determinado en parte por los regímenes de intemperismo. Estos factores no solo influyen la estructura del río, sino que también afectan su capacidad de ajuste.
Relieve	Las diferencias en el relieve proveen un indicativo del grado en el cual el terreno ha evolucionado, lo cual afecta a la disponibilidad del sedimento y agua en el sistema ribereño.

La elevación, la pendiente longitudinal del valle y el área por altura aportada (curva hipsométrica) son empleados con el fin de describir el nivel de madurez del terreno (Tabla 15). Estos descriptores representan los controles fundamentales en el carácter del río y su comportamiento. En varias instancias, los límites de las unidades del terreno son enmarcados por rasgos distintivos en las pendientes a lo largo de los perfiles longitudinales, los cuales indican los cambios aguas abajo en la anchura del valle y su elevación, lo que resulta en una transición en el ensamble de las UG.

Tabla 15. Descriptores utilizados para caracterizar las unidades del terreno.

Descriptores de las unidades del terreno	Significado
Elevación	La elevación puede ser empleada como un descriptor para explicar la posición del terreno, ya que esta propiedad es un control primario en las condiciones y patrones climáticos. También debe ser tomado en cuenta que la elevación puede ser una variable importante para cada unidad de terreno.
Pendiente del valle	La pendiente es un control primario en la naturaleza y tasas de los procesos geomorfológicos, ya sea en términos del movimiento del agua y/o de los sedimentos en las pendientes, sobre el valle, o entre las conexiones de éstas. La pendiente del perfil longitudinal, es uno de los controles clave en el carácter y comportamiento del río en cada unidad del terreno.
Área por altura aportada	Los cambios significativos en la energía disponible, comúnmente definen los límites entre las unidades del terreno. Este es un control significativo en el carácter y comportamiento de cada estilo del río encontrado por unidad de terreno.

4.1.1.1.2. Análisis de los parámetros morfométricos de la cuenca

Entre estos parámetros se incluyen: los patrones de drenaje, la densidad del drenaje, la forma de la cuenca, potencia de corriente, etc. Estos parámetros sirven únicamente para resaltar las diferencias entre las cuencas o partes dentro de esta (sub-cuencas). Éstos se emplean únicamente con fines de interpretación, aunque en esta metodología solo se describan, no se emplean para señalar la magnitud ni dirección del cambio, ya que uno de los objetivos de esta metodología es evitar la subjetividad del criterio humano; sin embargo sí se emplea para aportar causas o para saber cómo las presiones ejercidas en el sistema impactarán la evolución natural del sistema.

4.1.1.1.3. Presentación de los rasgos regionales

En la actualidad varias zonas de La República Mexicana se encuentran estudiadas por el SGM, institución que posee excelentes estudios de los cuales se puede recuperar una gran gamma de información, entre las anteriormente enlistadas¹³. La finalidad de los puntos anteriores, sirven no solo como punto de referencia y partida, sino que son herramientas útiles a la hora de interpretar y crear modelos de la evolución del sistema fluvial y evaluar la sustentabilidad de éste, e incluso en el diseño de la etapa posterior referente al monitoreo de nuestros indicadores.

En este apartado se incluyen todas las presiones y actividades antropogénicas que pudieran impactar o no el sistema. Ya que para evaluar correctamente el sistema para medir su grado de sustentabilidad, se debe contemplar los aspectos económicos, ambientales y sociales que integran el sistema, por lo menos en su mínima expresión que es, su identificación.

4.1.1.2. Etapa 1, paso 2: definición e interpretación de las unidades geomorfológicas y la metodología propuesta para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas

Las componentes que configuran la vista de planta se diferencian por el grado de su confinamiento, expresadas por la presencia/ausencia y distribución sobre el área ocupada por el sistema fluvial. El análisis del canal principal y de las unidades geomorfológicas provee de una valiosa herramienta para la interpretación y reconocimiento del carácter y comportamiento del sistema fluvial. Al dar una serie de rasgos distintivos a las asociaciones de los procesos y formas en la que se configura el sistema; las unidades geomorfológicas se convierten en un parámetro de interpretación para los ensambles del sistema, siempre y cuando se estudien a una escala apropiada.

Todos estos rasgos pueden ser analizados a lo largo de un rango distintivo de diversos tipos y configuraciones del terreno. Sin embargo, por cuestiones de economía y tiempo, se recomienda identificar aquellas unidades con mayor sensibilidad asociados al cauce principal, desde el punto de control (embalse) hasta la cuenta con el cual posee la mayor longitud.

¹³ Esta serie de estudios se integran en Los Informes Técnicos para cartas geológico-mineras a escalas 1:250,00 y 1:50,000

4.1.1.2.1. Método propuesto para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas

En esta sección de la metodología se estudia la sensibilidad tanto cuantitativa como cualitativa del terreno ocupado por el sistema a ser erosionado. Se realiza un cálculo del volumen a erosionar para un período de un millón de años; sin embargo los resultados se pueden adecuar a magnitudes de escala humana, no superiores a 100 años. La precisión de estos números y de la ubicación de las zonas de sensibilidad, dependen de cuan detallado se realice el estudio y de la escala empleada.

El proceso se presenta de forma sistemática según el diagrama de flujo presentado en la Figura 27.

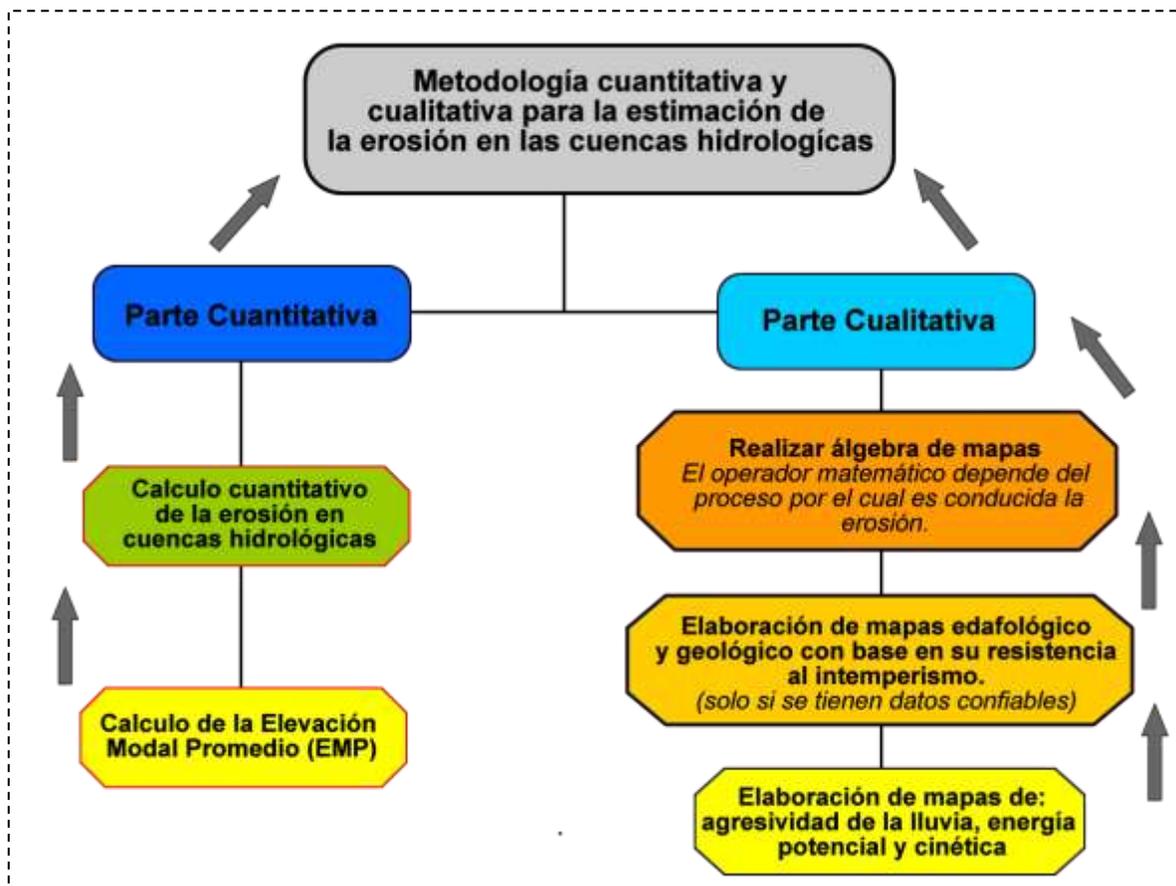


Figura 27. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas. La dirección de las flechas indica el flujo normal del proceso; en esta secuencia se incluyen todos aquellos mapas temáticos que influyen con la erosión presente en los sistemas fluviales, como sería: el estudio de la agresividad de la lluvia, la energía potencial y cinética de las gotas de lluvia. También es importante señalar que si cualquiera de los mapas no posee un carácter congruente o confiable, es mejor no incluir sus datos durante el álgebra de mapas.

4.1.1.2.1.1. Parte cuantitativa

En primera estancia se calcula la Elevación Modal Promedio (EMP) para los modelos de elevación de INEGI para la zona de tesis. La secuencia metodológica a seguir se presenta en la forma que debe desarrollarse:

1. Se conectan los MDE por medio del *software* Global Mapper 13 y se transforman al formato básico *.DEM para su trabajo en IDRISI Taiga.
2. Se importa el *.DEM a IDRISI y se realiza un análisis estadístico con la finalidad de obtener el histograma de frecuencias e histograma de frecuencia acumulada.
3. Se realiza un estudio sobre el área aportada por cada clase en IDRISI.
4. Una vez conocida el área aportada por elevación, se calcula el porcentaje que esta representa, así como el porcentaje acumulado, ordenando las elevaciones de mayor a menor.
5. El último paso es graficar el porcentaje acumulado en el eje de las X y la altitud en el eje de las Y. De esta gráfica se saca una línea perpendicular al eje X en el valor 50 hasta que ésta interseccione con la curva; luego, desde este punto se proyecta una recta perpendicular al eje Y; el valor del punto donde la línea cruza al eje Y, representa el valor de la Elevación Modal Promedio de la cuenca (**EMP**).

Con el valor de la EMP y la Figura 14 del capítulo II, se calcula la tasa de erosión de la cuenca, mediante los siguientes pasos:

1. Se aplican las siguientes fórmulas para determinar la tasa de denudación total (TDT) en metros sobre un millón de años (m/m.a.), mismas que aparecen en la Figura 14 :

$$TDT_1 = 7.21e^{0.0015EMP} (r^2 = 0.79) \quad (\text{ecuación 11})$$

$$TDT_2 = 7.21e^{0.0012EMP} (r^2 = 0.65) \quad (\text{ecuación 12})$$

2. Se determina el promedio del relieve local en metros por medio de la siguiente ecuación:

$$PRL = 42.2 + 0.338 EMP (r^2 = 0.721) \quad (\text{ecuación 13})$$

3. Para estimar el volumen de material a erosionar, se multiplica el resultado de las ecuaciones 11 y 12 por el área (km²) del sistema fluvial.
4. Para obtener la masa de material a erosionar, es necesario que el volumen de desgaste se multiplique por la densidad de la roca más abundante (o un promedio de todas las que conforman el área de estudio).

4.1.1.2.1.2. Parte cualitativa

Los mapas de la agresividad de las lluvias, energía potencial y cinética, se elaboran según los pasos que se enlistan:

1. Se recuperan los datos ASCII o XYZ de los modelos digitales de elevación, con la finalidad de emplear el valor de la elevación (**Z**) para calcular la energía potencial y cinética.
2. La energía potencial (**EP**) se calcula restando la elevación del terreno a la altura a la cual se localizan las nubes (nimbos) causantes de las lluvias. Por tanto, se resta a esta elevación el valor Z de cada punto que constituye el MDE para la zona comprendida por el sistema fluvial.
3. Se emplea la siguiente ecuación:

$$EP = 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot (1,800 - Z) \cdot 0.000065kg \quad (\text{ecuación 14})$$

9.81 m/s² se refiere a la gravedad y 0.000065kg a la masa de una gota de agua promedio (Humphreys, 1964).

4. Se calcula la energía potencial: los pasos y fórmulas a emplear son:
 - Para el cálculo del tiempo de caída de las gotas

$$t = \sqrt{\frac{2(EP)}{9.81 \frac{m}{s^2}}} \quad (\text{ecuación 15})$$

- Para el cálculo de la velocidad de choque de las gotas

$$vc = t \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \quad (\text{ecuación 16})$$

- Se corrige el cálculo de la velocidad, debido a la velocidad del viento (**vc2**) para la zona de estudio, mediante la siguiente ecuación:

$$vc2 = \sqrt{vc^2 + v_{viento}^2} \quad (\text{ecuación 17})$$

5. Se calcula la energía cinética (**EC**) como sigue:

$$EC = \frac{1}{2} \cdot 0.000065kg \cdot vc2^2 \quad (\text{ecuación 18})$$

Para elaborar el mapa de agresividad de la lluvia es necesario conocer previamente el promedio mensual (**p**) más alto conocido registrado por una estación meteorológica de precipitación, así como el promedio anual (**P**) más alto. Lo que sigue es realizar el cálculo de la agresividad como sigue:

$$\text{agresividad} = \frac{p^2}{P} \quad (\text{ecuación 19})$$

La consideración de los mapas edafológicos y geológicos su resistencia o debilidad frente al intemperismo, y su relación con los procesos erosivos pueden estar sujeto a cierta subjetividad, a menos que se obtengan los datos de las tasas de producción de sedimentos de una base de datos suficientemente amplia para condiciones similares a la cuenca que se estudia. Otra alternativa sería la obtención de estas tasas en el campo.

Con los mapas generados se obtienen los puntos de vulnerabilidad del sistema fluvial para cada uno de los aspectos que se estudia, por lo que llevar a cabo el álgebra de los mapas puede no ser necesario, ya que el sistema está sujeto a fluctuaciones en las que estas condiciones se encuentran en mayor o menor medida afectando o interactuando con el sistema. Por otra parte, el análisis con sensoría remota cubre plenamente este punto, por lo que el manejo de estos mapas cualitativos en función del tiempo, pueden ser empleados para explicar los cambios registrados por el análisis de sensoría remota.

4.1.1.2.2. Procedimiento para identificar e interpretar las unidades geomorfológicas ensambladas en el río, mediante sensoría remota

Los análisis del carácter, distribución e historia de las unidades geomorfológicas a través del río proveen claves para explicar el comportamiento de las unidades geomorfológicas, mismas que deben ser evaluadas en términos de su forma y medida, lo cual puede ser realizado mediante el análisis de imágenes de distintas fechas; es importante considerar la resolución de las imágenes, ya que entre mayor sea ésta, mayor sensibilidad se puede adquirir y por tanto indicar mejor los cambios que sufre el sistema.

Se emplea la técnica de clasificación libre en el *software* IDRISI; la herramienta que realiza esta clasificación utiliza los picos (son los valores del pixel con la mayor frecuencia) del histograma con los valores de los pixeles por cada banda que comprende el paquete de imagen Landsat empleada. Debido a que esta técnica posee criterios específicos para la identificación de los picos en los histogramas, no se tiene que hacer estimaciones previas (como se necesita en algunas otras técnicas) sobre el número de grupos que una imagen contiene, ya que esta herramienta no solo lleva a cabo la operación sino regresa el número de *clusters* encontrados y el porcentaje que éstos ocupan en el área estudiada.

La finalidad de este proceso es la clasificación de las firmas encontradas en la combinación de las bandas que componen el paquete de imagen Landsat para determinadas fechas, a la vez que se

obtiene una cantidad de información rápida y acertada sobre la ubicación de éstas en el área de estudio.

Se emplea la técnica de límites de dispersión, con el cual se establecen los límites inferior y superior respecto de la variación normal, más allá de la cual podemos considerar un cambio verdadero al ocurrido en nuestras imágenes. Las imágenes recomendadas para este tipo de análisis deben ser tratadas con un clasificador tipo *brand*, con un *Cluster* para 30 clases.

Para evaluar la probabilidad de que ciertas diferencias existan en el mundo real, se puede medir las características de la dispersión de los valores alejados a la media. Por tanto, la media y la desviación estándar son utilizadas para aislar cambios inusuales. Para crear los límites de dispersión, se toma en cuenta la media y se le sustrae tres veces el valor de la desviación estándar, obteniendo como resultado el límite inferior (**LI**). Por otra parte, al sumar tres veces la desviación estándar obtenemos el límite superior (**LS**). Por medio de este procedimiento, aislamos los valores más inusuales; los cuales indican los cambios significativos del sistema.

$$LI = Media - 3\sigma \quad (\text{ecuación 20})$$

$$LS = Media + 3\sigma \quad (\text{ecuación 21})$$

Debido a la naturaleza de las imágenes empleadas para su estudio (muy poca resolución), se ha modificado la fórmula para acentuar los cambios, modificando los límites inferior y superior como sigue:

$$LI = Media - 2.5\sigma \quad (\text{ecuación 22})$$

$$LS = Media + 2.5\sigma \quad (\text{ecuación 23})$$

Se realiza una reclasificación de los valores, asignando el valor de 1 para los valores menores que **LI**, 0 a los valores entre **LI** y **LS**, y finalmente el valor de 2 a los valores mayores que **LS**. Con esta reclasificación se produce un mapa, ubicando los cambios según su clasificación en los límites de cambio superior e inferior.

4.1.1.3. Etapa 1, paso 3: Análisis de la evolución del sistema fluvial mediante sensoría remota

Los controles de mayor influencia sobre el comportamiento del río varían conforme cambian las condiciones del terreno. La síntesis de los patrones encontrados siempre evoluciona en el sentido

de la corriente, lo cual provee un modelo útil para la administración y manejo del sistema fluvial a escala de subcuencas en un marco físicamente similar. El papel crítico de los cambios, es explicado en relación a las características geológicas (estructura y litología) e historial del terreno. Lo cual se manifiesta en las unidades del terreno a una escala de cuenca y menores, sin embargo, no siempre resulta útil analizarlas con mayor detalle, pues esta propiedad depende del fin que se persiga o el enfoque y percepción de sustentabilidad que se tenga en ese momento.

Esta forma de evaluación provee una condición de referencia asociada a la estructura geomorfológica en función de las distintas corrientes, y de su asociación con los distintos ensambles del sistema fluvial. Esta es una forma de evaluar el sistema como tal, mediante la vectorización de los cambios en función del tiempo y convirtiendo este **vector cambio** en el geoindicador principal o global. El empleo de la vectorización elimina el aporte de subjetividad que poseen los métodos convencionales que emplean la clasificación o el criterio experto para asignar valores de representatividad de las variables que configuran un sistema, con la finalidad de verificar únicamente aquellas con las mejores calificaciones. O de aquellas metodologías que emplean el uso de matrices, alimentadas previamente de valores, los cuales poseen cierto grado de subjetividad.

4.1.1.3.1. Procedimiento para crear el vector cambio

Se conoce con el nombre de regresión lineal de imágenes a la técnica empleada para corregir la media y la variación en las imágenes que se suponen son derivadas o poseen herencia de imágenes posteriores. La regresión determina la relación entre variables que intervienen en la evolución de la misma. Esta técnica provee una simple regresión lineal para determinar las relaciones existentes entre los datos, ya sea entre dos imágenes o archivos matriciales de valores. Con la regresión de imagen, se asume que la imagen posterior (t_{n+1}) es una función de la imagen de un momento anterior (t_n). La imagen t_n representa la variable independiente, por tanto, la imagen t_{n+1} representa la variable dependiente.

El resultado de este método es una gráfica de valores individuales por píxeles que utiliza dos fechas, como los ejes X y Y. La ecuación de la regresión puede por tanto, ser utilizada para calcular o crear una imagen predictiva para la imagen t_{n+1} basada en los datos de la imagen t_n . La imagen construida es esencialmente la imagen t_n , pero ajustada a las diferencias en la variación, la media de los valores de t_n . En otras palabras, la imagen ajustada (t_{na+1}) posee como base la ecuación resultante de la regresión.

Una vez ajustada la imagen, se sustraen sus valores de la imagen t_{n+1} para obtener la diferencia entre ambas imágenes, con lo cual se genera una imagen que puede ser delimitada de forma directa. La variable independiente es la imagen t_n , mientras que la dependiente es por tanto la imagen más reciente.

La frecuencia de los pixeles está indicada en una gráfica de dispersión, la cual posee la línea de mejor ajuste para dicha dispersión. La ecuación de esta línea está representada por la ecuación normal de una recta ($y = mx + b$), junto con un coeficiente de correlación (r) y su descripción estadística.

Las imágenes t_{na+1} se crean con base en la siguiente ecuación:

$$t_{na+1} = ([t_n] * m) + b \quad (\text{ecuación 24})$$

Una vez creadas las imágenes t_{na+1} , éstas se utilizan para calcular una nueva imagen basada únicamente en las diferencias entre ellas. Siendo la sintaxis de la dinámica a seguir la siguiente ecuación:

$$t_{n+1} - t_{na+1} \quad (\text{ecuación 25})$$

El procedimiento de límites de dispersión es empleado nuevamente para crear imágenes “corregidas”. Las cuales se reclasifican nuevamente para las imágenes de la diferencias entre las imágenes t_{n+1} y t_{na+1} , en base a 3σ como sigue:

$$\begin{cases} 1 = < -3\sigma \\ 0 = -3\sigma \text{ a } 3\sigma \\ 2 = > 3\sigma \end{cases}$$

La regresión de imágenes es una técnica efectiva para sortear lo que se conoce como efectos de “compensación o ganancia” entre imágenes. Estos efectos se deben a las diferencias de la imagen captada por los sensores del satélite en dos fechas distintas; la compensación se refiere a un cambio en la media de los valores de los pixeles de la imagen, mientras que una ganancia se refiere a un cambio en la pendiente de los mismos valores, si se analiza la imagen estadísticamente como se presentó anteriormente. Sin embargo, la escala es fundamental y para nuestro propósito no funcionan las escalas utilizadas, por lo que el análisis no es considerado dentro del trabajo, pero se recomienda su empleo.

El análisis vectorial del cambio permite explorar como un vector, la magnitud y dirección del cambio o evolución del sistema fluvial (Figura 28). La diferencia entre los pixeles puede ser expresado como una distancia entre éstos en el espacio, cuya fórmula es:

$$D = \sqrt{(B_{a2} - B_{a1})^2 + (B_{b2} - B_{b1})^2} \quad (\text{ecuación 26})$$

donde:

D = distancia

B = banda

a,b = se refiere al número de bandas que componen el paquete de imágenes Landsat

1 y 2 = se refiere al tiempo o fecha de adquisición de la imagen Landsat

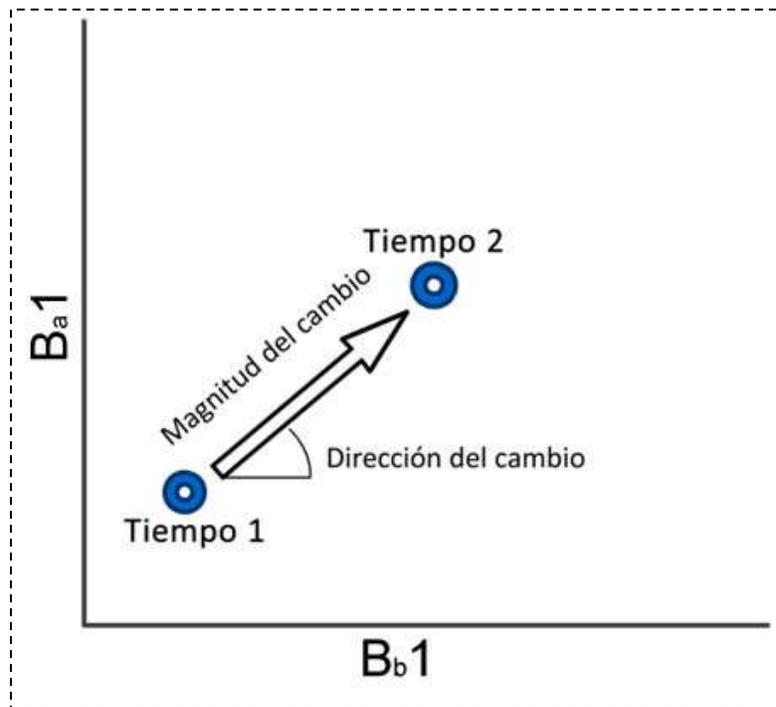


Figura 28. Esquema del vector cambio para los períodos 1 y 2.

A partir de los datos estadísticos, se crean nuevos valores límites superiores e inferiores para los cambios encontrados, con los mismos criterios que se han empleado hasta ahora. Sin embargo para el contexto actual, no tiene ningún sentido considerar los límites inferiores en la distribución ya que éstos se relacionan con cambios pequeños en magnitud y/o posibles errores e interferencias en los satélites. Debido que se quiere resaltar los cambios, es conveniente emplear únicamente los valores altos de la distribución, los cuales representan los cambios significativos del análisis. Finalmente con la información de los límites superiores y aplicándola en un álgebra de mapas, es posible reconocer o clasificar nuestra imagen en áreas con cambios y sin cambios significativos.

Es importante señalar que existe un sinnúmero de factores que afectan la interpretación y conclusiones con respecto a las técnicas empleadas en este análisis; sin embargo, nos dan una idea de cómo evoluciona el sistema. El grado de confiabilidad que se le asigne a estos análisis depende siempre del análisis de campo o de la verificación de los modelos y sus resultados. Por tanto, si conocemos con certeza algunos de los cambios que han ocurrido en algunos lugares, entonces se puede determinar e interpretar con seguridad aquellos cambios que sean observados o arrojados por las imágenes y/o tablas que se generan por medio de los sistemas de información geográfica que sean empleados.

4.1.2 ETAPA 2: DISEÑO DEL MECANISMO DE MONITOREO PARA COMPROVACIÓN Y PREDICCIÓN DE CAMBIOS DEBIDO A LAS PRESIONES EJERCIDAS SOBRE EL SISTEMA FLUVIAL

Esta etapa de la metodología escapa a los fines que persigue este trabajo, pues depende de los tomadores de decisiones e instituciones encargadas de administrar los recursos naturales quienes han de diseñar, implementar y dar seguimiento a las acciones propuestas en esta etapa. Por esta razón no se desarrolla esta etapa de la metodología.

Unicamente se sugiere continuar con el empleo de la sensoria remota para cuantificar los cambios realizados en los sistemas fluviales y la direccion en la que estos evolucionan.

4.2 RESULTADO DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

4.2.1. Evaluación regional y de las variables de control en la cuenca

4.2.1.1. Mapas preliminares

De la información recabada de la revisión bibliográfica, se generan mapas relacionados con el contexto del sistema fluvial que influye en la determinación de su funcionamiento. Cabe señalar que todos los mapas han sido elaborados a partir de la consulta de bases de datos y de información publicada en informes técnicos, artículos, etcetera.

Se anexa el **Mapa 1**, que recoge el análisis del drenaje de la cuenca.

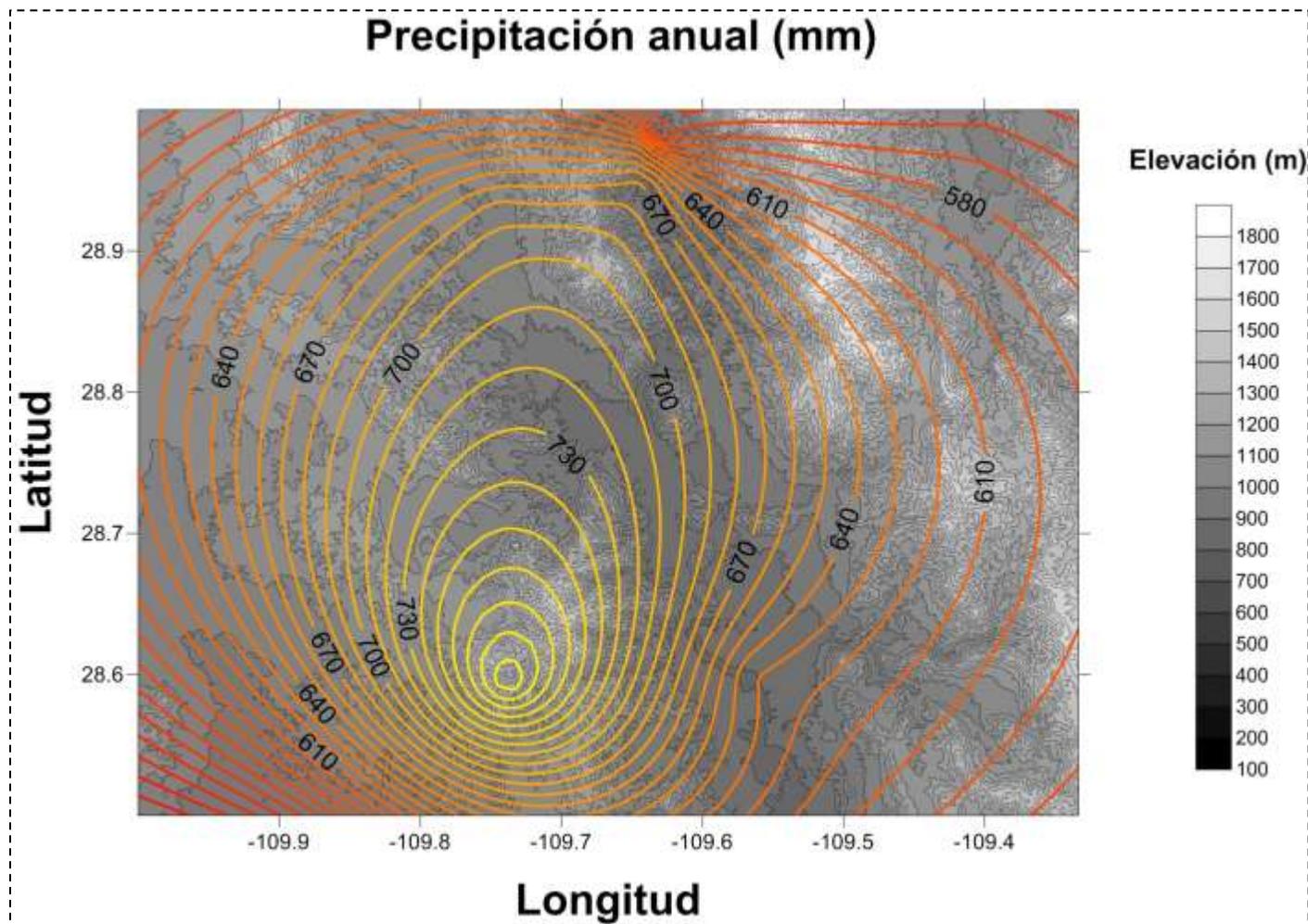


Figura 29. Mapa de la precipitación anual (mm), elaborado a partir de datos de la CNA. Este mapa representa el modelo de elevación de la zona de estudio en escala de grises, mientras que el promedio anual de precipitación se presenta en isolíneas que van del color amarillo (mayor cantidad) al naranja (menor cantidad). Los datos se trataron en paquetes de datos por estaciones climatológicas de las cuales se tomaron los promedios según el año de registros disponibles.

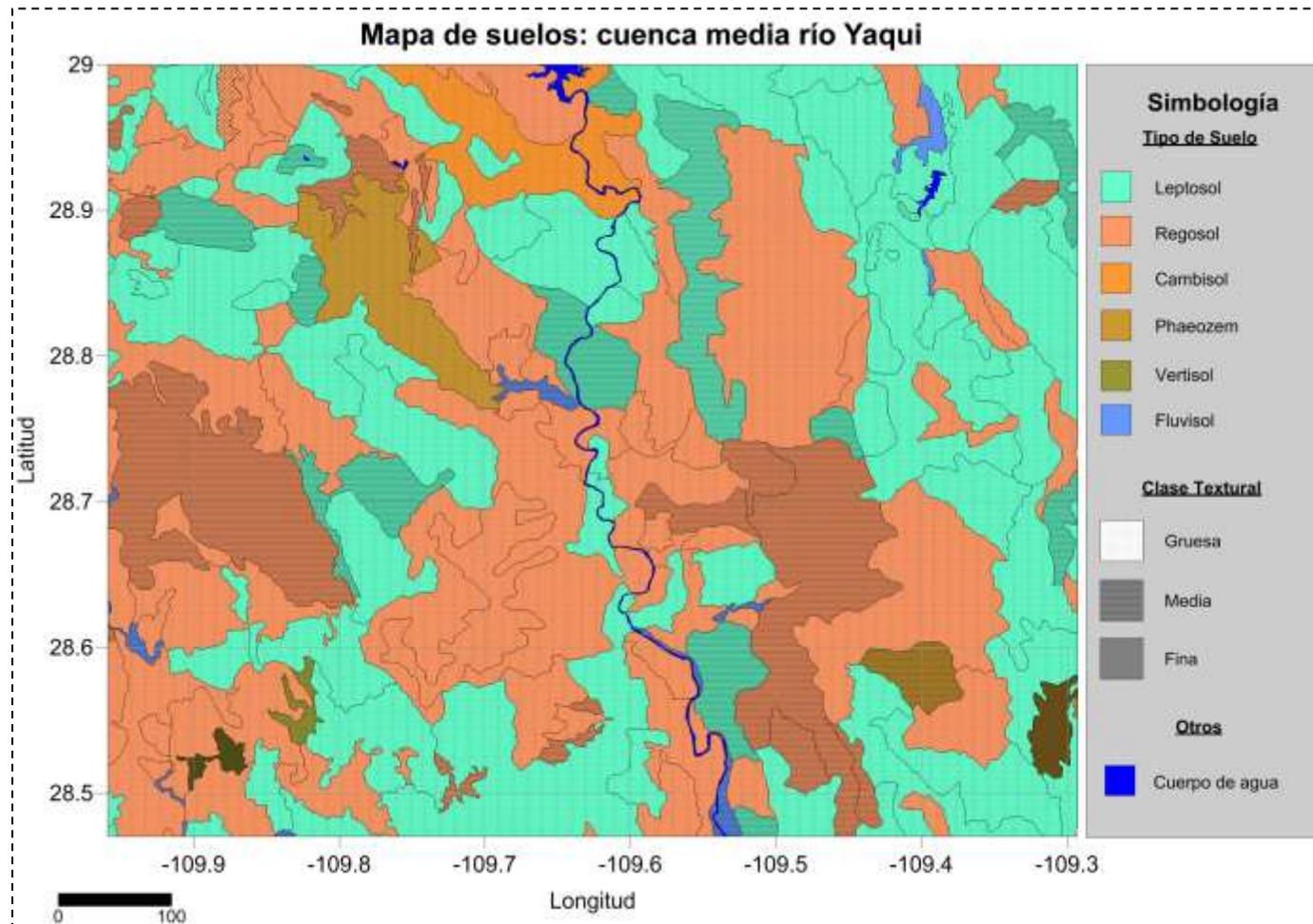


Figura 30. Mapa edafológico de la cuenca media del río Yaqui, elaborado a partir de datos vectoriales de INEGI serie II. La importancia de este mapa radica en que cada tipo de suelo posee una resistividad distinta a ser erosionado y por tanto modifica o agrega factores para encontrar los puntos de vulnerabilidad del sistema fluvial que compone. Cabe señalar que la información de partida para la elaboración de este mapa es un tanto difusa debido a la nomenclatura de los suelos y la serie de las cuales se obtuvo la información ya que difiere de la serie I y II de INEGI. Sin embargo, se trató de mantener los datos correspondientes a la serie I debido a la familiaridad de la nomenclatura.

Configuración Meteorológica de la cuenca media del río Yaqui.

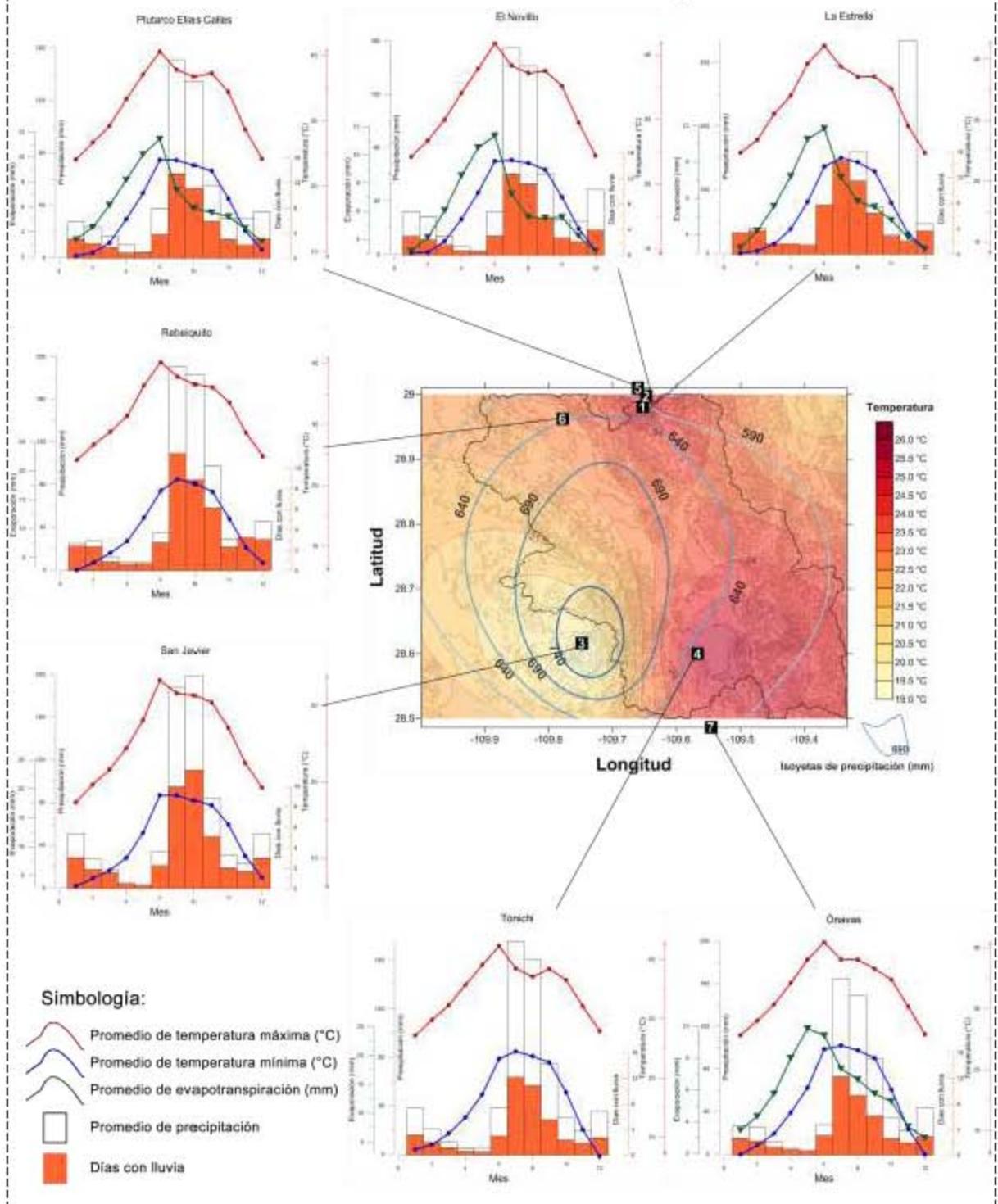
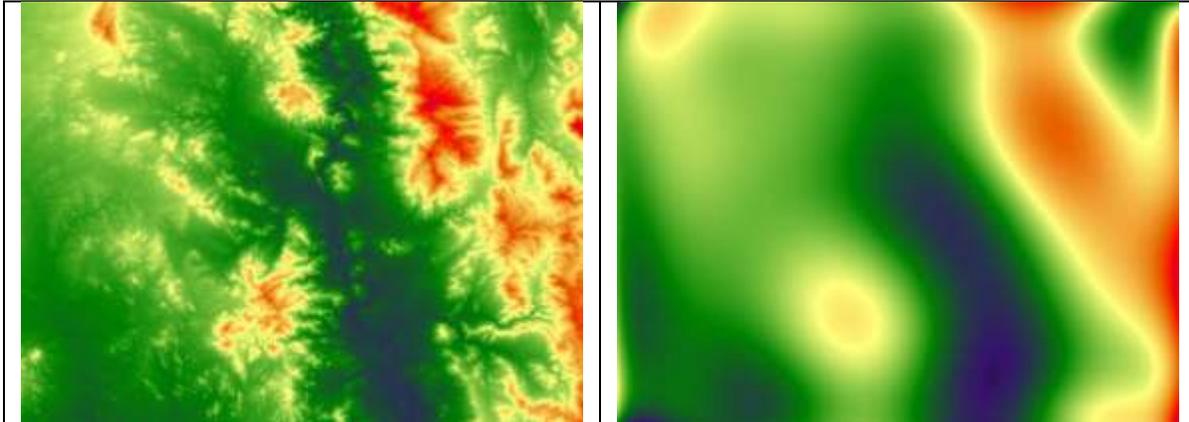


Figura 31. Esta figura ubica las estaciones meteorológicas consultadas de la CNA y contrasta los datos de temperatura máxima y mínima, así como la evapotranspiración, precipitación promedio y días con lluvia.

4.2.1.2 Análisis de los parámetros morfométricos del sistema y subcuencas

En este apartado se muestra lo referente a la geomorfología desde un aspecto cuantitativo. La Figura 32 muestra el MDE del terreno y su aproximación numérica; la cual pudiera integrarse a un sistema numérico para explicar por medio de una ecuación todos los mecanismos que se desarrollan o se modifican en el sistema fluvial.



La ecuación representativa para el modelo de elevación original, pertenece a un orden de ajuste de noveno grado (9°) con los siguientes coeficientes $b_0=93.8548$, $b_1=9.5292$, $b_2=6.355$, $b_3=-0.0364$, $b_4=-0.0539$, $b_5=-0.0302$, $b_6=0$, $b_7=0.0002$, $b_8=0.0001$, $b_9=0.0001$ y de b_{10} - $b_{53}=0$. Se tiene una bondad de ajuste (R^2) de 70.43%. El tipo de ecuación que esto representa en su forma general es la siguiente: $Z = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i b_{ij} X^{i-j} Y^j$, donde k es el grado 9; de forma desarrollada la ecuación queda como sigue: **$Z = 93.8548 + 9.5292X + 6.355X^2 + 0.0364XY - 0.0539Y^2 - 0.0302 X^3 + 0.0002XY^2 + 0.0001Y^3 + 0.0001X^4$**

Figura 32. Modelo matemático que se ajusta el MDE de INEGI; elaboración con el software IDRISI Taiga. La importancia de este modelo radica en la simplificación del terreno a una ecuación de 9o grado con la cual es posible predecir cambios importantes en cuanto a los patrones de cuenca y la erosión. Sin embargo escapan a los propósitos de esta tesis, pero se plantea la posibilidad de construir un modelo matemático unificador de la evolución o de las respuestas del sistema fluvial con base en la magnitud y dirección de las presiones ejercidas sobre este, sean de origen antropogénico o natural.

La evolución de las cuencas no solo depende de los procesos que sucede en ellas, también se ven influenciadas por la configuración del estado anterior que influyen su subsecuente desarrollo o evolución, como podría serlo la configuración litológica y estructural de la zona o del sistema fluvial. Todo esto ayuda a crear un modelo de “estado probable”, el cual debe de satisfacer los requerimientos o leyes físicas y, de ahí que éste sea ajustado o alterado por un estado de **desequilibrio**. Este modelo permite crear escenarios probables a partir de los resultados o tendencias que muestren los geoindicadores para crear perspectivas a partir de éstos. Por ejemplo, en la Tabla 16 se muestra la evolución “natural” de la cuenca a través de 10 millones de años.

Tabla 16. Descripción y representación estadística de la evaluación natural del terreno donde se localiza la cuenca que se estudia y su evolución en 10 millones de años. La revisión estadística se presenta en base a las elevaciones (Z) que conforman el MDE del área de estudio. El estudio considera la elevación actual del mar; por lo que de no fluctuar éste en 10 millones de años, el punto más bajo del área de estudio estará 4.5 m por debajo del nivel del mar.

Explicación	Estadística														
<p>Esta descripción estadística corresponde a la configuración actual de la cuenca.</p>	<p style="text-align: center;">Z</p> <hr/> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>Minimo:</td> <td style="text-align: right;">159.996858034</td> </tr> <tr> <td>Maximo:</td> <td style="text-align: right;">1670.40826326</td> </tr> <tr> <td>Media:</td> <td style="text-align: right;">626.54984446</td> </tr> <tr> <td>Mediana:</td> <td style="text-align: right;">588.331916875</td> </tr> <tr> <td>Varianza:</td> <td style="text-align: right;">67649.5443673</td> </tr> <tr> <td>Desviación Estandar:</td> <td style="text-align: right;">260.095260178</td> </tr> <tr> <td>Rango:</td> <td style="text-align: right;">1510.41140523</td> </tr> </table> <hr/>	Minimo:	159.996858034	Maximo:	1670.40826326	Media:	626.54984446	Mediana:	588.331916875	Varianza:	67649.5443673	Desviación Estandar:	260.095260178	Rango:	1510.41140523
Minimo:	159.996858034														
Maximo:	1670.40826326														
Media:	626.54984446														
Mediana:	588.331916875														
Varianza:	67649.5443673														
Desviación Estandar:	260.095260178														
Rango:	1510.41140523														
<p>Según el modelo que se está empleando para la estimación cuantitativa de la erosión, la cuenca media del río Yaqui, en 10 millones de años poseería la siguiente descripción estadística.</p>	<p style="text-align: center;">Z</p> <hr/> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>Minimo:</td> <td style="text-align: right;">-4.5031419408</td> </tr> <tr> <td>Maximo:</td> <td style="text-align: right;">1505.90826349</td> </tr> <tr> <td>Media:</td> <td style="text-align: right;">462.049844462</td> </tr> <tr> <td>Mediana:</td> <td style="text-align: right;">423.831916531</td> </tr> <tr> <td>Varianza:</td> <td style="text-align: right;">67649.5443668</td> </tr> <tr> <td>Desviación Estandar:</td> <td style="text-align: right;">260.095260177</td> </tr> <tr> <td>Rango:</td> <td style="text-align: right;">1510.41140543</td> </tr> </table> <hr/>	Minimo:	-4.5031419408	Maximo:	1505.90826349	Media:	462.049844462	Mediana:	423.831916531	Varianza:	67649.5443668	Desviación Estandar:	260.095260177	Rango:	1510.41140543
Minimo:	-4.5031419408														
Maximo:	1505.90826349														
Media:	462.049844462														
Mediana:	423.831916531														
Varianza:	67649.5443668														
Desviación Estandar:	260.095260177														
Rango:	1510.41140543														

Las formas resultantes que en la actualidad poseen las cuencas, son consecuencia de los procesos exógenos, los cuales pueden ser representados con curvas hipsométricas. El empleo de estas curvas se considera un índice interesante para describir la posible evolución de las formas terrestres. Al tratar con ríos o cuencas es mejor considerar que éstas poseen características del estado de configuración anterior, ya que cada estado es el producto de la evolución continua del sistema fluvial a través del tiempo.

El análisis del patrón de drenaje del sistema fluvial obtenido pertenece a un sistema de 5° grado, con una red de drenaje predominantemente del tipo dendrítico. Los parámetros de la cuenca se resumen en la Tabla 17 y la Figura 33 refleja el grado de madurez de la cuenca y por tanto los rasgos morfométricos **(Ver Mapa 1)**.

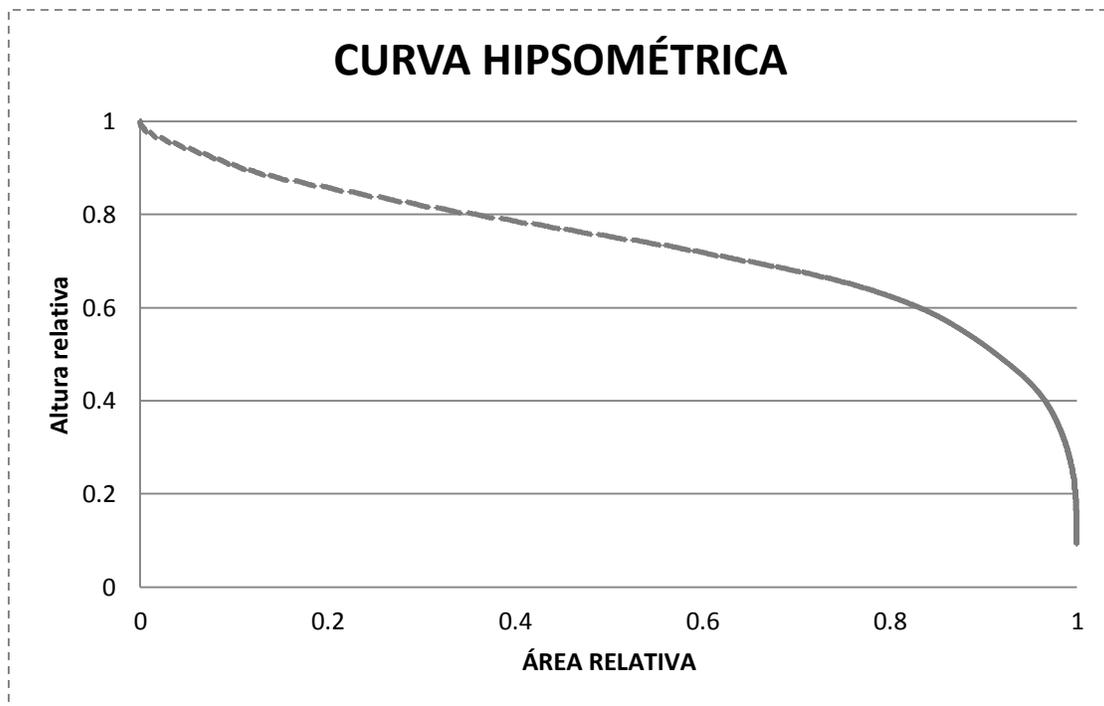


Figura 33. La curva hipsométrica de la cuenca en estudio corresponde a una etapa de transición entre lo que sería una cuenca geológicamente joven y una cuenca geológicamente madura, o que ha tenido una presión o disturbio reciente. De esta gráfica se determina que la cuenca posee rasgos de lo que podría llamarse un estado transitorio hacia la madurez.

Tabla 17. Tabla con la síntesis interpretación de los principales valores o descriptores geomorfométricos del sistema fluvial para la cuenca media del río Yaqui.

Parámetro	Valor	Interpretación
Densidad de drenaje	0.4733	El valor obtenido se asocia al grado de madurez y la pendiente de la cuenca, el número corresponde a una etapa de madurez y una pendiente suavizada, sin embargo pueden existir puntos según la litología donde la densidad aumente o disminuya.
Grado de desarrollo de la cuenca	5to orden	Este orden indica que existen zonas con corrientes tributarias que se incorporan al canal de mayor orden, de las cuales por lo menos dos son de 4° y dotan de simetría al sistema; lo cual se explica por medio de las variaciones litológicas.
Longitud total del drenaje	949.5196 km	Este valor se refiere a la suma de todo el drenaje inscrito en los

		límites de la cuenca para la escala planteada.
Numero de corrientes de: 1er orden 2do orden 3er orden 4to orden 5to orden	202 44 12 3 1	Estos parámetros se emplean únicamente para determinar las tazas de madurez de manera global en la cuenca, sin embargo se desarrolla mejor su explicación según las Leyes de Horton, las cuales se cumplen en el análisis de este sistema fluvial y que se desarrollan al finalizar esta tabla.
Longitud aportada por corrientes de: 1er orden 2do orden 3er orden 4to orden 5to orden	504.72 km 240.72 km 109.94 km 57.21 km 36.83 km	
Longitud promedio por orden de corriente: 1er orden 2do orden 3er orden 4 orden 5to orden	2.498 km 5.473 km 9.162 km 19.07 km 36.83 km	Estos valores se obtienen con la finalidad de consolidar un modelo de evolución para el sistema fluvial con base en un sistema conjugado del modelo de elevación mismo que se presenta en el apartado anterior.
Ecuación que representa la relación de orden y longitud aportada	$Y = 40.37X^2 - 354.1X + 808.3$ $R^2 = 0.993$ <p>X = orden de corriente Y = aporte en km</p>	Esta ecuación demuestra el comportamiento y carácter de los distintos órdenes de corriente, los cuales poseen un origen hipotético a una altura de 808.3 metros, es decir, es la altura en la que se crea la primera cuenta. Esta altura se obtiene de la regresión numérica para determinar la longitud aportada por cada orden de corriente y que posee un ajuste del 99.3%.
Ecuación que representa el comportamiento del drenaje de la cuenca y regresa el promedio por el grado de la red del drenaje.	$Y = e^{0.741X}$ $R^2 = 0.98$ <p>X = orden de corriente Y = promedio de la corriente en km</p>	Esta ecuación muestra el promedio de la corriente aportada según su orden de corriente; se plantea esta ecuación porque se puede esperar una representación virtual de una corriente inexistente con mayor probabilidad de que suceda de dicha forma, por lo menos con un 50% de certeza.
Área de cuenca	2006.3 km ²	Es la superficie abarcada por la cuenca, se considera como una cuenca de tamaño considerable, sin embargo es muy relativo el tamaño porque su delimitación depende de la unidad mínima de

		análisis en el MDE.
Perímetro de cuenca (Pc)	364.0 km	El perímetro se refiere al contorno de la cuenca.
Pendiente general de cuenca (S)	0.2797	Se considera a ésta una pendiente suave, sin embargo existen lugares en donde esta pendiente es más abrupta o más suave.
Longitud máxima	62.41 km	Se refiere a los puntos que guardan más distancia dentro del perímetro de la cuenca; este número no dice nada por sí mismo, sin embargo es muy útil para determinar los cambios en la pendiente y en la capacidad de erosión de las cuales se dispone para la construcción del drenaje.
Factor de forma	1.94	Este parámetro solo permite un carácter cuantitativo ya que compara el área de la cuenca entre la longitud al cuadrado de la misma, la cual varía con base en el tipo de forma; este número indica que la cuenca es de alguna forma ancha o proporcional entre su largo y anchura.
Factor de sinuosidad	1.48	El factor de sinuosidad se refiere a la relación entre la longitud del río principal a lo largo de su cauce y la longitud del valle medido en línea curva o recta; el valor obtenido indica una sinuosidad de media-alta; es importante resaltar que entre más sinuoso, la velocidad del flujo en el cauce es menor; lo que supone una mayor posibilidad de depósito.
Elevación promedio	598.62 msnm	Se refiere a la elevación que se saca entre el valor máximo menos el mínimo entre el número de puntos o datos; es igual a la media aritmética.
Elevación modal promedio	550 msnm	Se refiere a la elevación que se saca como promedio de la moda de elevaciones, su desarrollo y significado.
Aspectos de forma Norte Sur	0.48 0.52	Estos parámetros se refieren a las relaciones guardadas entre las extensiones y anchura de la cuenca delimitada, lo que sugiere que si se trazara una línea media

		en la cuenca, ambos lados serían muy parecidos (es el caso de este trabajo).
Promedio de escorrentía	1.16 km	Este número indica que la respuesta acumulativa del volumen de agua crece en un orden exponencial conforme se avanza en los órdenes jerárquicos del sistema, por lo que se propone que el agua llega por golpe en una lluvia de alta intensidad y después se estabiliza, lo que pudiera provocar el desplazamiento o movilización de grandes bloques.
Distancia máxima de flujo	95.13 km	Esto simplemente indica el recorrido máximo que tiene que viajar el agua para incorporarse al punto gatillo (del cual se parte para la delimitación de la cuenca).
Pendiente máxima de flujo	0.0113	La pendiente de este tipo corresponde a una pendiente bastante suave, por lo que sugiere un grado de madurez por parte del sistema fluvial.
Longitud máxima de corriente	92.12 km	Indica la distancia máxima que existe entre el origen de la cuenca y una conexión directa entre la corriente de 5° grado hasta la cuenta de mayor extensión conectada a éste.
Pendiente máxima de corriente (G)	0.0090	Se refiere a la pendiente que contiene esta máxima. El valor sugiere que prevalece en longitud la corriente de mayor grado por lo que es predominante la corriente de 5° orden y luego la de 4° es mayor que la de tercer orden y así sucesivamente.
Localización de centroides en X Y	634,770.48946 (UTM R12) 3,181,771.15974 (UMT R12)	Simplemente se indica la ubicación geográfica del centroide o punto de equilibrio de la cuenca, si ésta fuese un sólido o una figura tridimensional.
Distancia mínima del centroide a corriente	0.49 km	El valor indica que el centroide no está localizado sobre el cauce principal, lo cual sugiere que las márgenes del río poseen distintos materiales o procesos tectónicos. Se pueden clasificar estos procesos como moderados a

		fuerteras. Por lo menos posteriores al origen del río.
Distancia máxima de centroide a corriente	38.57 km	El valor sugiere que la variación litológica es mayor o dominante sobre los controles estructurales recientes.
Pendiente del centroide a corriente	0.0015	Este valor indica un desgaste predominante, lo cual respalda la hipótesis del control del material sobre el estructural.
b	-0.66189	Constante empleada en el cálculo de la tasa de bifurcación, cada cuenca posee su constante definida.
Rb	5.158	Se refiere a la tasa de bifurcación o número total de corrientes de un orden determinado divididas por el número de corrientes de un orden menor; el valor obtenido sugiere un control moderadamente litológico, pero con un control principalmente estructural.
a	-0.9541	Constante empleada en el cálculo de la tasa de bifurcación; cada cuenca posee su constante definida.
Desviación de la linealidad (ordenes)	0.1394 (1-2) 0.1588 (2-3) 0.0859 (3-4) -0.0974 (3-4)	Indica la relación del desprendimiento de la relación de crecimiento o construcción del drenaje; el valor sugiere la diferencia de material o pendientes sobre la superficie sobre el cual esta tendida la red fluvial. Debido al conocimiento del terreno se atribuye a la diferencias en las elevaciones.
C	0.1909	La tasa de circularidad se determina entre el área de la cuenca y el área de un círculo con el mismo perímetro; el valor tiende hacia una cuenca de carácter heterogéneo en cuanto a las condicionantes del drenaje que son el patrón estructural, litología, topografía, cubierta vegetal, etc.
E	2.0829	La tasa de elongación obtenida sugiere una tasa de desarrollo suave en el drenaje.
Diámetro de círculo equivalente	115.6670	Parámetros utilizados para

		conocer las características de circularidad, tasa de elongación entre otras de la cuenca.
Radio de círculo equivalente	57.8335 km ²	Parámetros utilizados para conocer las características de circularidad, tasa de elongación entre otras de la cuenca.
Área equivalente	10507.4872 km ²	Parámetros utilizados para conocer las características de circularidad, tasa de elongación entre otras de la cuenca.
Fc	0.1306	Se refiere a la frecuencia de corriente que representa el número de segmentos de las corrientes de todos los órdenes que componen el sistema; indican la reflexión del incremento en el desarrollo del canal principal que indica el grado de aporte de sedimentos; el número indica que el aporte es normal, es decir es mayor en las cuencas y disminuye con el grado del orden jerárquico.
Fc	0.97	Se refiere a la tasa de relieve, la cual expresa la razón entre la altura máxima y mínima del relieve contra la distancia horizontal máxima; generalmente es la línea paralela a la corriente de mayor orden. El valor contrastado con la figura 23 del capítulo III sugiere que la cuenca está constituida en gran medida por conglomerados los cuales son considerados como rocas resistentes.
Rh	$Y = 2.05x - 0.4 \quad (R^2 = .9279)$ <p><i>Ecuación ajustada para determinar el valor para la cuenca de estudio o cualquier otra.</i></p> $Y = 0.1733$	Se determina mediante la altura máxima y la densidad del drenaje; este número indica que existe un control moderado litológico reciente.
Número de rugosidad	0.8193	Este número se deriva del número de rugosidad dividido entre la pendiente de la cuenca, e indica la variación de la rugosidad conforme al avance aguas debajo de la cuenca, el cual pareciera reducir su efecto conforme se disminuye con la corriente.
Número de geometría	2.9291	

El análisis de Horton para encontrar la relación entre el número de tributarios, la longitud del canal y el área de drenaje por medio de una simple relación geométrica fue corroborado para el sistema fluvial que se estudió. La implicación del desarrollo o madurez de la cuenca y como un cambio en su estado pudiera afectar a las corrientes o el desarrollo de las mismas que componen el sistema fluvial (Figura 34).

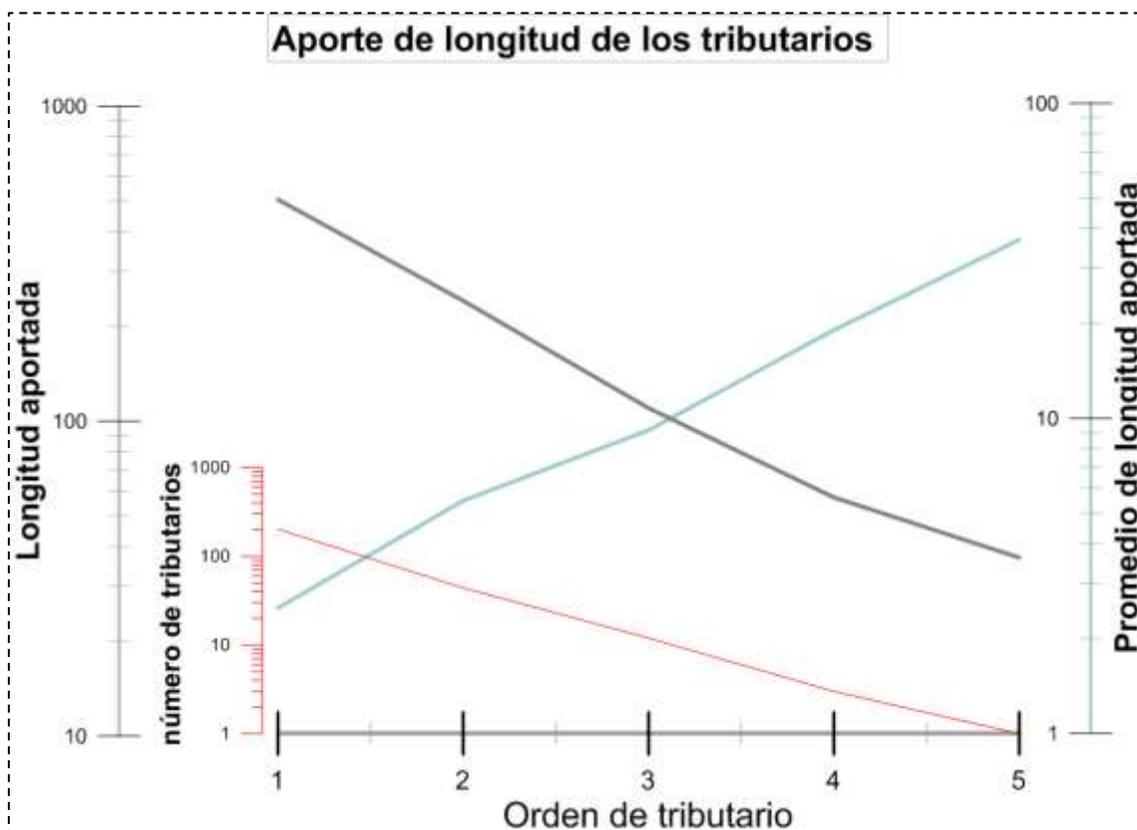


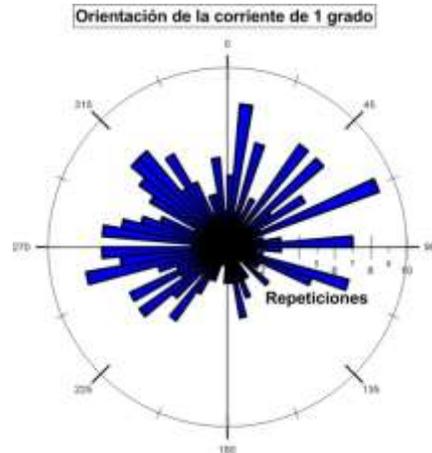
Figura 34. En el diagrama se puede observar con una línea roja el número de tributarios con su orden correspondiente, en una escala logarítmica. En azul se presenta el promedio de la longitud aportada por cada orden de tributario en metros. En gris se presenta la longitud total aportada por los tributarios de cada orden.

La orientación preferencial de las corrientes comprendidas en el sistema fluvial según su grado de orden jerárquico en el drenaje se presenta en la Tabla 18. .

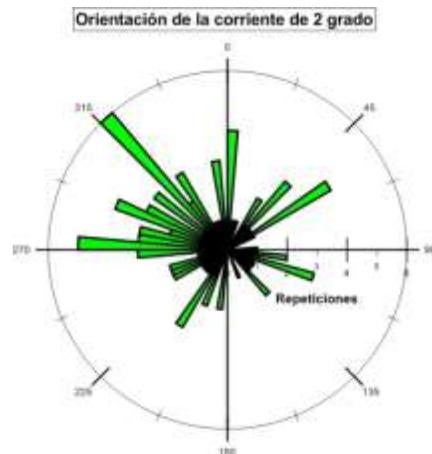
Tabla 18. En la siguiente tabla se presenta el orden preferencial de las secciones de las corrientes según su grado de desarrollo en el sistema fluvial: las de primer orden, las de segundo en verde, en naranja las de tercer orden, en amarillo las de cuarto y finalmente en rojo las de quinto. La dirección de las barras indica el sentido de preferencia del segmento escogido, y la longitud de éste determina el número de segmentos con la misma preferencia de dirección.

Explicación	Representación gráfica de la orientación preferente de las corrientes según su grado de jerárquico en el sistema.
-------------	---

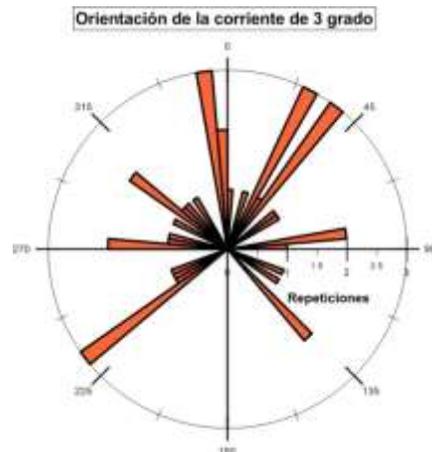
En este caso solo se puede hablar de zonas de predominancia por las corrientes las cuales poseen un abanico amplio que van de sur a este es decir es menor en el cuadrante 90 – 180 grados en azimutal. Se explica por la topografía ya que estas corrientes nacen en altas topografías las cuales coinciden con esta gráfica.

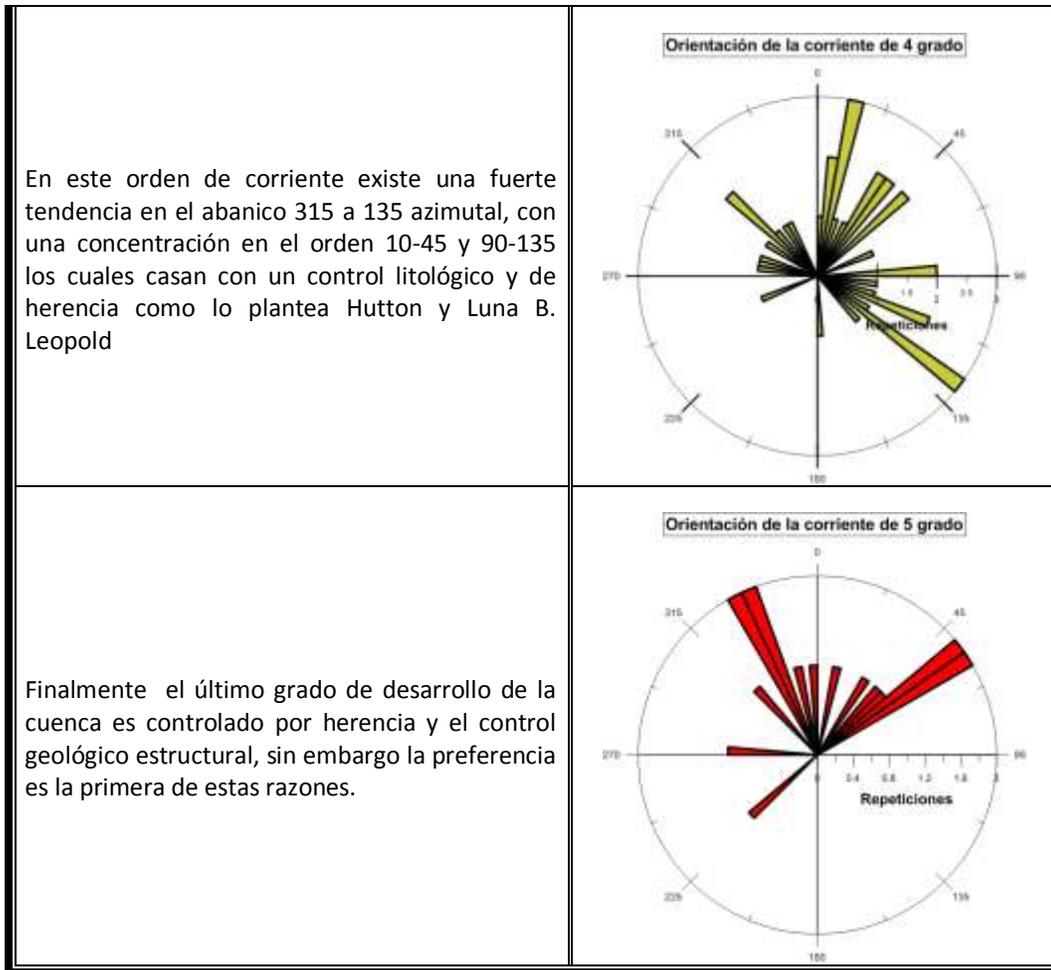


La orientación preferencial de estas corrientes es marcada por aquellas localizadas de los grados 270 a 360 en azimutal. La explicación de esto es un control fuertemente estructural.



En este orden de corrientes la preferencia son diversas sin embargo la zona de 90-180 azimutal sigue sin tener una gran afinidad por lo que el control sigue siendo una mezcla entre controles litológicos y topográficos.





4.2.1.3 Análisis de la descarga y regímenes hidrológicos

De la información de CNA se elaboró la Figura 35 la cual muestra el comportamiento hidrológico de las precipitaciones y por tanto de las corrientes que componen el sistema fluvial. Sin embargo, este sistema también se ve afectado por la operación de las presas entre las cuales se encuentra.

Estas graficas se pueden asociar al comportamiento de las corrientes que componen el sistema fluvial, ya que del agua que capta la cuenca, no toda escurre; primero se debe llenar un requerimiento de infiltración del agua saturando el suelo, para posteriormente comenzar con el proceso de escorrentía. También es importante resaltar que la cantidad de lluvia posee mayor significado en las implicaciones que estas poseen sobre el acarreo de sedimentos o material particulado, ya que requiere vencer un límite energético mínimo para poder transportar el material disponible sobre los diversos canales que componen el drenaje. Sin embargo la variación y el transporte de material suspendido y de la corriente es directamente proporcional a la

cantidad de agua disponible y de la frecuencia con la que estas ocurran, ya que entre mayor sea la frecuencia o entre más eventos ocurran, menor será la carga transportada y la corriente debido a su estado “energético” y el requerimiento normal de transporte, comenzara a erosionar o depositar mientras adquiere una configuración energética y de transporte de material estable o estacionaría.

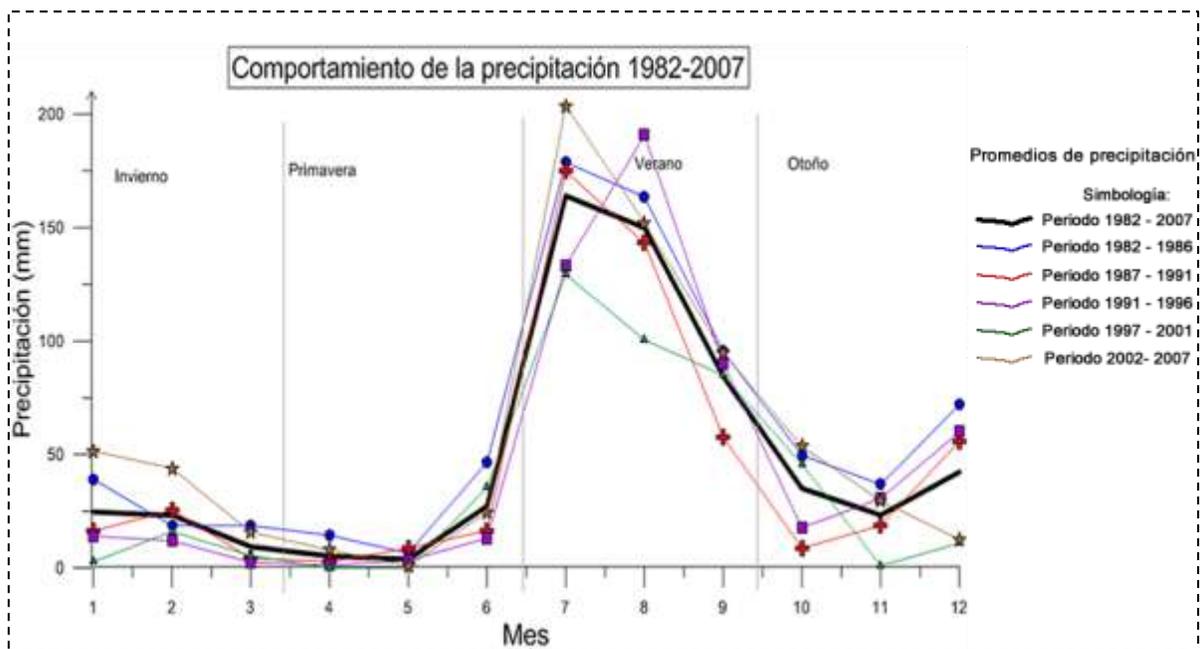


Figura 35. Comportamiento de la precipitación, presentando los datos por medio de promedios mensuales del periodo comprendido entre 1982-2007. Estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), El Novillo. (Fuente: Elaborado con datos de: smn.conagua.gob.mx).

Las tasas más altas de flujo ocurren en el verano, debido a las tormentas y otros fenómenos climáticos. Se obtuvieron datos de 468 días, del período 01/01/2009 – 13/04/2010 de las variaciones en el aporte de agua y nivel de almacenamiento de la presa El Novillo. De éstos, se obtuvo el promedio de vertidos de la obra de toma de 61.42 m³, un volumen de almacenamiento de 2,392.57 m³ y un nivel promedio de almacenamiento de 285.86 m. Las Figuras 36 y 37 muestran estas tendencias.

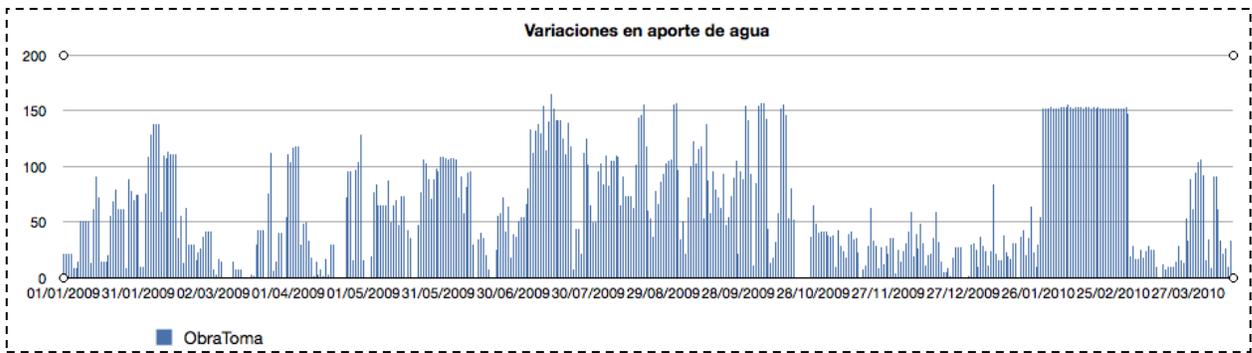


Figura 36. Gráfica que presenta las variaciones en el aporte de agua de la presa en la cabecera del sistema fluvial que se estudia, con un rango de datos que va desde el 01-01-2009 al 27-03-2010. En ella se puede observar el comportamiento que sigue el llenado de esta presa, y por tanto se puede estimar la disponibilidad o necesidad de liberar el exceso del agua en el reservorio.

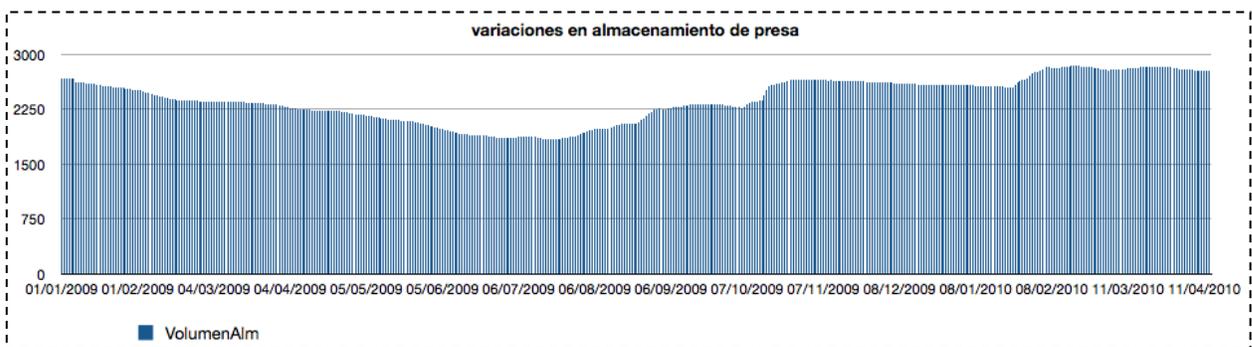


Figura 37. Se muestra las variaciones en el almacenamiento de agua en la presa la cual muestra los puntos en los que ha sido necesario liberar cantidades importantes de agua o épocas de sequía. Si se compara esta figura con la anterior se puede deducir que existe un lag y es por medio de éste que se explica la variación en el volumen de agua almacenada debido a la escasez de lluvias durante el 2009.

4.2.1.4 rasgos regionales

En este paso se integra la información analizada y compilada de la etapa 1 paso 1, sin embargo solo se presentará aquella que no se ha manejado con anterioridad, ya que sería solo redundar en la información.

4.2.1.4.1. Edafología

En cuanto al contexto edafológico de la cuenca media del río Yaqui, existe un fuerte control por dos tipos de suelo en particular: **Leptosoles** y **Regosoles** con unas texturas mayoritariamente gruesas - media lo que significa que la cuenca pertenece a una zona de transición de energía de

alta a media tal como se observa en la Figura 30, lo cual corrobora los valores que describen la curva hipsométrica para el sistema de estudio (Figura 33).

- Los leptosoles se localizan en zonas cuyas condiciones ambientales no favorecen el desarrollo de los suelos, o en áreas que han sufrido una erosión importante, generalmente en lugares de fuerte pendientes. Son frágiles y nada aptos para la actividad agraria, generalmente presenta espesores inferiores a 10 cm.
- Los regosoles, se constituyen sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Por lo que éstos son más propensos a la liberación de sedimentos y a los procesos erosivos. No son buenos para las actividades agrarias. Su perfil de suelo es sumamente simple, ya que posee una escasa materia orgánica que reposa directamente sobre la roca madre generalmente deleznable.

La clase textural describe el tamaño general de las partículas que forman el suelo. En el área de estudio la clase predominante es la gruesa, la cual posee más del 65% de arena, seguido de la clase textural media la cual se encuentra generalmente equilibrada en el contenido de arena, limo y arcillas. La clase textural fina se encuentra en muy pequeñas porciones del área de estudio. La Clase textural gruesa posee una menor capacidad de retención de agua y nutrientes para las plantas, lo cual explica la falta de vegetación en la zona de estudio.

En cuanto a la fase física de los suelos se encuentran constituídos mayoritariamente por suelos gravosos, los cuales presentan cantos menores a los 7.5 cm de diámetro en la superficie del terreno o dentro de los 30 cm de profundidad; seguido, por una fase lítica la cual se caracteriza por capas de roca dura y continúa con un conjunto asociado de trozos de roca muy abundantes que impiden la penetración de las raíces; se localizan a una profundidad somera. Es muy susceptible a la erosión. La fase lítica profunda está constituida de igual manera que la fase física lítica con la diferencia de localizarse a una profundidad de entre 50 y 100 m. Y finalmente con menos cubierta, se presenta la fase física pedregosa, la cual posee rocas de 7.5 cm o más de diámetro en la superficie del terreno o dentro de los 3 cm de profundidad. En general, el suelo que compone el sistema fluvial que se estudia es propenso a ser transportado por escorrentía, sin embargo ésta debe cumplir con los requisitos energéticos necesarios para poder transportar las gravas que componen a estos tipos de suelos.

4.2.1.4.2. Distribución de presiones antropogénicas en la cuenca media del río Yaqui

En el siguiente apartado, se presenta el contexto de las presiones antropogénicas que sufre actualmente la zona de estudio. La Figura 38 muestra el contexto actual de la cuenca en cuanto a asentamientos humanos, prácticas de minado, presas construidas, etc.

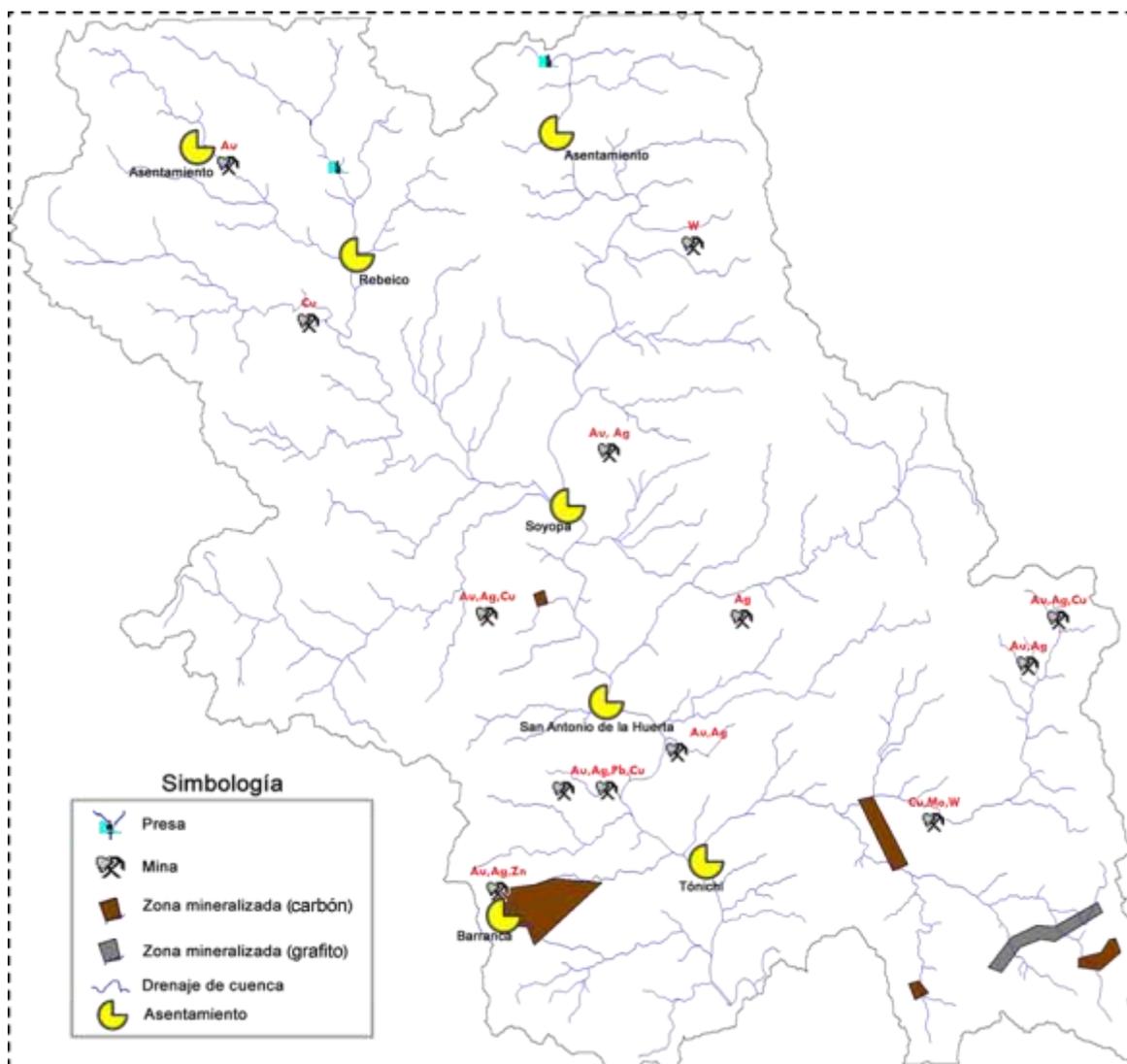


Figura 38. Mapa de presiones antropogénicas en la cuenca media del río Yaqui. No todas las minas presentadas en la ilustración se encuentran en estado activo; se considera que aquellas en estado inactivo pueden, incluso ser más perjudiciales al ambiente, que aquellas que se encuentran actualmente operando. Sobre las áreas mineralizadas solo se muestran las más importantes, pero en su totalidad, la mayoría son de carbón mineral, con grandes extensiones de zonas mineralizadas de grafito. También se ilustran dos presas, una de ellas en operación para la producción de energía eléctrica, mientras que la otra se encuentra únicamente para almacenamiento de agua para riego, sin embargo se desconoce su estado de conservación actual. En el **anexo: Geoquímica del fósforo** se presenta el estado actual de las actividades pecuarias y agrícolas en la zona, las cuales carecen de una importancia en los resultados presentados en el mapa de la figura 42.

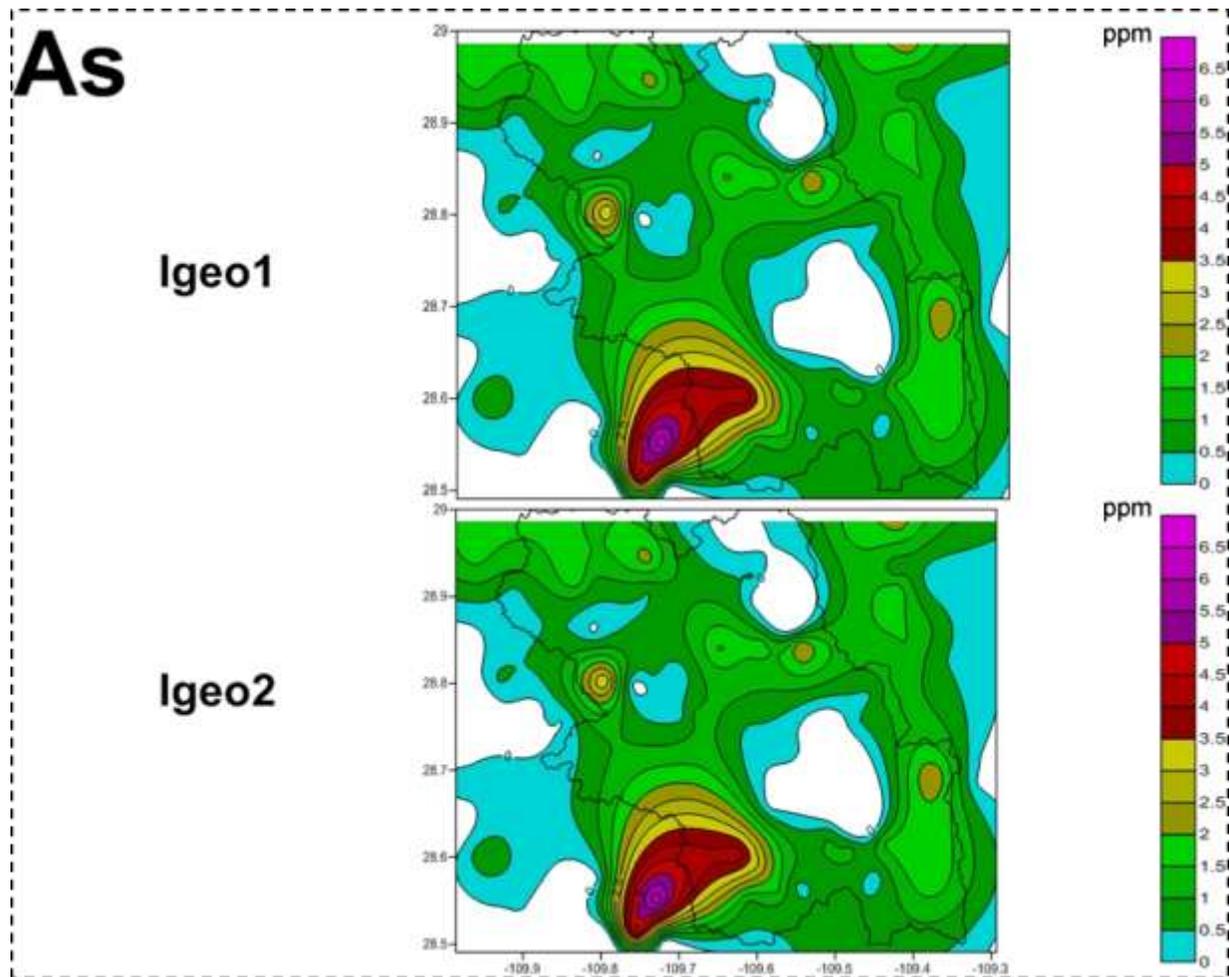


Figura 39. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui), en ellos se muestra el grado de impacto por arsénico en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano. Los datos se analizaron utilizando el método geoestadístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El arsénico está asociado al Cd, Cu, Pb, Zn y su fuente es una mineralización. Ambos valores son muy parecidos, por ello no se aprecia diferencia en los mapas.

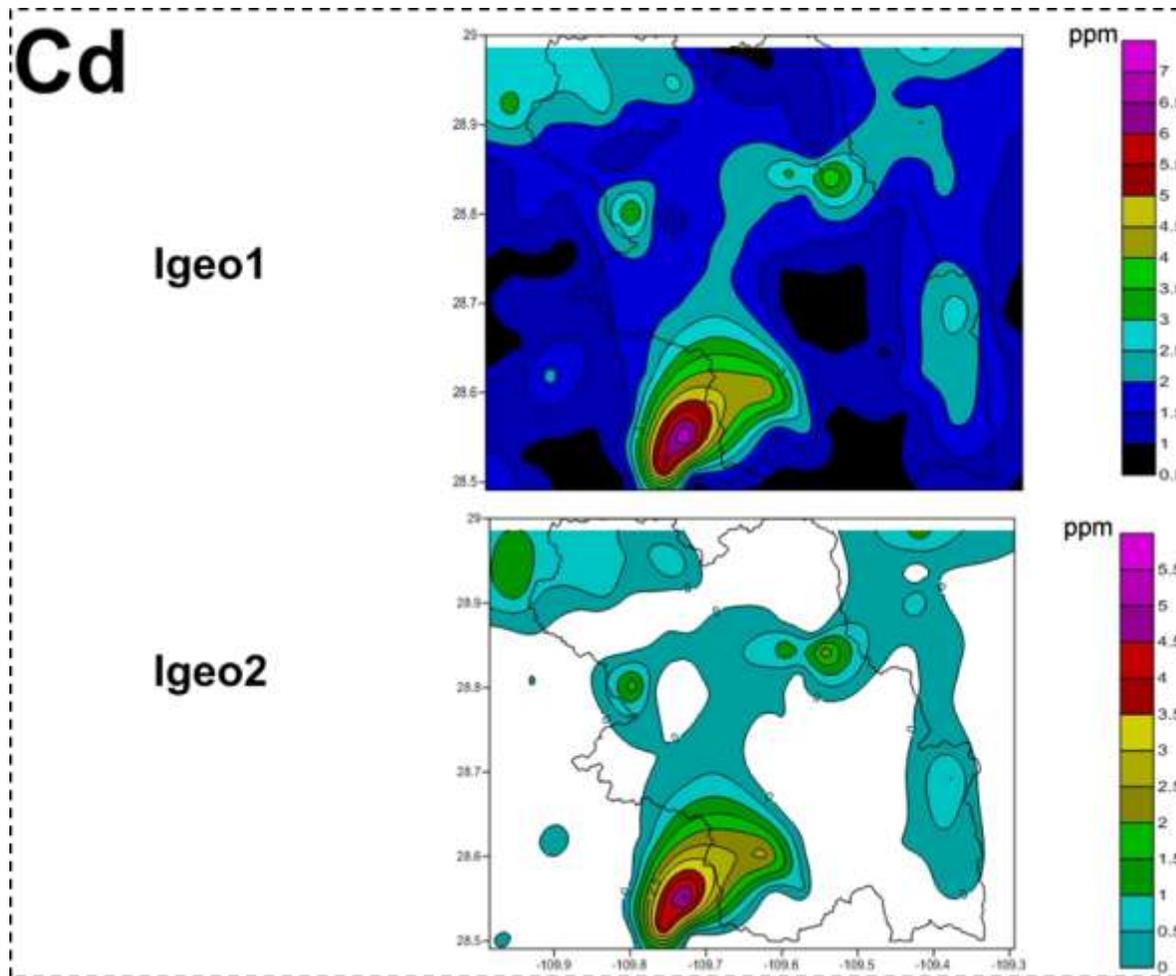


Figura 40. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui). En ellos se muestra el grado de impacto por cadmio en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano. Los datos se analizaron utilizando el método geoestadístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El cadmio está asociado al As, Cu, Pb, Zn y su fuente es una mineralización. La diferencia en la distribución gráfica del mapa es significativa en especial para los valores bajos del I_{geo} , lo que sugiere valores muy similares entre los fondos empleados para el cálculo de los índices de geoacumulación.

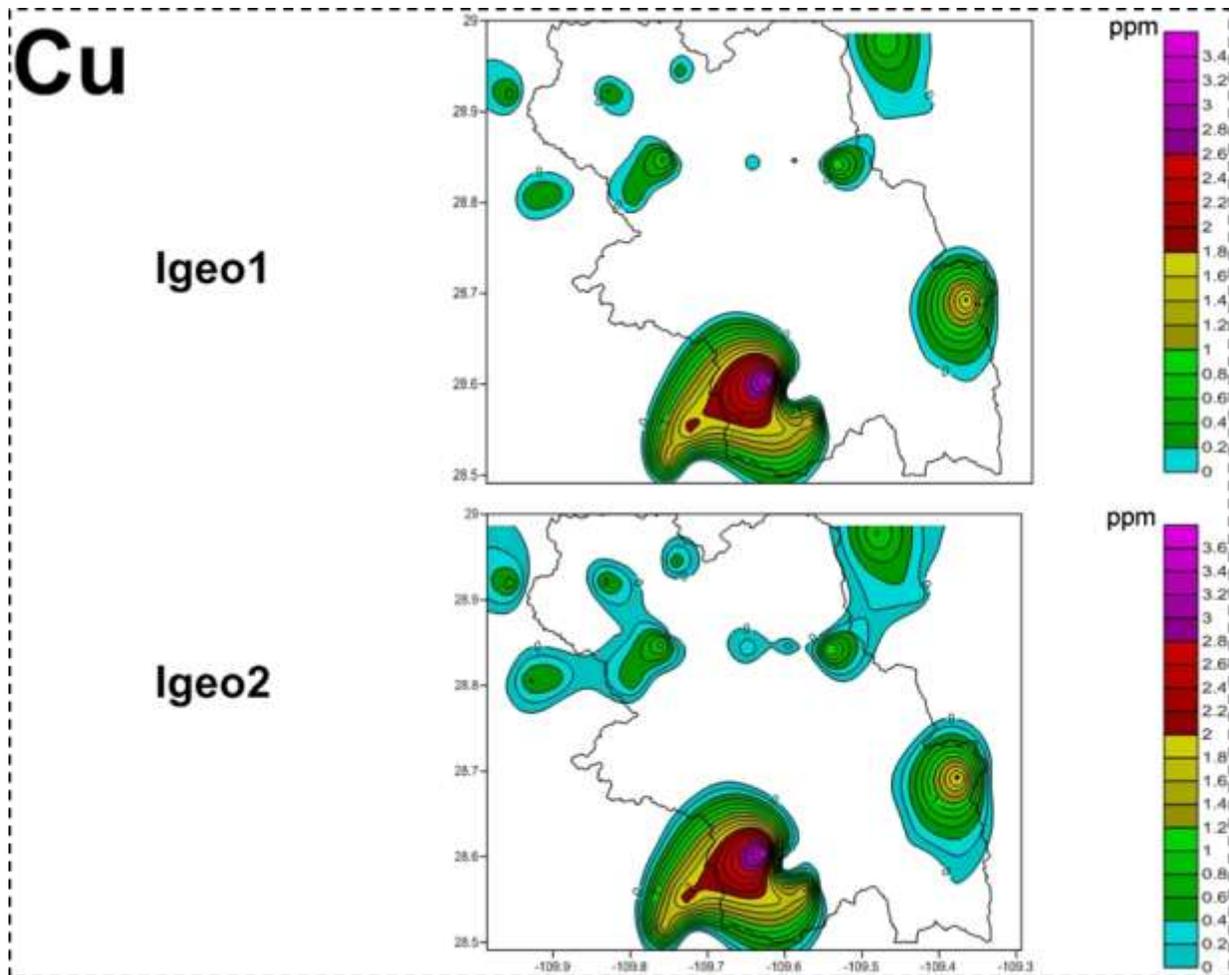


Figura 41. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui). En ellos se muestra el grado de impacto por cobre en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano. Los datos se analizaron utilizando el método geostatístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El cobre está asociado al As, Cd, Pb, Zn y su fuente es una mineralización. La diferencia en la distribución gráfica del mapa es muy similar, lo que indica valores muy parecidos para los fondos geoquímicos empleados.

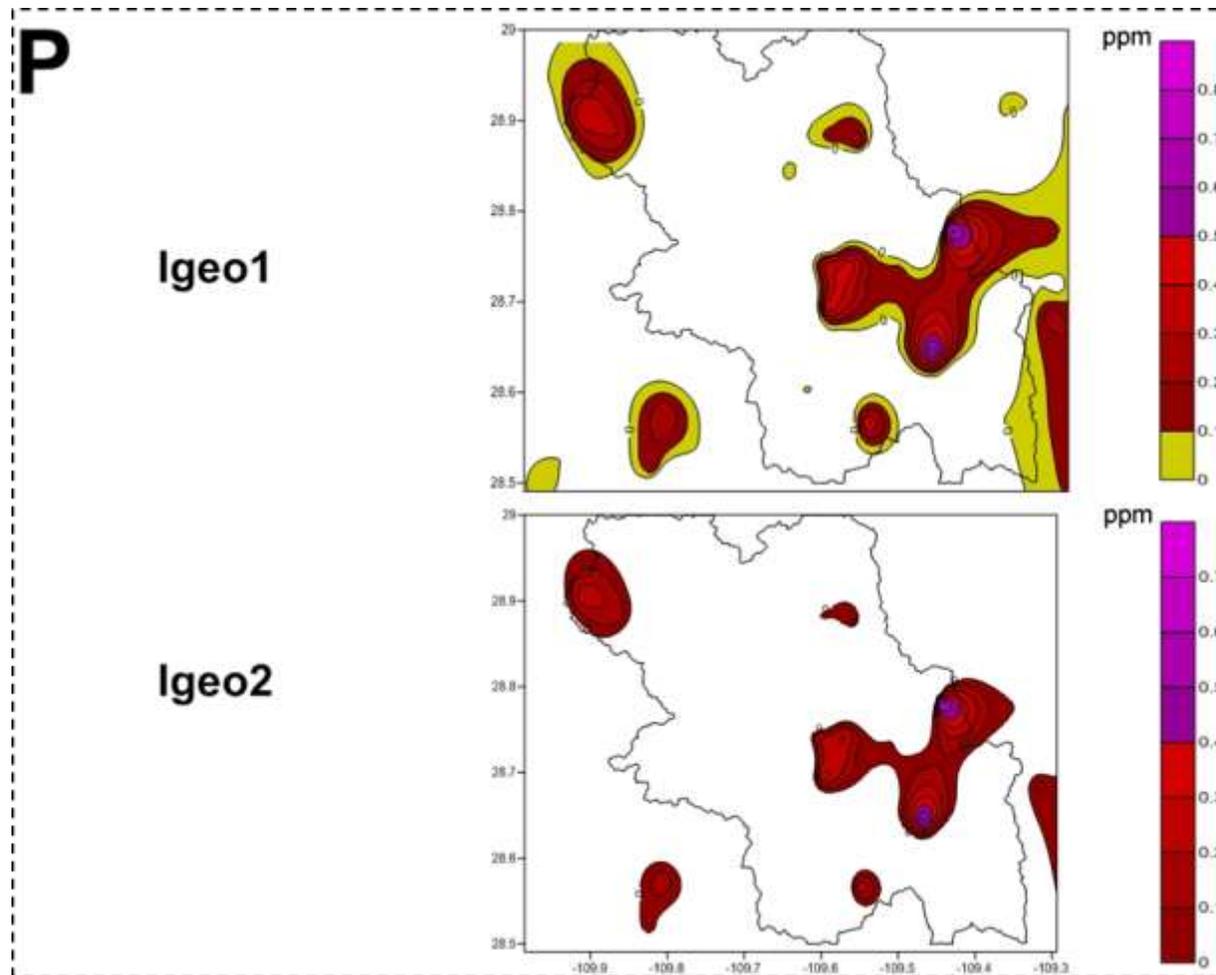


Figura 42. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui). En ellos se muestra el grado de impacto por fósforo en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano. Los datos se analizaron utilizando el método geoestadístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El fósforo se asocia comúnmente con la actividad agrícola debido al empleo de fertilizantes con alto contenido de este elemento. La diferencia en la distribución gráfica del mapa es significativa en especial para los valores bajos del I_{geo} , lo que sugiere valores muy similares entre los fondos empleados para el cálculo de los índices de geoacumulación. Sin embargo, se encontró que estas anomalías tienen un origen geogenico (Ver anexo: geoquímica del fósforo)

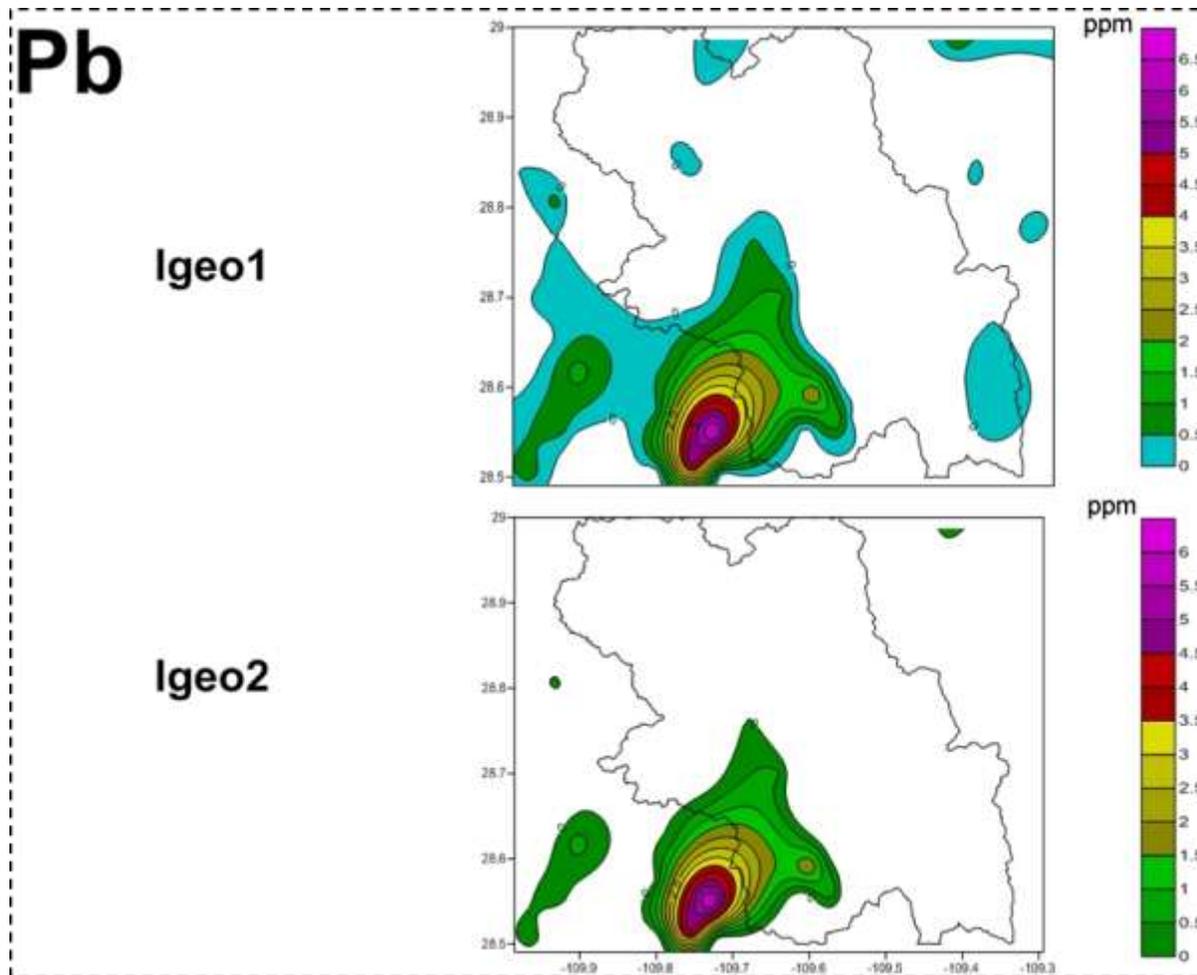


Figura 43. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui). En ellos se muestra el grado de impacto por plomo en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano. Los datos se analizaron utilizando el método geoestadístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El plomo está asociado al As, Cd, Cu, Zn y su fuente es una mineralización. La diferencia en la distribución gráfica del mapa es significativa en especial para los valores bajos del I_{geo} , lo que sugiere valores muy similares entre los fondos empleados para el cálculo de los índices de geoacumulación.

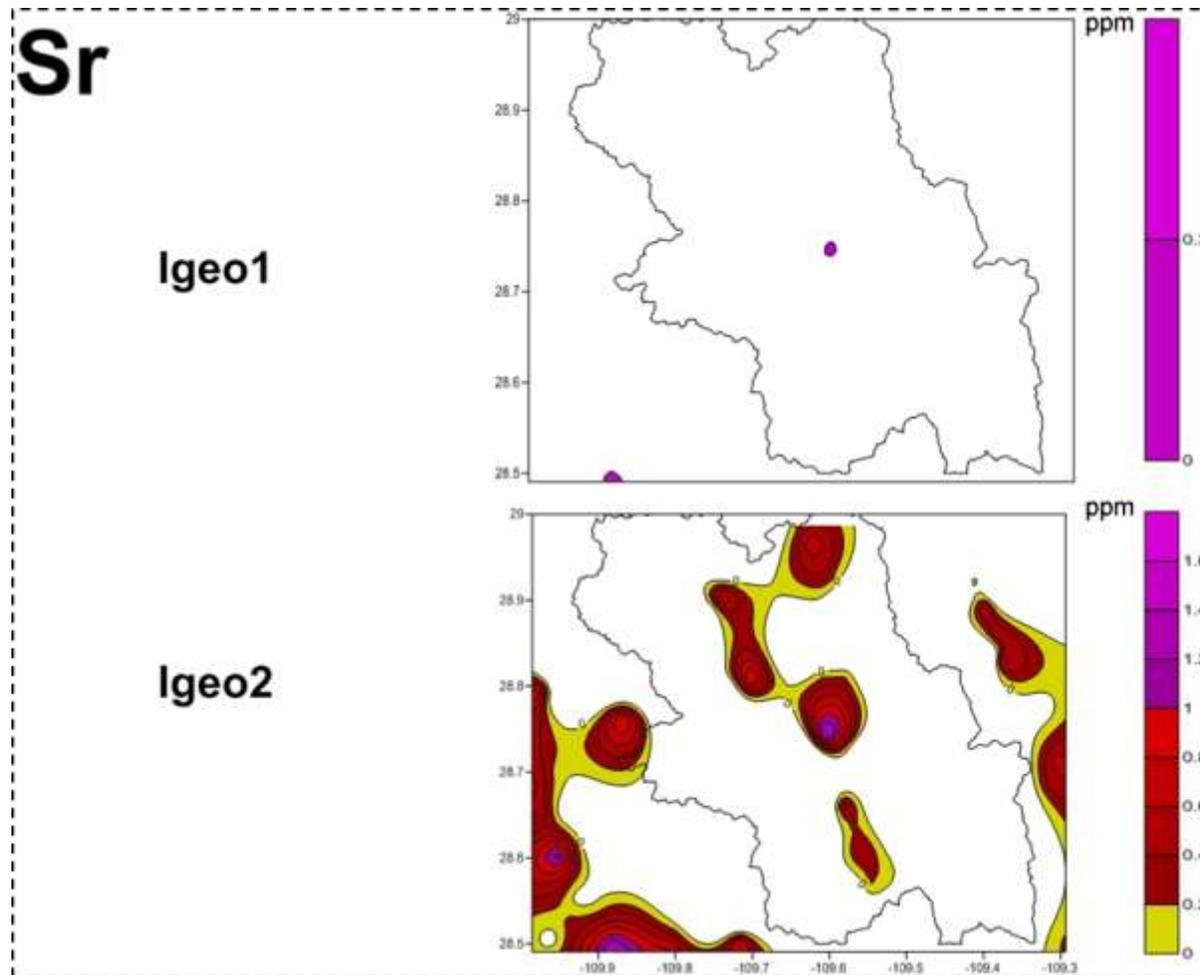


Figura 44. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui). En ellos se muestra el grado de impacto por estroncio en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano; los datos se analizaron utilizando el método geoestadístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El estroncio usualmente de origen geogénico, puede asociarse a la erosión de rocas debido a su afinidad con la corteza terrestre. En el mapa se puede ver un patrón de la acumulación, con preferencia por el drenaje principal del sistema fluvial. Las diferencias de los parámetros I_{geo} es la más grande de todos los elementos estudiados, debido a los valores de fondo manejados, lo cual puede atribuirse al aluvión o sedimentos originados de la Formación Baucarit.

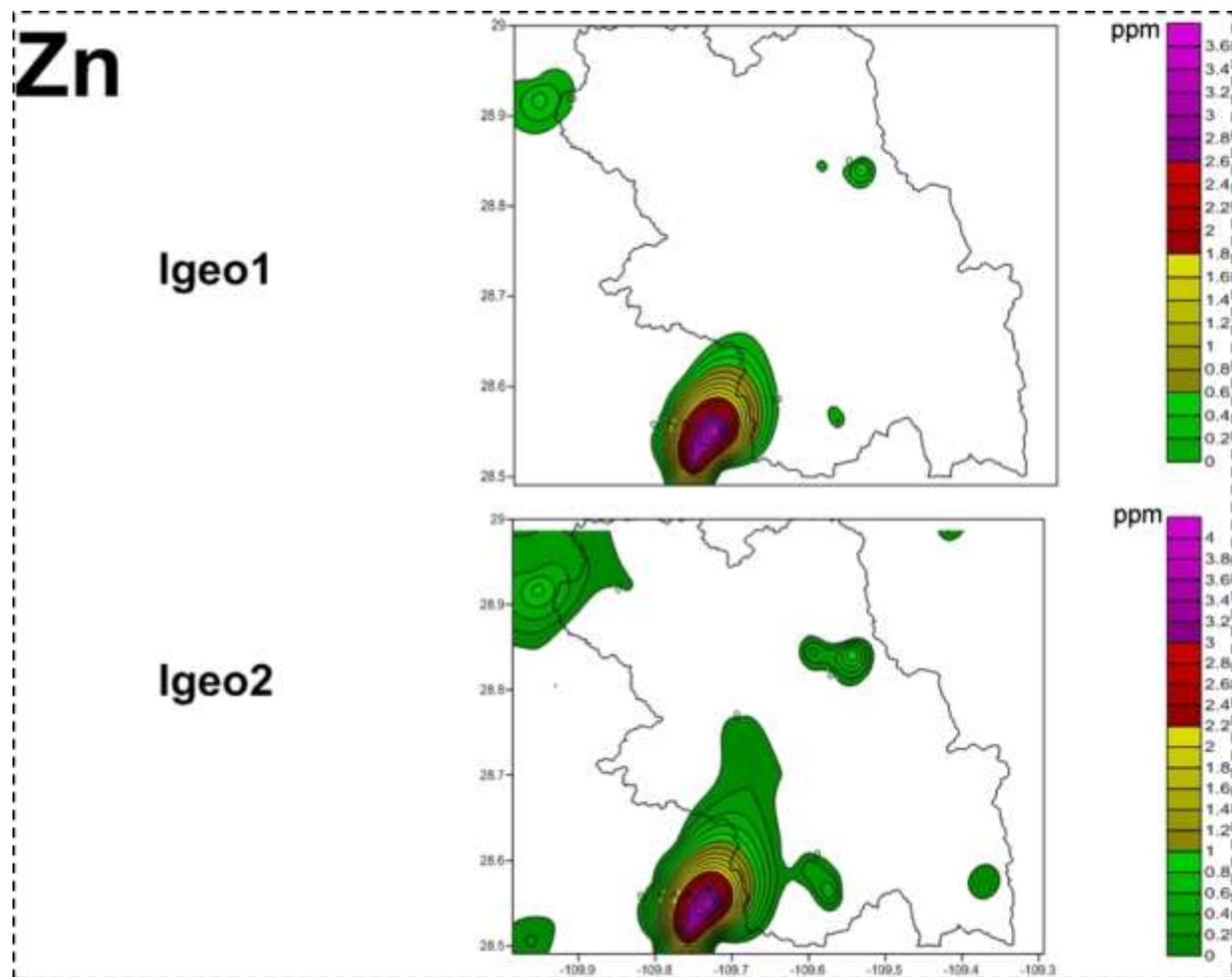


Figura 45. Mapas geoquímicos del área de estudio (cuenca media del río Yaqui). En ellos se muestra el grado de impacto por cinc en los sedimentos muestreados por el Servicio Geológico Mexicano; los datos se analizaron utilizando el método geoestadístico *Kriging*. El parámetro I_{geo1} maneja el B_n para sedimentos propuesto por Spark 2003; mientras que el parámetro I_{geo2} maneja el B_n para sedimentos calculado de los datos del SGM. El cinc está asociado a As, Cd, Cu, Pb y su fuente es una mineralización. La diferencia en la distribución gráfica del mapa es significativa en especial para los valores bajos del I_{geo} , lo que sugiere valores muy similares entre los fondos empleados para el cálculo de los índices de geoacumulación.

Las figuras anteriores, se deben interpretar con la Tabla 19 la cual recoge el análisis del contenido numérico de los mapas anteriores, aplicando el método I_{geo} para el cual se emplearon los distintos fondos propuestos; exceptuando el P y Sr, cuyas fuentes no se explican mediante la mineralización.

La Tabla 19 muestra los porcentajes según los valores del I_{geo} obtenidos, los cuales muestran anomalías geoquímicas para los elementos U, Cd y As, los cuales, se encuentran en el área de estudio en niveles que van de moderadamente contaminado hasta extremadamente contaminado (excepto para el uranio, que solo llega hasta fuertemente contaminado). Se considera pertinente presentar una tabla que trate por porcentaje el valor de los I_{geo} para clasificarlos, como la mostrada para los elementos As, Cd, Cu con la finalidad de conocer puntos con mayores anomalías o prioritarios (Tabla 20).

Tabla 19. Recopilación de los valores anormales por muestras, que van desde moderadamente contaminado, hasta extremadamente contaminados utilizando el Índice de geoacumulación I_{geo} .

Elemento	Valor I_{geo}				
	1-2 ^a	2-3 ^b	3-4 ^c	4-5 ^d	+5 ^e
As	27	5	2	1	2
Cd	44	20	5	2	2
Cu	7	0	1	0	0
P	0	0	0	0	0
Pb	4	1	0	0	2
Sr	0	0	0	0	0
U	34	58	13	0	0
Zn	0	1	1	0	0

^a Moderadamente contaminado
^b De moderadamente contaminado a fuertemente contaminado
^c Fuertemente contaminado
^d De fuerte a extremadamente contaminado
^e Extremadamente contaminado

Tabla 20. Porcentaje de los valores calculados para el índice de geoacumulación en el área de estudio. Es importante tener en cuenta las propiedades de estos elementos, ya que por ejemplo el uranio es un elemento muy móvil, al igual que el arsénico, que es un elemento que produce estragos en la naturaleza y en la salud de los seres vivos.

Elemento	% de valores I_{geo} calculados para 106 muestras totales				
	1-2	2-3	3-4	4-5	+5
As	25.47 %	4.72%	1.89%	0.94%	1.89%
Cd	41.51%	18.87%	4.72%	1.89%	1.89%
U	32.08%	54.72%	12.26%	0	0

Tanto las minas activas como abandonadas pueden contener contaminantes potenciales (metales, ácidos, etc.) que podrían ser liberados desde la superficie de las minas o debajo de ellas, así como

desde los jales u otros depósitos de material de desecho cerca de las mismas. Por lo que se hizo un inventario sobre operaciones y zonas mineralizadas para el área que comprende el sistema fluvial. Este inventario recopila información concerniente al tipo de sustancia recuperada, tipo de yacimiento, roca encajonante, unidad geológica, entre otros datos que se consideran de importancia para evaluar el estado actual del sistema fluvial (Tabla 21). **Ver Anexo Inventario de operaciones y zonas mineralizadas en el CD que acompaña este trabajo.**

Tabla 21. Esquema de la tabla que encontrará en el apéndice correspondiente al capítulo de geoquímica. En ella aparece un código de colores en la columna ESTATUS, en la cual, el color **rojo** representa: mina abandonada; el **naranja**: en reactivación; el **amarillo**: prospecto y el **verde**: mina activa o explotada recientemente.

NOMBRE DE LA CARTA								
Nombre	Área mineralizada	Estado	Elemento	Tipo de yacimiento	Obra	Roca encajonante	Mena	Ganga
El Cajón	El Saucito	Abandonada	W, Mo	Metasomático de contacto	Subterránea	Caliza / Granito	Molibdenita / Calcopirita	Cuarzo, Calcita, Granate
El Chiquelite	El Saucito	Prospecto	Ag, Au	Mesotermal	Subterránea	Calizas	Oxidos	Calcita, Cuarzo
El Saucito	El Saucito	Activa	W, Au	Metasomático de contacto	Subterránea	Caliza / Granito	Oxidos	Calcita, Cuarzo
La Norteña	La Norteña	En activación	W		Tajo	Caliza / Diorita	Tugsteno	

4.2.2. Unidades geomorfológicas y estimación de la erosión en la cuenca hidrológica

4.2.2.1. Estimación de la erosión en la cuenca

El cálculo de la EMP para el área ocupada por el sistema fluvial se desarrolló como sigue:

1. Se importó el *.DEM a IDRISI y se realizó un análisis estadístico con la finalidad de obtener el histograma de frecuencias (Figura 46) e histograma de frecuencia acumulada (Figura 47).

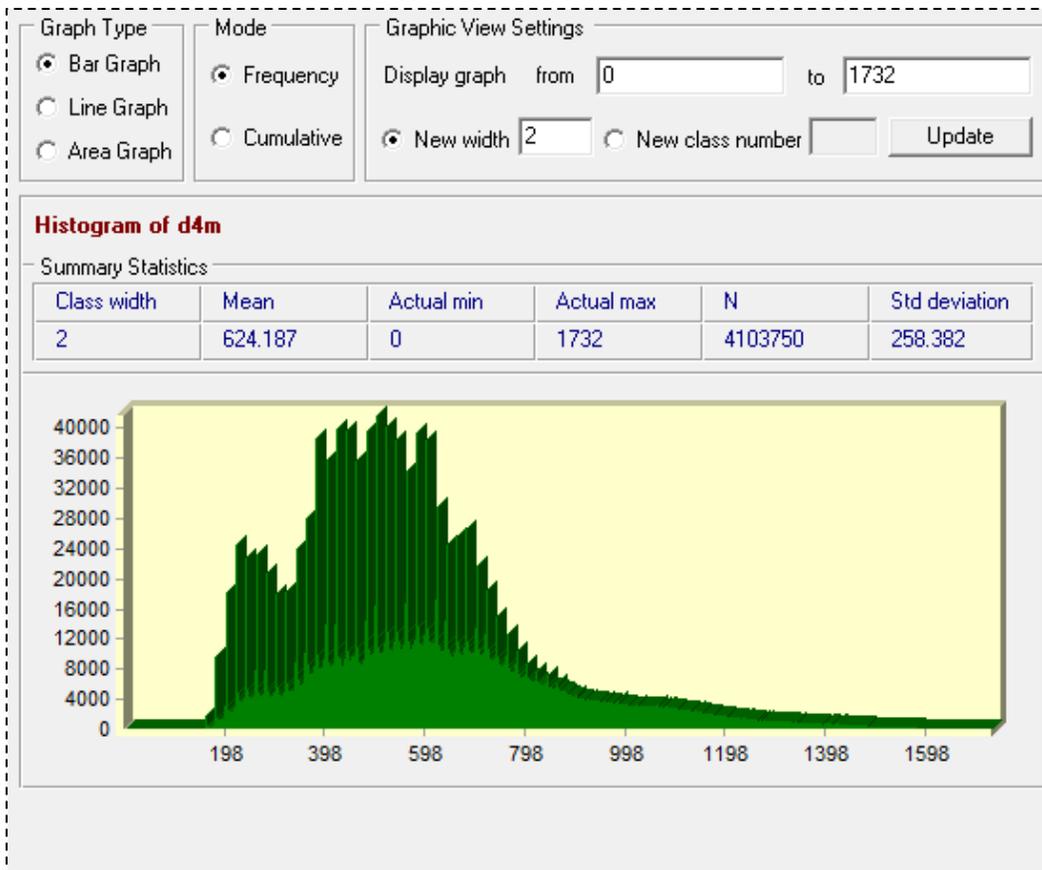


Figura 46. El histograma de frecuencias maneja un rango de 0 a 1,732 msnm de elevación con un rango de clases de 2 metros; en la misma gráfica se presenta un resumen estadístico en la cual la media es de 624.178 msnm y una desviación estándar de 258.382 msnm.

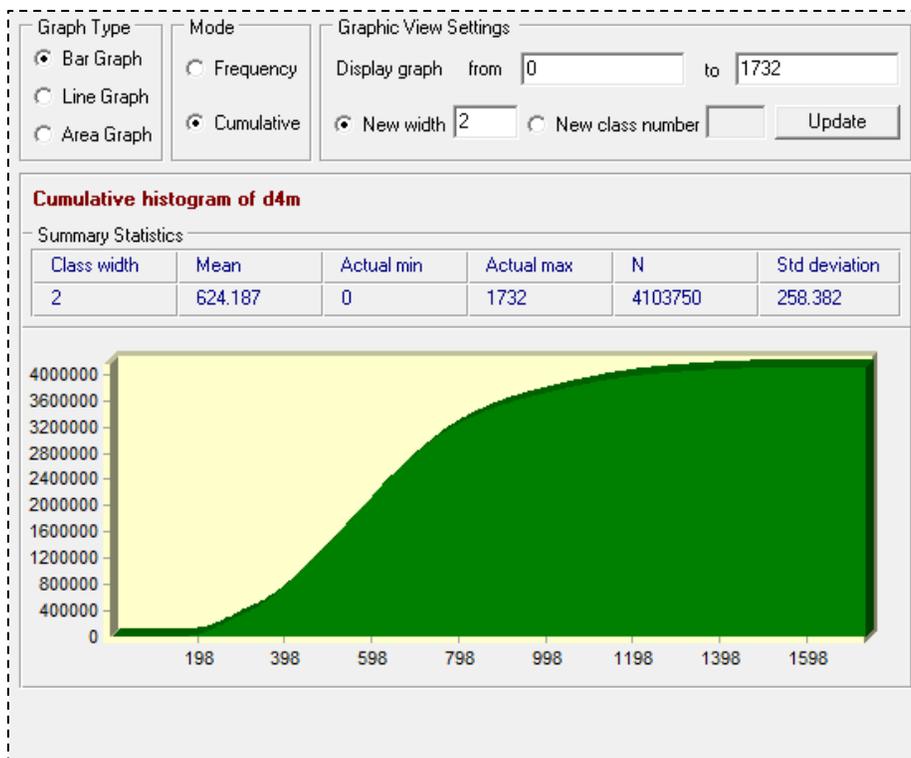


Figura 47. Histograma de frecuencia acumulada, con un rango de análisis de 0 a 1,732 msnm, con un rango de clase de 2 metros, una media de 624.187 msnm y una desviación estándar de 258.382 msnm.

2. Se calculó del área aportada por cada (clase) elevación en IDRISI.

La Tabla 22 muestra los resultados obtenidos con el área aportada por cada elevación registrada en los MDE de INEGI pertenecientes al área delimitada por la divisoria de la cuenca.

Tabla 22 Área aportada por cada clase de elevación. En la tabla solo se muestra una parte de los resultados.

Elevación	Área aportada
500	30.8661279
420	30.3762838
440	30.1526224
380	29.3608779
520	29.2239597
480	29.1805881
580	28.2859424
540	27.8360683
600	27.4584801

400	27.2178102
460	26.6157103
560	24.4267197
620	21.163644
360	20.3974122

3. El área de la cuenca es de 2004.6 km², por lo que dividiendo los valores de la Tabla 22 entre el área de la cuenca se obtuvo el porcentaje aportado por cada clase de altura, y de este resultado se calcula el porcentaje acumulado (Tabla 23).

Tabla 23. Muestra el porcentaje del área ocupada por la altitud que se indica, así como el porcentaje acumulado conforme se avanza hasta la máxima clase registrada.

altitud	porcentaje	acumulado
160	0.04587617	0.04587617
170	0.0420282	0.08790438
180	0.50959744	0.59750182
190	0.22861125	0.82611307
200	1.08700438	1.91311745
210	0.4850988	2.39821625
220	1.7097317	4.10794795
230	0.80097311	4.90892106
240	1.73414482	6.64306588
250	0.9325304	7.57559628
260	1.8359446	9.41154087
270	0.97160851	10.3831494
280	1.7093469	12.0924963
290	0.94210753	13.0346038
300	1.52892058	14.5635244

Con los datos de la Tabla 23 se elabora la curva hipsométrica para la cuenca (Figura 48), con la cual se calcula la Elevación Modal Promedio para el área de terreno comprendido dentro de la divisoria de la cuenca.

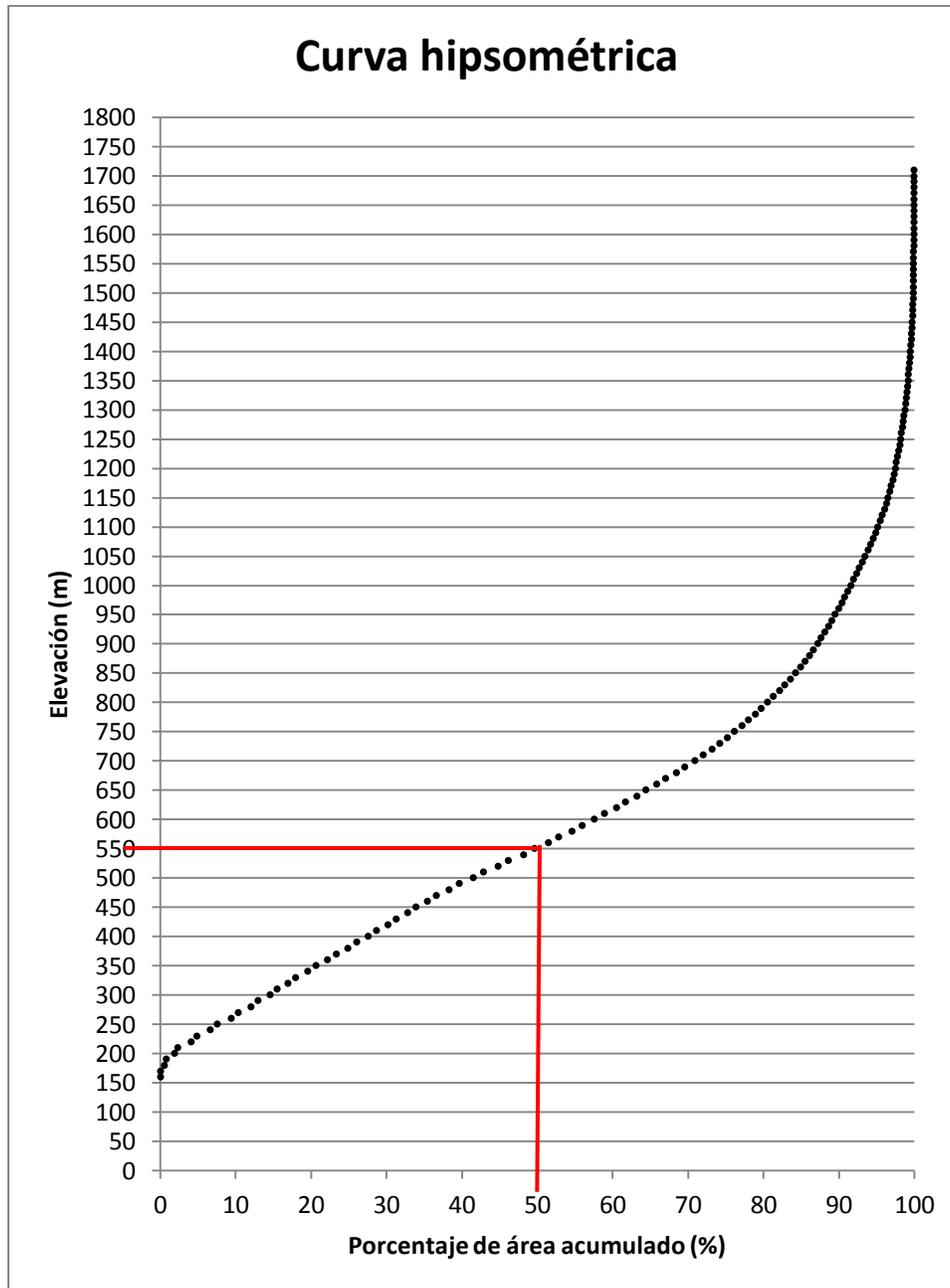


Figura 48. Curva hipsométrica para la cuenca media del río Yaqui. La elevación modal promedio correspondiente a esta curva es de 550 msnm.

La elevación modal promedio calculada por medio de la curva hipsométrica, es de **550 m.s.n.m.** El cálculo de las TDT_x se realizó como sigue:

1. Se aplicaron las ecuaciones 11 y 12, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$TDT_1 = 16.4523603 \text{ (m/m.a.) (Línea punteada)}$$

$$TDT_2 = 13.9498527 \text{ (m/m.a.) (Línea continua)}$$

- El promedio de relieve local se calculó por medio de la ecuación 13 y resultó en: **228.1 m**, valor semejante a la media aritmética de las elevaciones dentro de la cuenca.
- La cantidad de material que se removerá en la cuenca, se calculó multiplicando las TDT_x por el área (km^2) como sigue:

$$2006.3 km^2 \cdot 16.45 \frac{m}{m.a.} \left(\frac{km}{1000m} \right) = 33.0036 km^3 / m.a.$$

$$2006.3 km^2 \cdot 13.95 \frac{m}{m.a.} \left(\frac{km}{1000m} \right) = 27.9879 km^3 / m.a.$$

$$33.0036 \frac{km^3}{m.a.} \cdot \left(\frac{m.a.}{1,000,000a} \right) = 0.000033004 km^3 / a$$

$$27.9879 \frac{km^3}{m.a.} \cdot \left(\frac{m.a.}{1,000,000a} \right) = 0.000027988 km^3 / a$$

$$0.000033004 km^3 / a \cdot \left(\frac{1000m}{km} \right)^3 = 33004 m^3 / a$$

$$0.000027988 km^3 / a \cdot \left(\frac{1000m}{km} \right)^3 = 27988 m^3 / a$$

- Al multiplicar el volumen de desgaste por la densidades de roca de la Formación Báucarit = 2.58 gr/cm^3 y granitos = 2.7 gr/cm^3 se obtiene la masa correspondiente a las TDT_x .

$$2.58 \frac{gr}{cm^3} \cdot \left(\frac{ton}{1000000gr} \right) \cdot \left(\frac{100cm}{m} \right)^3 = 2.58 ton / m^3$$

$$2.7 \frac{gr}{cm^3} \cdot \left(\frac{ton}{1000000gr} \right) \cdot \left(\frac{100cm}{m} \right)^3 = 2.7 ton / m^3$$

$$33004 m^3 / a \cdot 2.58 ton / m^3 = 85,150.32 \frac{ton}{a}$$

$$33004 m^3 / a \cdot 2.7 ton / m^3 = 89,110.8 \frac{ton}{a}$$

$$27988 m^3 / a \cdot 2.58 ton / m^3 = 72,209.04 \frac{ton}{a}$$

$$27988 m^3 / a \cdot 2.7 ton / m^3 = 75,567.6 \frac{ton}{a}$$

La parte cualitativa comprende los mapas referentes a la agresividad de las lluvias, la energía potencial y cinética. Los mapas resultantes de la metodología se muestran en las Figuras 49,50 y

51. Para la elaboración de estos mapas fue necesario ubicar los promedios anual y mensual más altos, así como calcular la tasa de agresividad de la lluvia para cada estación meteorológica, administrada por CONAGUA; los resultados se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Resumen de la localización de los periodos anuales y mensuales más altos para las estaciones que rodean la zona de estudio.

Nombre de la estación	Fecha (año)	Promedio anual más alto	Fecha (mes/año)	Promedio mensual más alto	Tasa de agresividad de lluvia	Coordenadas	
						Latitud	Longitud
La Estrella	1989	1198.9	jul-90	499.5	208.11	28.9491667	-109.639722
El Novillo	1990	888.5	jul-90	380.5	162.95	28.9769444	-109.638056
Onavas	1992	1143.7	jul-90	420.5	154.60	28.4622222	-109.526389
Rebeiquito	2006	1292	jul-90	430.9	143.71	28.9319444	-109.748333
San Javier	1985	1368	jul-90	593	257.05	28.5941667	-109.738333
Tónichi	1988	959.5	jul-45	879	805.25	28.6	-109.566667
P. Elías C	1987	795.6	ene-66	297.5	111.24	28.9811111	-109.631111
Suaqui SMN	1959	715.5	jul-54	344.5	165.87	29.2	-109.683333
Bacanora	1987	855.7	jul-75	228.5	61.02	28.9825	-109.400278
Suaqui Grande	1988	658	ene-61	502.5	383.75	28.3947222	-109.890278

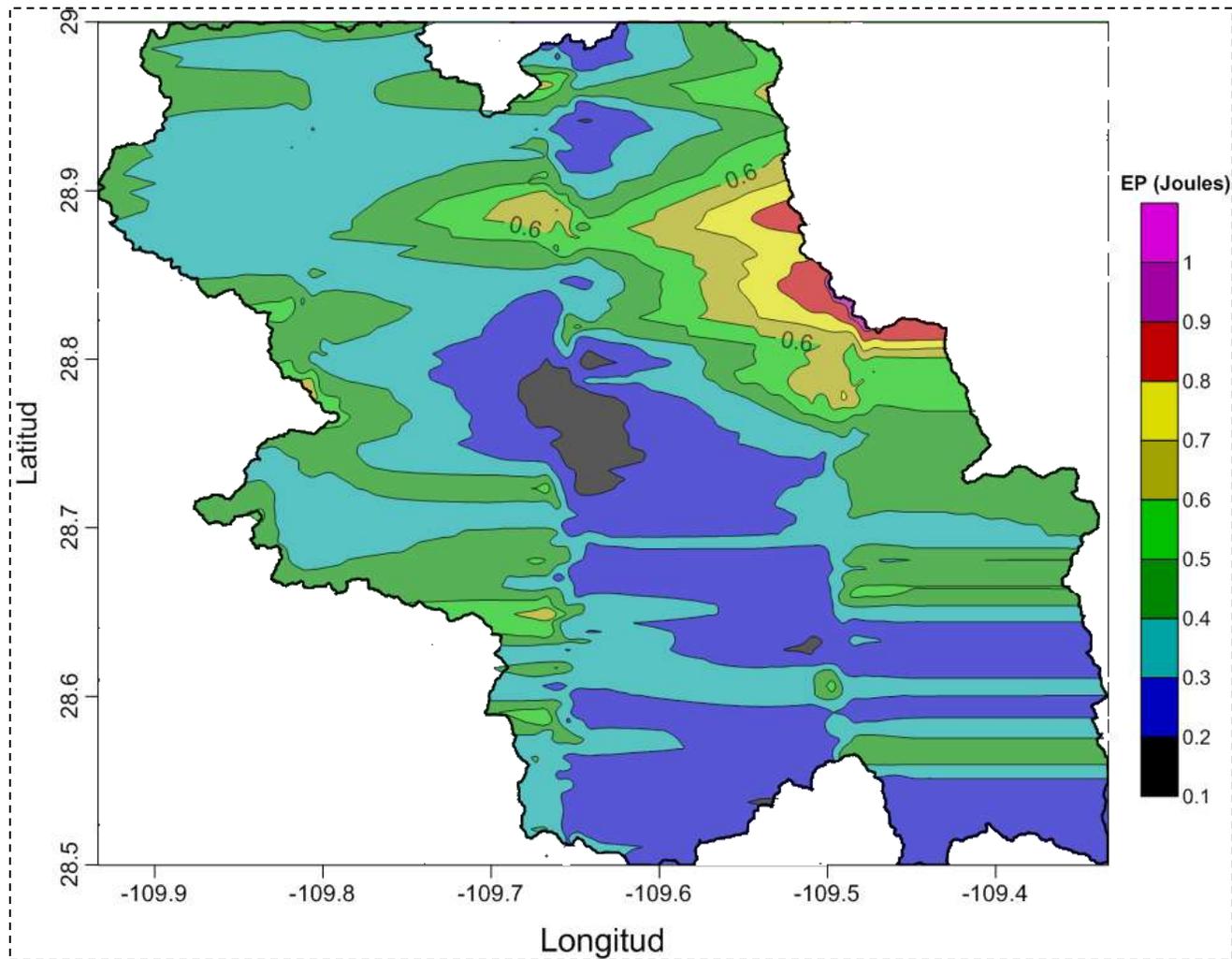


Figura 49. Mapa de la Energía Potencial de las Lluvias para la zona de estudio.

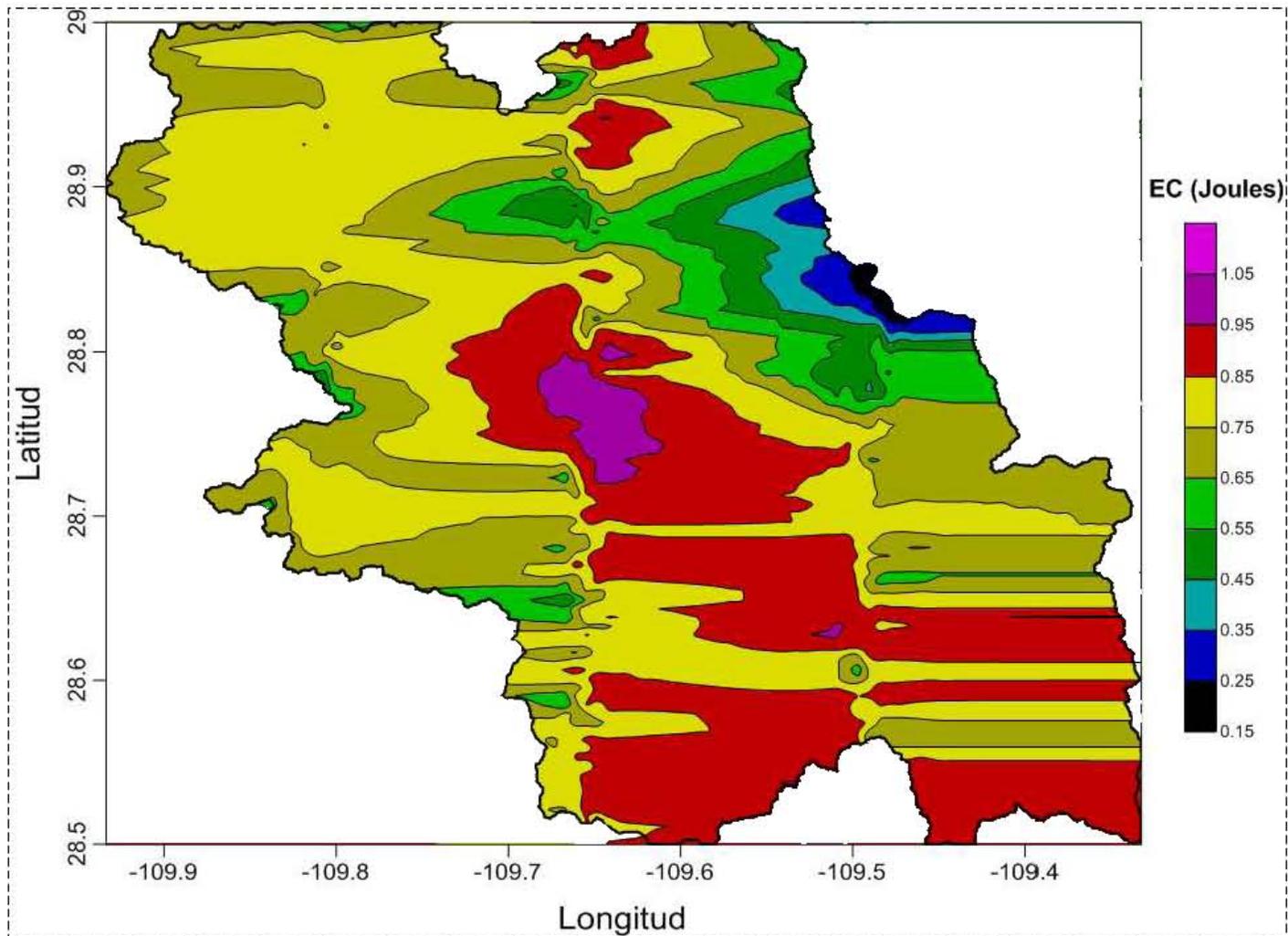


Figura 50. Mapa de la energía cinética debido a la lluvia en la zona de estudio

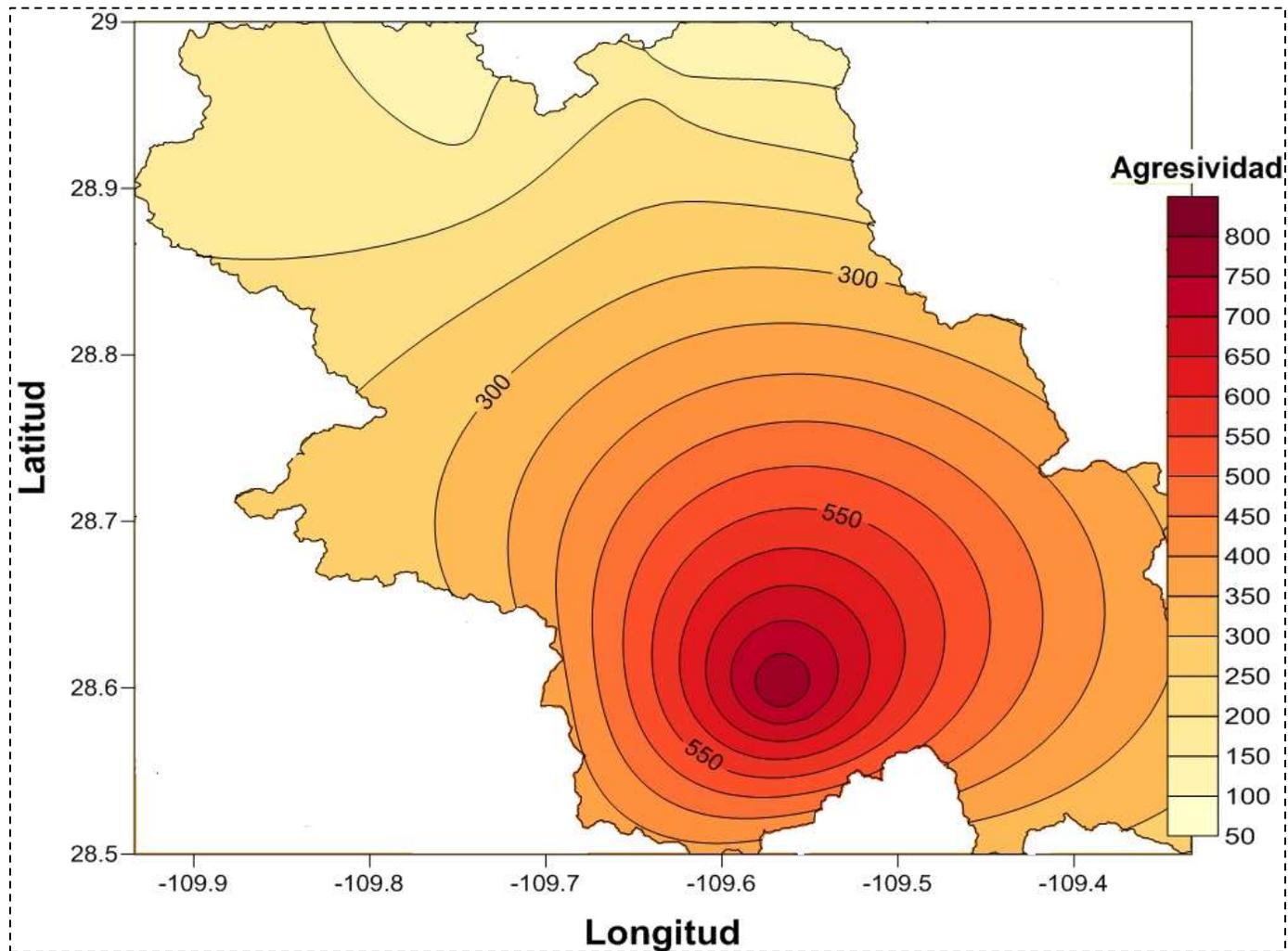


Figura 51. Mapa de la agresividad de las lluvias para I30, elaborado a partir de datos de la SCT/DGST. Este mapa representa el nivel de agresividad de las lluvias con una duración de 30 minutos, presentando los valores más altos en rojo y en amarillo claro los más bajos. La importancia de este mapa reside en el poder erosivo que posee la lluvia según la intensidad que ésta posee.

4.2.3. Análisis de la evaluación del sistema fluvial mediante sensoría remota

La Figura 52 presenta la distribución de los grupos encontrados en el análisis CLUSTER limitado a 30 grupos, ya que éstos representan más del 98% de los datos analizados por IDRISI.

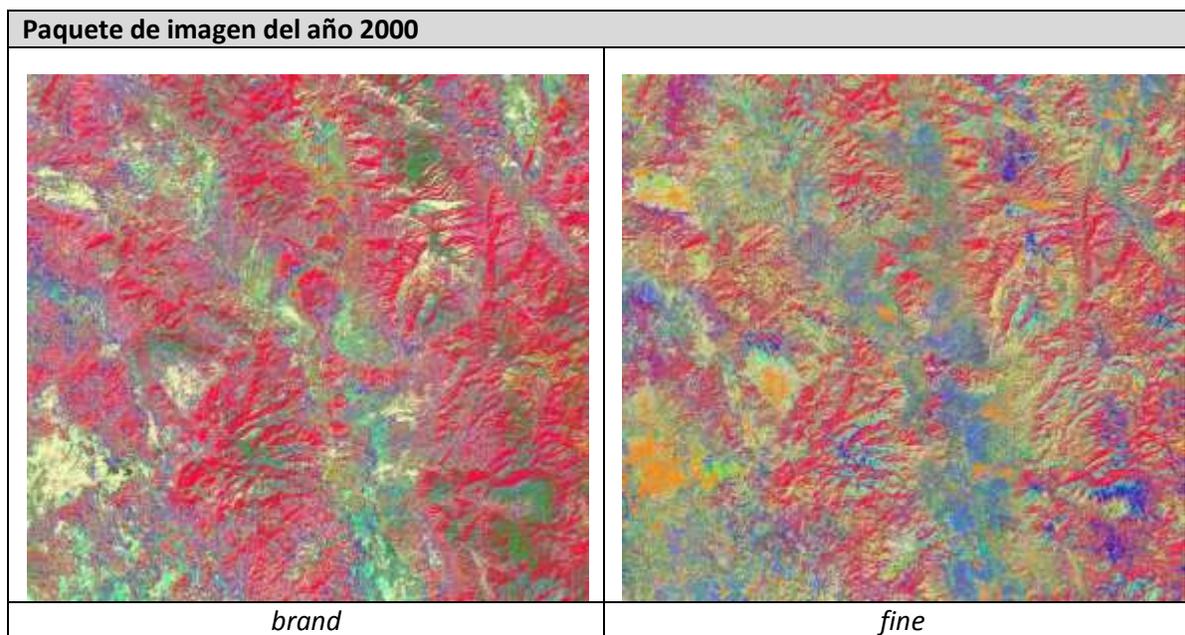


Figura 52. Imágenes resultante de la clasificación libre subtipos *fine* y *brand* (*fino* y *grosso*). Los colores presentados en estas imágenes representan los *cluster* de píxeles formados por las bandas 1-5 y 7 que las conforman, provenientes de los sensores Landsat ETM+. Estas imágenes están conformadas por 30 colores los cuales representan el 98% del total de datos aportados por el análisis espectral de las bandas 1-5 y 7 Landsat ETM+. Las firmas espectrales similares poseen el mismo valor de asignación en su píxel y por tanto el mismo color.

La Tabla 25 presenta los valores de los límites superior e inferior, considerando las ecuaciones 22 y 23 para las imágenes de las distintas fechas analizadas. La Tabla 26 presenta los *LI* y *LS* basados en 2.5σ para hacer más sensible la detección de cambios en la composición de las imágenes.

Tabla 25. Valores límite superior e inferior con base en 3 veces las desviaciones estándar

<i>Fechas</i>	<i>Periodo</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. Stand.</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
2000-1991	9	-0.704	7.728	-23.888	22.48
2004-2000	4	-1.804	8.776	-28.132	24.524
2004-1991	13	-3.158	9.768	-32.462	26.146

Tabla 26. Valores límite superior e inferior modificados con base en las desviaciones estándar propuestas, para realizar los cambios.

Fechas	Periodo	Media	Desv. Stand.	LI	LS
2000-1991	9	-0.704	7.728	-20.024	18.616
2004-2000	4	-1.804	8.776	-23.744	20.136
2004-1991	13	-3.158	9.768	-27.578	21.262

El resultado de las regresiones lineales de los arreglos para distintos paquetes de bandas entre las imágenes satelitales ETM+ 1991 y 2004 de Landsat se muestran en la siguiente serie de figuras, este arreglo se eligió debido a que posee la mayor desviación estándar y un período de tiempo de 13 años, con lo que se espera que los cambios en el terreno sean de mayor magnitud que en cualquier otro arreglo de imágenes de distintas fechas (Figuras 53, 54, 55, 56, 57 y 58).

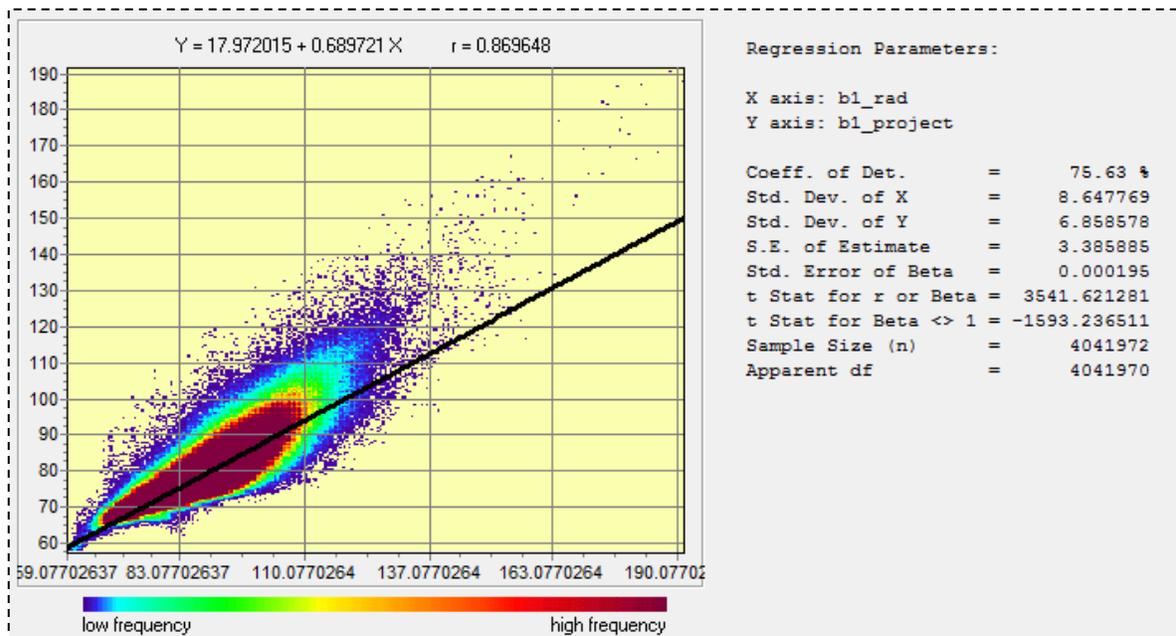


Figura 53. 1991-2004. La ecuación $Y=17.972015+0.689721X$ señala que los valores de 1991 con base en la banda 1 (azul) no pueden explicar el 24.37% de los valores de la imagen del 2004 y que el resto de ellos posee una desviación en la recta, es decir el término (b) de 17.97 unidades. El coeficiente de correlación (r) se eleva al cuadrado para producir el coeficiente de determinación, el cual indica que cerca del 75.63% de la variabilidad en 2004 puede ser explicado por la variabilidad en 1991; la pendiente de la recta es 0.689721, valor que indica el tamaño de los incrementos durante el cambio. Si el valor de (t) es muy alto, sugiere que han existido diferencias que se consideran significativas; sin embargo a la escala de las imágenes con las que se han trabajado es difícil explicar el por qué de estos cambios tan importantes.

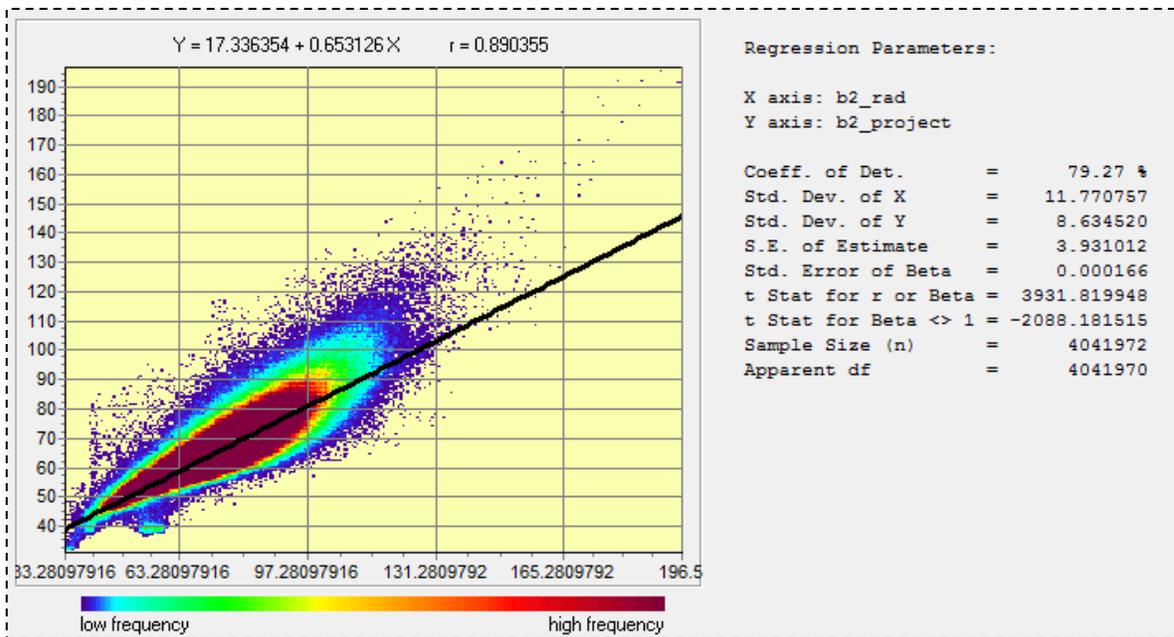


Figura 54. 1991-2004. La ecuación $Y=17.336354+0.653126X$ señala que los valores de 1991 con base en la banda 2 (verde) no pueden explicar el 20.73% de los valores de la imagen del 2004 y que el resto de ellos posee una desviación en la recta, es decir el término (b) de 17.33 unidades. El coeficiente de correlación (r) se eleva al cuadrado para producir el coeficiente de determinación, el cual indica que cerca del 79.27% de la variabilidad en 2004 puede ser explicado por la variabilidad en 1991; la pendiente de la recta es 0.653126, valor que indica el tamaño de los incrementos durante el cambio. Si el valor de (t) es muy alto, sugiere que han existido diferencias que se consideran significativas; sin embargo a la escala de las imágenes con las que se han trabajado es difícil explicar el por qué de estos cambios tan importantes.

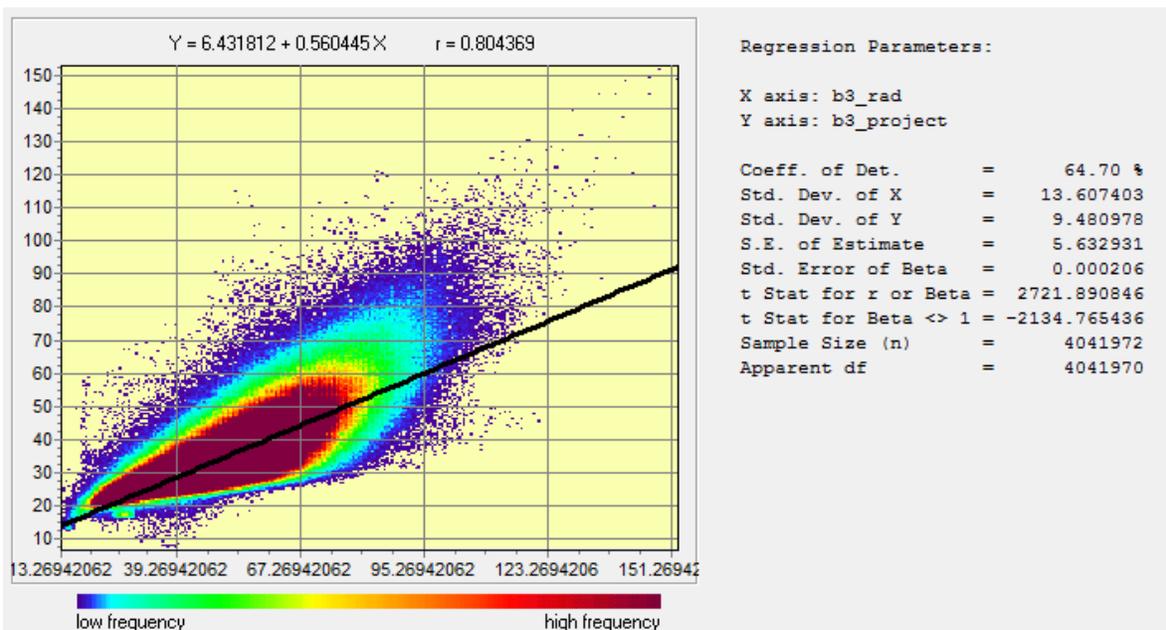


Figura 55. 1991-2004. La ecuación $Y=6.431812+0.560445X$ señala que los valores de 1991 con base en la banda 3 (roja) no pueden explicar el 35.30% de los valores de la imagen del 2004 y que el resto de ellos posee una desviación en la

recta, es decir el término (b) de 6.431812 unidades. El coeficiente de correlación (r) se eleva al cuadrado para producir el coeficiente de determinación, el cual indica que cerca del 64.70% de la variabilidad en 2004 puede ser explicado por la variabilidad en 1991; la pendiente de la recta es 0.560445, valor que indica el tamaño de los incrementos durante el cambio. Si el valor de (t) es muy alto, sugiere que han existido diferencias que se consideran significativas; sin embargo a la escala de las imágenes con las que se han trabajado es difícil explicar el por qué de estos cambios tan importantes.

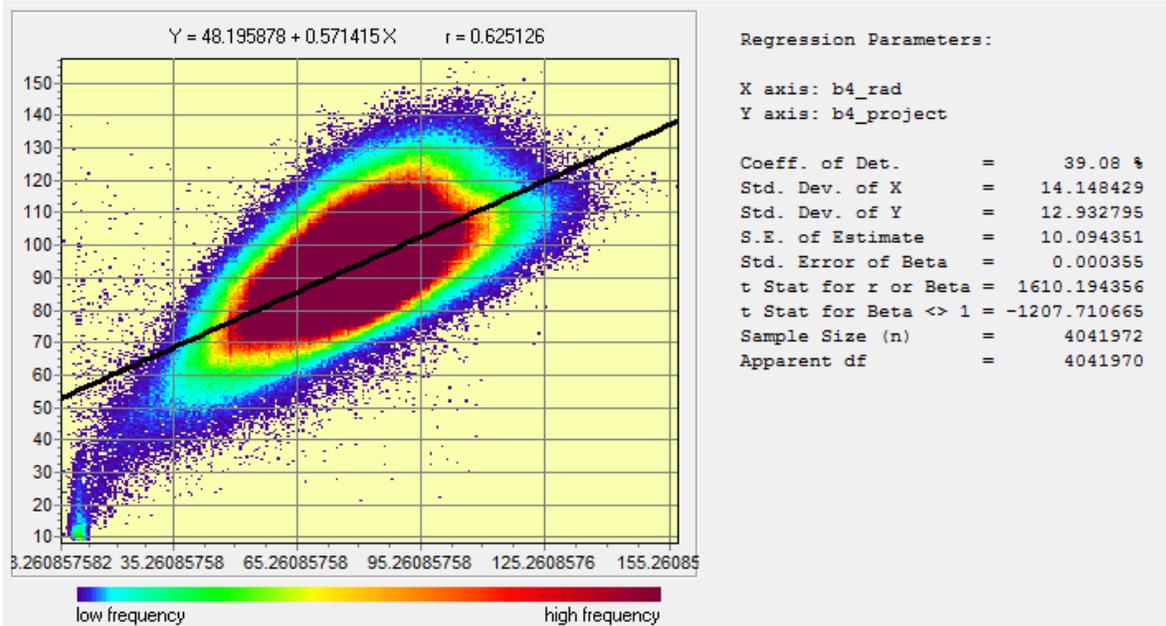


Figura 56. 1991-2004. La ecuación $Y=48.195878+0.571415X$ señala que los valores de 1991 con base en la banda 4 (infra roja) no pueden explicar el 60.92% de los valores de la imagen del 2004 y que el resto de ellos posee una desviación en la recta, es decir el término (b) de 48.19 unidades. El coeficiente de correlación (r) se eleva al cuadrado para producir el coeficiente de determinación, el cual indica que cerca del 39.08% de la variabilidad en 2004 puede ser explicado por la variabilidad en 1991; la pendiente de la recta es 0.571415, valor que indica el tamaño de los incrementos durante el cambio. Si el valor de (t) es muy alto, sugiere que han existido diferencias que se consideran significativas; sin embargo a la escala de las imágenes con las que se han trabajado es difícil explicar el por qué de estos cambios tan importantes. Sin embargo para trabajos con Geoindicadores que excluyan la componentes biótica, las bandas pertenecientes al infrarrojo deben utilizarse con meticulosidad o de preferencia excluirse debido a su sensibilidad y que los cambios bióticos son mucho más rápidos que los abióticos.

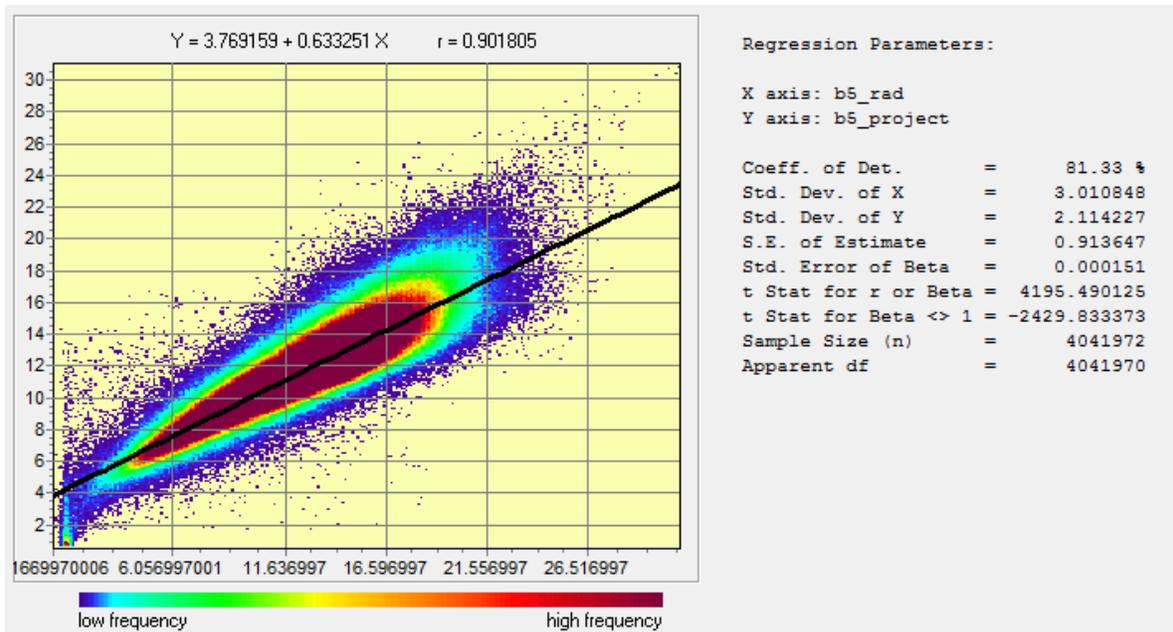


Figura 57. 1991-2004. La ecuación $Y=3.769159+0.633251X$ señala que los valores de 1991 con base en la banda 5 (infra roja baja) no pueden explicar el 18.67% de los valores de la imagen del 2004 y que el resto de ellos posee una desviación en la recta, es decir el término (b) de 3.76 unidades. El coeficiente de correlación (r) se eleva al cuadrado para producir el coeficiente de determinación, el cual indica que cerca del 81.33% de la variabilidad en 2004 puede ser explicado por la variabilidad en 1991; la pendiente de la recta es 0.633251, valor que indica el tamaño de los incrementos durante el cambio. Si el valor de (t) es muy alto, sugiere que han existido diferencias que se consideran significativas, sin embargo a la escala de las imágenes con las que se han trabajado es difícil explicar el por qué de estos cambios tan importantes. Sin embargo para trabajos con Geoindicadores que excluyan la componentes biótica, las bandas pertenecientes al infrarojo deben utilizarse con meticulosidad o de preferencia excluirse debido a su sensibilidad y que los cambios bióticos son mucho más rápidos que los abióticos, sin embargo en esta banda no se aprecia dicha sensibilidad y el explicar este comportamiento pudiera ser mucho más complicado que atribuirlo a que no es sensible a la vegetación o a un tipo de vegetación en particular.

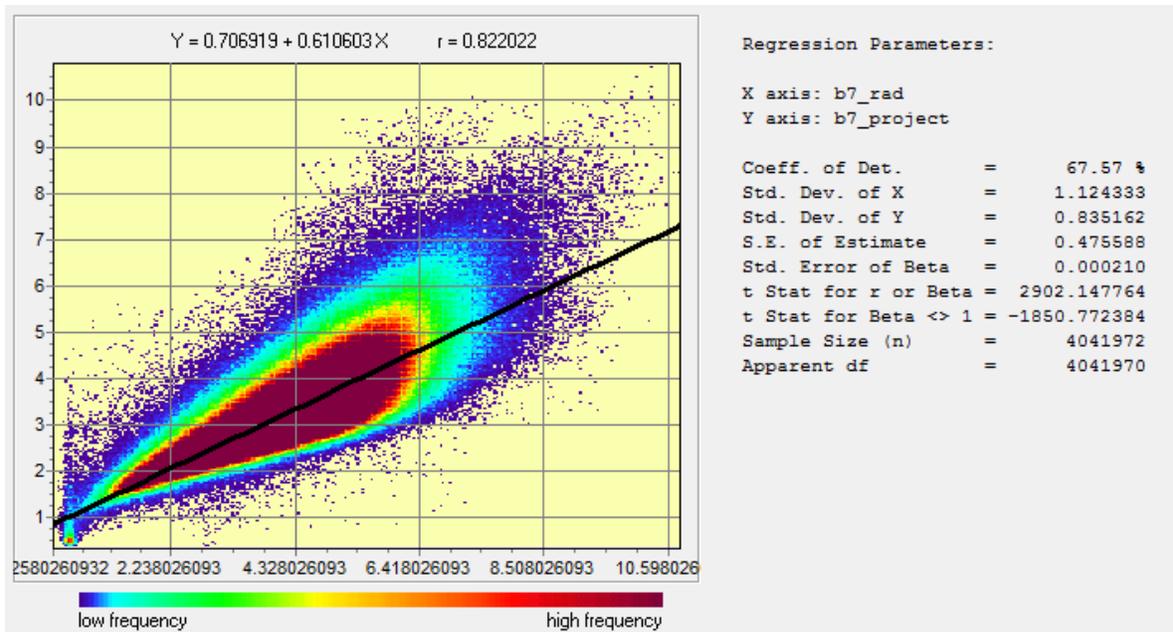


Figura 58. 1991-2004. La ecuación $Y=0.706919+0.610603X$ señala que los valores de 1991 con base en la banda 7 (infra roja alta) no pueden explicar el 32.43% de los valores de la imagen del 2004 y que el resto de ellos posee una desviación en la recta, es decir el término (b) de 0.706 unidades. El coeficiente de correlación (r) se eleva al cuadrado para producir el coeficiente de determinación, el cual indica que cerca del 67.57% de la variabilidad en 2004 puede ser explicado por la variabilidad en 1991; la pendiente de la recta es 0.610603, valor que indica el tamaño de los incrementos durante el cambio. Si el valor de (t) es muy alto, sugiere que han existido diferencias que se consideran significativas, sin embargo a la escala de las imágenes con las que se han trabajado es difícil explicar el por qué de estos cambios tan importantes. Sin embargo para trabajos con Geoindicadores que excluyan la componentes biótica, las bandas pertenecientes al infrarojo deben utilizarse con meticulosidad o de preferencia excluirse debido a su sensibilidad y que los cambios bióticos son mucho más rápidos que los abióticos.

La Figura 59 presenta el resultado de una imagen ajustada con la ecuación para la banda B3.

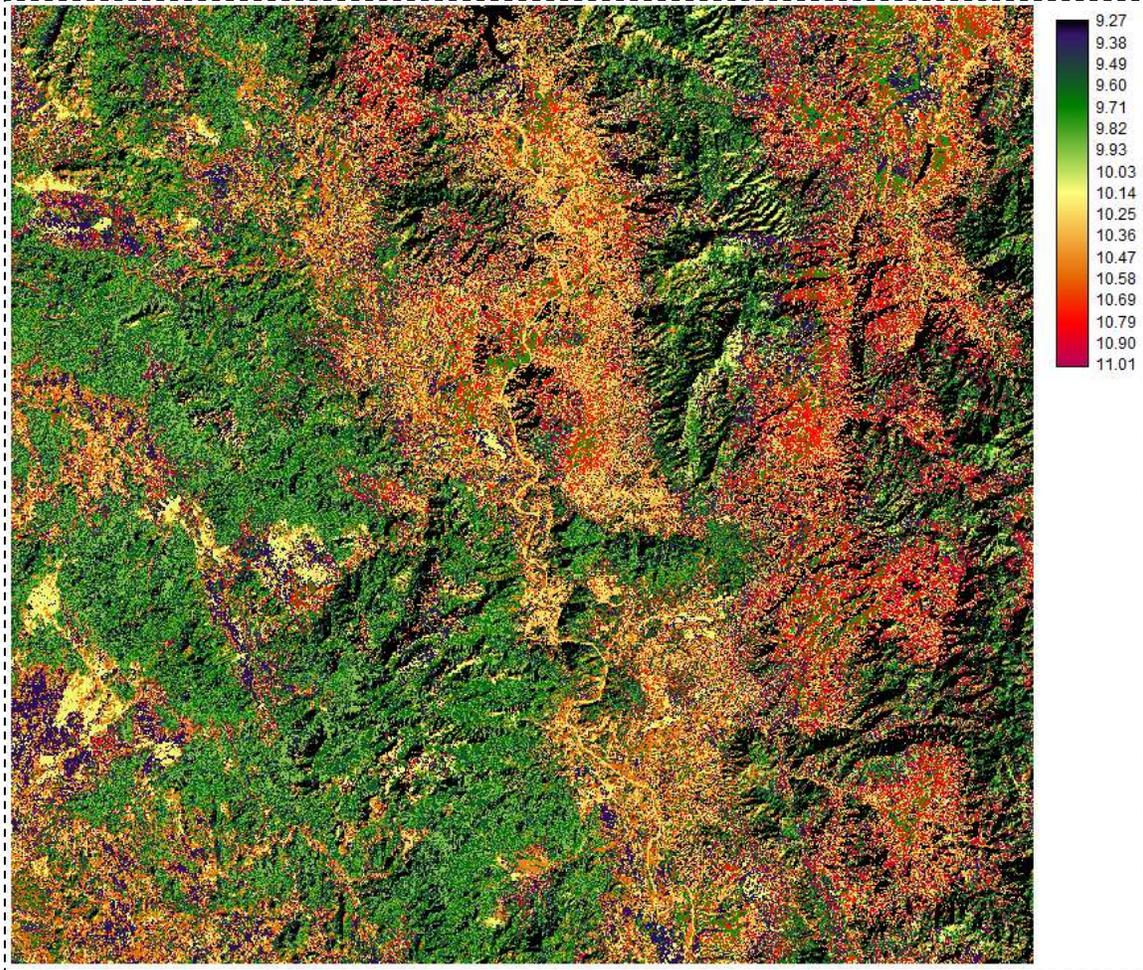


Figura 59. Ajuste del periodo 2004-1991 para la banda 3.

Las imágenes basadas en las diferencias de las $t_{n+1} - t_{na+1}$ para las bandas 3 y 7 se muestran en las Figuras 60 y 61 respectivamente. La intención de mostrar únicamente estas dos bandas es ver la sensibilidad y la asociación de los cambios en el sistema fluvial.

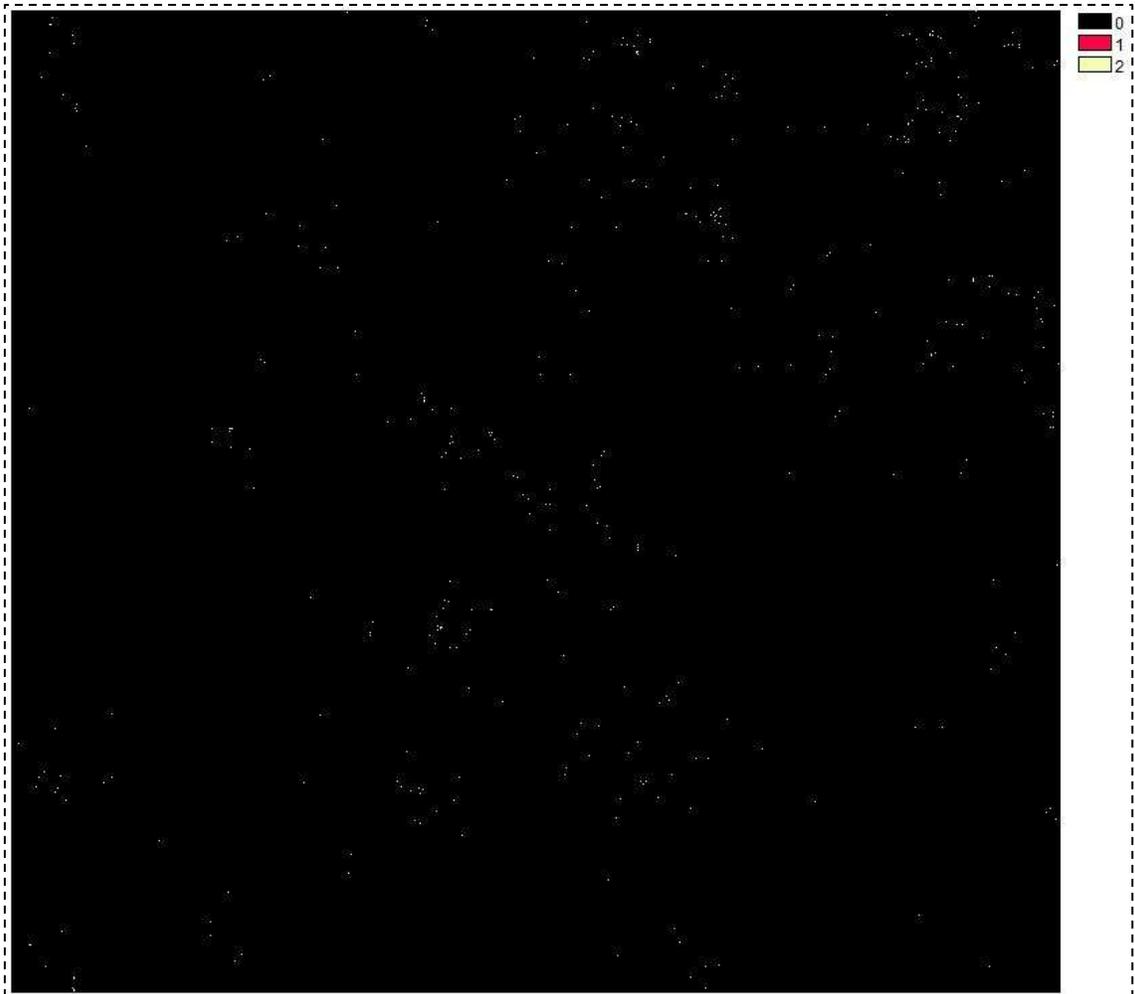


Figura 60. Los cambios encontrados para el periodo 1991-2004 para la banda 3 están representados por los puntos blancos y rojos.

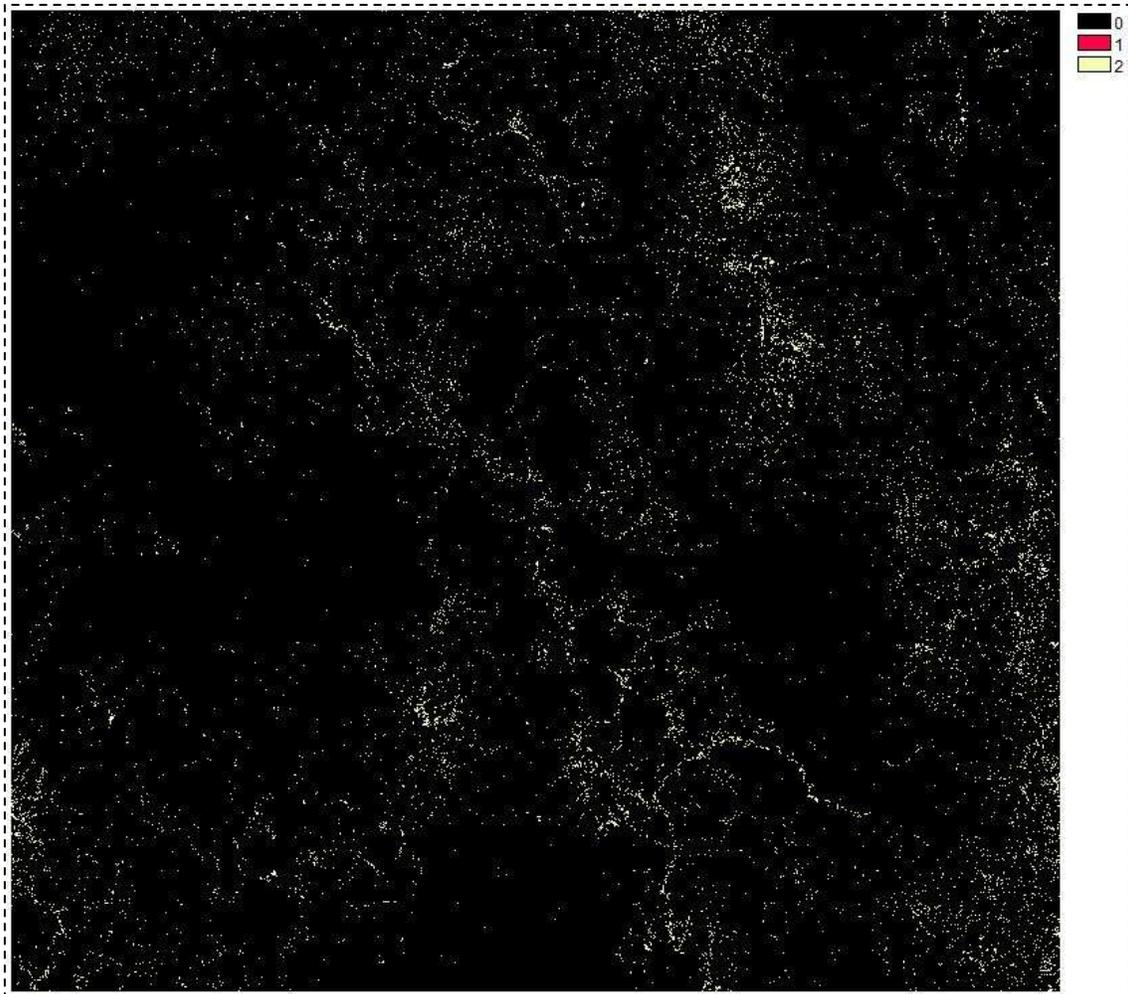


Figura 61. En contraste, con la Figura 61, esta imagen presenta los cambios detectados en el empleo de la banda 7. En ella la mayor parte de los cambios se pueden atribuir a vegetación o debido a cambios de humedad y/o el drenaje del sistema. La banda infrarroja registra cambios que puede ser atribuido a la vegetación del sitio; la disminución en los valores de esta banda señala una mayor absorción de esta longitud de onda, debido a la fotosíntesis. Sin embargo, el efecto que posee el suelo húmedo sobre el valor de la reflectancia debe ser considerado, ya que un suelo “seco” posee una alta reflectancia, tanto para la banda roja como infrarroja, mientras que un suelo húmedo absorbe ambas bandas, lo que resulta en bajos valores de reflectancia.

Finalmente se e vectorizan los mapas de cambios, con lo cual es posible crear los mapas de dirección y magnitud del cambio (Figura 62). La B3 representa el cambio, mientras que la B4 representa la dirección.

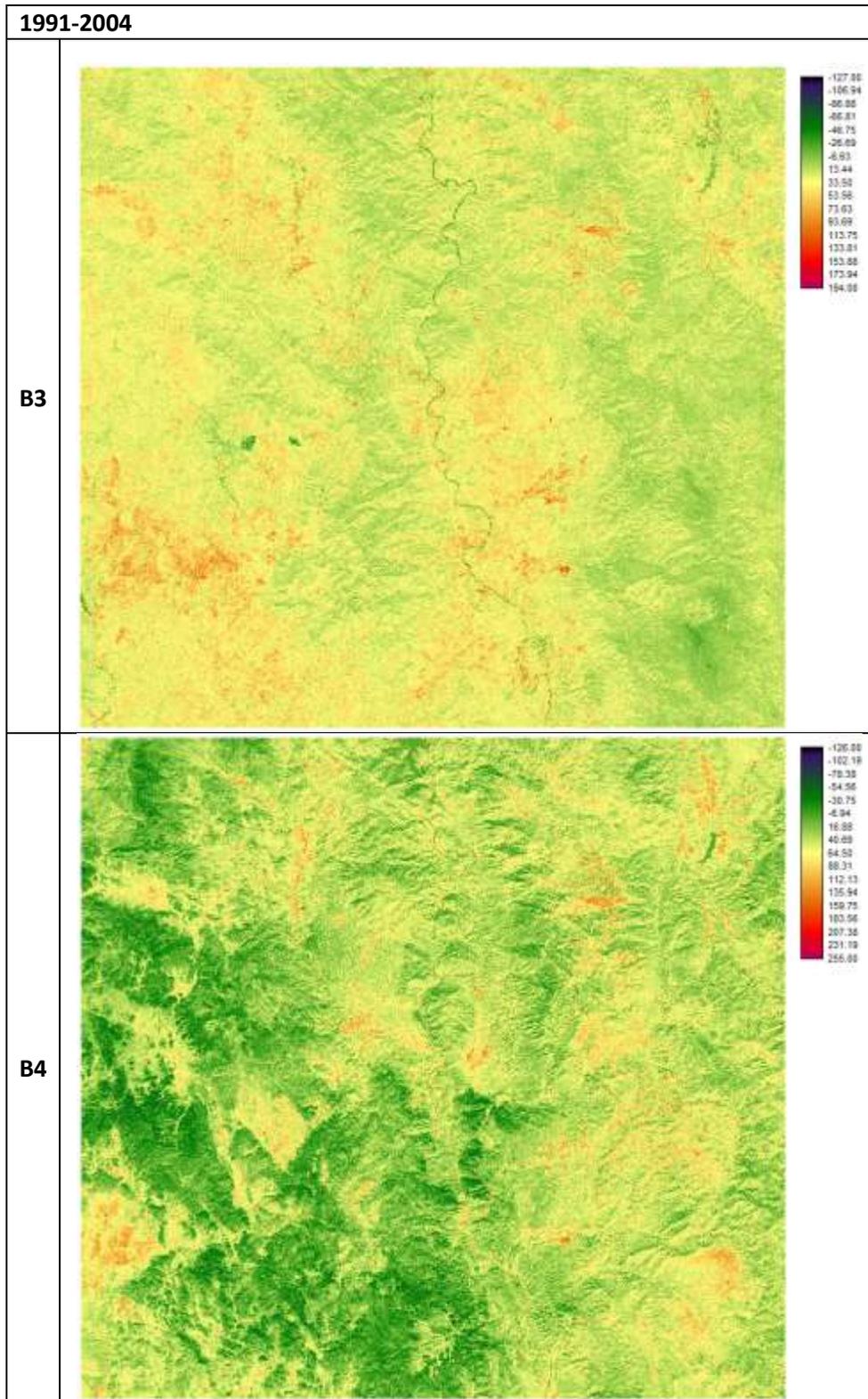


Figura 62. Mapas que representan la dirección del cambio para las bandas 3 y 4.

Nuevamente se recurre a la clasificación de los cambios; se emplea como criterio a mostrar cambios con una magnitud de 3σ ; el resultado se presenta en la Figura 63.

Fecha	Imagen resultante	Comentario
1991-2004		<p>Existen varias zonas con cambios significativos, los cuales pueden ser explicados por las variaciones climáticas; algunos cambios pertenecen cercanos a áreas con cuerpos de agua.</p>

Figura 63. La imagen muestra en rojo aquellos cambios que poseen un valor igual o superior a la media + 3σ .

Las imágenes con las direcciones de cambio determinan la dirección preferencial de la evolución de nuestro sistema, el cual presenta el siguiente resumen estadístico (Tabla 27):

Tabla 27. Muestra el porcentaje de las áreas con cambios superiores al LS establecido y el ángulo de cambio preferente.

Porcentaje	Angulo
39.37	96.373
41.64	82.839
17.55	153.525
1.38	314.289
0.06	otros

Los cambios registrados en el análisis de evaluación, también registra los efectos producido en el sistema fluvial debido a las actividades mineras a largo plazo (Macklin et al., 2002), así como la calidad del agua y el estado de la vegetación. Estos cambios en la calidad del agua y la vegetación

afectan la geomorfología, ya que dotan de estabilidad o inestabilidad a los componentes del sistema fluvial. Recientemente se ha incorporado como indicador de la calidad ambiental el uso de la reflectancia, para identificar suelos contaminados y su evolución a través del tiempo (Kooistra *et al.*, 2004). Este estudio se lleva siguiendo los cambios de la vegetación debido a modificaciones de su composición bioquímica (por ejemplo: las concentraciones de clorofila) y fisiológica, conforme las cantidades o concentración de los contaminantes y/o metales pesados varían respecto al tiempo. Estas modificaciones, posee una influencia en la reflectancia vegetal, de ahí que pueda emplearse dicha modificación de forma directa como un indicador de la contaminación del suelo, sedimentos y la calidad del agua (Kooistra *et al.*, 2004).

4.3. PLANTEAMIENTO DEL MONITOREO - LA IMPLICACIÓN DE LA PRESIÓN OCASIONADA POR UNA PRESA

Los cambios presentados aguas abajo de las presas, son muy complejas, tanto en parámetros espaciales como temporales, ya que es difícil asegurar cuánto durará su período de relajación frente a los estímulos o presiones que sean introducidas al sistema; como se ha visto, estos períodos de ajuste pueden tomar décadas o incluso milenios. Además, debemos considerar el papel que juega la vegetación ribereña en el desarrollo y control del canal, lo cual debe ser determinado, ya que sin este conocimiento, la predicción de las tasas y dirección de los cambios en el canal permanecerán siendo una interrogante.

Los cambios en la forma del canal, no son una entidad distinta a las respuestas o manifestaciones ecológicas de la biota del sistema fluvial que se esté estudiando, por lo que, deben ser consideradas a la hora de establecer los parámetros que darán origen o por lo menos configurarán la sensibilidad de los geoindicadores. Por ejemplo, la operación de presas y los patrones en el uso de suelo juntos influyen tanto espacial como temporalmente a cambios en la morfología del sistema fluvial y sus componentes bióticos, alterando sus regímenes de temperatura, flujo, nutrientes, etc., de lo cual induce al sistema a una alteración en el transporte y distribución normal de su energía, lo cual se traduce en numerosas implicaciones biológicas (Lessard y Hayes, 2003; Ligon *et al.*, 1995; Collier *et al.*, 1996; Shields *et al.*, 2000), mismas que escapan a los propósitos de este trabajo.

La mejor forma de explicar el impacto de una presa sobre un río es como lo expresaron Collier *et al.*, 1996:

“El río que emerge de una presa no es el mismo río que entró en el reservorio”.

5.1 RECOMENDACIONES

Se recomienda la creación de un índice para evaluar la eficiencia y la cinética de los procesos de intemperismo (vulnerabilidad) que suceden en el sistema fluvial, considerando la litología y edafología del sitio, o del “eslabón” más débil; es decir el que más sedimentos pueda aportar. El empleo de referencias más sensibles como bioindicadores, pudiera solucionar el inconveniente de cambios muy rápidos. Otra alternativa sería la medición de la carga transportada por el río *in situ*; sin embargo esta alternativa supone mayores costos debido a las instalaciones, personal y equipo para realizar las mediciones.

Para iniciar con la segunda etapa de la metodología planteada, se debe delimitar el sistema considerando el canal de mayor orden (donde se establezca la presa) como el sistema de estudio, y delimitar la cuenca o sistema fluvial a analizar como el entorno de éste. Considerar la cuenca como sistema supone conocer un área mucho mayor al propio sistema y con un grado mayor de dificultad, sin mencionar que esto conlleva un aumento en los costos en la monitorización de este tipo de modelo. Además, se recomienda que el estudio de la distribución espacial de los elementos químicos, se vincule a la geología e hidrología, así como con todos aquellos factores que afecten al sistema de estudio, soportando el análisis sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG). Es importante incluir aspectos o consideraciones del transporte de los contaminantes, el depósito y re-movilización de los sedimentos contaminados, particularmente en un escenario de cambio climático.

Se sugiere complementar la metodología propuesta incluyendo:

- el empleo de isótopos radiogénicos de semiperíodo de decaimiento corto para rastrear la movilidad y velocidad de los sedimentos en el sistema.
- el empleo de modelos numéricos de dispersión de sedimentos asociados a metales, los cuales proveen de bases para la implementación de respuestas ante las presiones, sea su origen natural o antropogénico.

5.2 CONCLUSIONES

Es necesario considerar al sistema fluvial como un “continuo multivariable” asociado a un complejo de asociaciones infinitas. Por tanto, una conclusión plausible pareciera ser que no hay un índice universal para un sistema fluvial, por lo que es necesario seguir investigando, observando e incorporando todos los adelantos y metodologías que parecieran dar mayor información sobre los cambios que se producen en los sistemas fluviales. Se debe dar prioridad a sitios donde el monitoreo muestre evidencias de erosión y depósito, y que además estos sitios permitan la extrapolación a escalas de área mayores, debido a que la erosión ocurre en la mayor parte de una cuenca o sistema fluvial, sin embargo su producto (sedimento) se concentra localmente. Por tanto el almacenamiento del sedimento es más fácil de detectar y ser monitorizado. Se concluye que el proceso de depósito es mucho más eficiente como geoindicador que la erosión *per se*, ya que éste es detectado con mayor facilidad por la sensoría remota e imágenes aéreas, convirtiéndolo en el geoindicador más eficiente, en especial a aquellos que ocurren (depositan) en los márgenes del canal de mayor orden. El estudio del cauce principal o de mayor grado es suficiente para entender el comportamiento del resto del sistema, ya que si se sostiene la hipótesis de la herencia de la configuración del sistema de un estado anterior t_n , este canal es el producto de los cambios en todos los tributarios y cuencas.

La importancia de este trabajo en relación a los indicadores que maneja SEMARNAT recae en la consideración del aspecto geológico y ambiental como primera instancia; presenta indicadores basados en el sistema natural como punto de partida, y no al hombre o sus actividades como base fundamental del indicador. La principal aportación de esta metodología es la objetividad para plantear el estado del sistema fluvial sin la necesidad de clasificar o evaluar la representatividad de las variables que configuran el sistema, como sucede con los métodos que se emplean en la mayoría de las instituciones y tomadores de decisiones, lo cual influye en los resultados que se obtienen.

ACRÓNIMOS UTILIZADOS

CDS – Comisión de Desarrollo Sustentable

CFE – Comisión Federal de Electricidad

CNA, CONAGUA – Comisión Nacional del Agua

GOGEOENVIRONMENT – Comisión de Ciencias Geológicas para el Planteamiento Ambiental

INE – Instituto Nacional de Ecología

INEGI – Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

IUGS – International Union of Geological Sciences

LEGEEPA – Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

NASA – National Aeronautics and Space Administration

OCDE – Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

ONU – Organización de las Naciones Unidas

PNUMA – Programa de la Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

SEMARNAP – Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER – Secretaría de Energía

SGM – Servicio Geológico Mexicano

USGS – U.S. Geological Survey

REFERENCIAS

- Adams, W.J., Kimberle R.A., Barnett J.W., 1992, Sediment quality and aquatic life assessment: *Environmental Science and Technology* 26(10):1865 – 1875.
- Adriaanse, A., 1993, Environmental Policy Performance Indicators: Nature Indicators Survey, Denmark: Ministry of Environment and Energy. pp.66.
- Anderson, R.S., and Anderson S.P., 2010, *Geomorphology: The mechanics and chemistry of landscapes*: Cambridge University Press, pp.654.
- Angima, S.D., Stott D.E., O'Neil M.K., Ong C.K. and Weesies G.A., 2003, Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97(1):295-308.
- Baffaut, C., Nearing M.A., Nicks A.D., 1996, Impact of CLIGEN parameters on WEPP-predicted average annual soil loss: *Transactions of the ASAE* 39(2):447-457.
- Bell, S. y Stephen M., 1999, *Sustainability Indicators, Measuring the immeasurable*: Earthscan Publishing, pp.241.
- Berger, A.R. y Iams W.J., 1996, *Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems*: A.A. Balkema, pp.477.
- Berger, A.R., 1998, Environmental Change, Geoindicators and the autonomy of Nature: *GSA Today* 8(1):3-8.
- Bermejo, R., 2002, Los sistemas de indicadores como reflejo de las diversas concepciones de la sostenibilidad, *Indicadores ambientales, situación actual y perspectivas*: Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, pp.35-73.
- Bogen, J. 2006, Sediment transport rates of major floods in glacial and non-glacial rivers in Norway in the present and future climate, *Sediment dynamics and the Hidromorphology of Fluvial Systems: (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July) IAHS 306*: 148-158.
- Box, S.E., Bookstrom A.A., Ikramuddin A., 2005, Stream-sediment geochemistry in mining-impacted streams: Sediment mobilized by floods in the Coeur d'Alene-Spokane river system, Idaho and Washington: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report SIR 2005-5011.
- Bunn, S.E., Arthington A.H., 2002, Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity: *Environmental Management* 30(4): 492-507.
- Campo, S.H., and Desloges J.R., 1994, Sediment yield conditioned by glaciation in rural agricultural basin of Southern Ontario: Canada, *Physical Geography* 15(6):495-515.
- Chen, T., Niu R., Wang Y., Li P., Zhang L., Du B., 2010, Assessment of spatial distribution of soil loss over the upper basin of Miyun reservoir in China based on RS and GIS techniques: *Environmental Monitoring and Assessment* 179(1-4):605-617.
- Chevalier, S.R., Chiniere R., and Bernier L., 1992, Sharing nature's interest: Ecological footprints as an indicator of sustainability: Earthscan Publicacitions Ltd., pp.206.
- Christophoridis, C., Fytianos K., 2006, Conditions affecting the release of phosphorus from lake sediments: *Journal Environmental Quality* 35(4):1181-1192.

- Collier, M., Webb R.H., Schmidt J.C., 1996, Dams and Rivers: Primer on the Downstream Effects of Dams: U.S. Geological Survey, Denver, CO. Circular 1126, pp.92.
- Dennis, I.A., Macklin M.G., Coulthard T.J., Brewer P.A., 2003, The impact of the October-November 2000 floods on contaminant metal dispersal in the Swale catchment, North Yorkshire, UK: Hydrological Processes 17(8):1641-1657.
- De la O Villanueva, M., 1993, Sedimentología y petrografía de la formación baucarit (Mioceno) en la cuenca de Tónichi-La Dura, Sonora, México: Universidad Autónoma de Nuevo León-Facultad de ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría, pp.63.
- Dotterweich, M., 2008, The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment: Geomorphology 101(1-2):192-208.
- Ekwue, E.I., 1990, Effect of organic matter on splash detachment and the processes involved: Earth Surface Processes and Landforms 15(2):175-181.
- Elwell, H.A., 1980, Design of safe rotational systems. Department of Conservation and Extension: Harare, Zimbabwe, pp.50.
- Evans, R., 1980, Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint, Soil erosion, chapter 4: Wiley and sons Ltd., pp. 109-128.
- Ferrier, G., 1999, Application of imaging spectrometer data in identifying environmental pollution caused by mining at Rodaquilar, Spain: Remote Sensing of Environment 68(2):125-137.
- Fournier, F., 1960, Climat et erosion: la relation entre l'erosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques: Presses Universitaires de France, pp. 201.
- Galay, V.J., 1983, Causes of River Bed Degradation: Water Resources Research 19(5):1057-1090.
- Garde, R.J., 2006, River Morphology: New Age International, 1^a ed., pp.502.
- Gibson, C.C., Ostrom E., y Ahn T.K., 2000, The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. Ecological Economics 32(2):217-239.
- Gordon, W.S., Famiglietti J.S., 2004, Response of the water balance to climate change in the United States over the 20th and 21st centuries: results from the VEMAP Phase 2 model intercomparisons: Global Biogeochemical Cycles 18, GB1030, pp. 16.
- Graf, W.L., 1999, Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts: Water Resources Research 35(4):1305-1311.
- Gregory, K.J., 1987, River channels, Human Activity and Environmental Processes: Wiley and sons, pp.482.
- Gregory, K.J., 2006, The human role in changing river channels: Geomorphology 79(3-4):172-191.
- Gurnell, A.M., Petts G.E., 2002, Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective: Freshwater Biology 47(4):581-600.
- Hack, J.T., 1957, Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland: U.S. Geological Survey Profesional Paper, 294-B, pp.215.

- Hardi, P. and Zdan T., 1997, *Assessing Sustainable Development: Principles in Practice*. Report of the Conference on Sustainable Development Performance Measurement: Canada: International Institute for Sustainable Development, pp.166.
- Horton, R.E., 1945, Erosional developments of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology: *Geological Association of America Bulletin* 56(3):275-370.
- Houze, R.A., 1993, *Cloud dynamics*: Academic Press, pp.557.
- Hudson-Edwards, K.A., Taylor K.G., 2003, The geochemistry of sediment-borne contaminants in fluvial, urban and estuarine environments: *Applied Geochemistry* 18(2):155-157.
- Humphreys, W.J., 1964, *Physics of the Air*: Dover, pp.676.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca INEGI-SEMARNAP, 1997, *Estadísticas del Medio Ambiente en México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática/Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, P.838, Estado de México, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca INEGI-SEMARNAP, 1999, *Estadísticas del Medio Ambiente en México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática/Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, P.208, Estado de México, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática – Instituto Nacional de Ecología INEGI-INE, 2000, *Indicadores de desarrollo sustentable en México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, P.181, Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI, 2000, *Síntesis de información geográfica del estado de Sonora*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, P.87, Aguascalientes, México.
- Jackson, R.B., Carpenter S.R., Dahm C.N., McKnight D.M., Naiman R.J., Postel S.L., Running S.W., 2001, *Water in changing world*. Ecological Society of America: *Issues in Ecology* 9, pp.18.
- Jordan, T.E., D.L., Correll and Weller D.E., 1997, Relating nutrient discharges from watersheds to landuse and streamflow variability: *Water Resources Research* 33(11):2579-2590.
- Kinnell, P.I.A., 2004, Sediment delivery ratios: A misaligned approach to determining sediment delivery from hillslope: *Hydrological Processes* 18(16):3191-3194.
- Knighton, D.A., 1998, *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, Hodder Arnold Publication, pp.400.
- Lenzi, M.A., Mao L. and Comiti F., 2003, Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment: *Hydrological Science Journal des Sciences Hydrologiques* 48(6):899-915.
- Kooistra, L., Salas, E.A.L., Clevers, J.G.P.W., Wehrens, R., Leuven, R.S.E.W., Nienhuis, P.H., Buydens, L.M.C., 2004. Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution* 127, pp. 281-290.
- Leopold, L. B., 1959, Probability analysis applied to a water-supply problem: U.S. Geol. Survey Circular 410, pp.18.

- Lessard, J.L., Hayes D.B., 2003, Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams: *River Research and Applications* 19(7):721-732.
- Ligon, F.K., Dietrich W.E., Trush W.J., 1995, Downstream ecological effects of dams: *Biosciences*, 45(3):183-192.
- López, L.V.M., 2008, *Sustentabilidad y desarrollo sustentable: origen, precisiones conceptuales y metodología operativa*: Editorial Trillas, pp.220.
- Ludwing, W., Probst J.L., and Kempe S., 1996, Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion: *Global Biogeochemical Cycles* 10(1):23-41.
- Luna, B.L., Wolman M.G., Miller J.P., 1964, *Fluvial processes in geomorphology: The Dover edition*, pp.509.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005, *Estamos Gastando más de lo que poseemos: Capital Natural y Bienestar Humano*, MEA, pp.24.
- Macklin, M.G., Brewer, P.A., Coulthard, T.J., Turner, J.N., Bird, G., Hudson-Edwards, K.A., 2002, The chemical and physical impacts of recent mine tailing dam failures on river systems: key issues for sustainable catchment management in former and present metal mining areas. *Proceedings of a Seminar on Proposed EU Directive on Mining Waste*. Office of the Deputy Prime Minister, London, pp. 18-24.
- Magilligan, F.J., Nislow K, H., Graber B. E., 2003, Scale-independent assessment of discharge reduction and riparian disconnectivity following flow regulation by dams: *Geology* 31(7):569-572.
- Magilligan, F.J., Nislow K.H., 2005, Changes in hydrologic regime by dams: *Geomorphology* 71(1-2): 61-78.
- Maner, S.B., 1958, Factor affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area: *Transactions of American Geophysics* 39(4):669-675.
- Margalef, R., 1982, *Ecología*: Ediciones Omega, pp.451.
- Martín, J.M., Meybeck M., 1979, Elemental mass balance of material carried by world major rivers: *Marine Chemistry* 7(3):173-206.
- Melton, M.A., 1958, Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E4 phase space: *Journal of Geology* 66(1):35-56.
- Merzouk, A. and Blake G.R., 1991, Indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils: *Catena* 18(6): 537-550.
- Middelkoop, H., 2000, Heavy metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplain: *Netherlands Journal of Geosciences* 79(4):411-428.
- Ministry of Environmental Energy, 1995, *Nature indicators Surrey, Denmark*: Ministry of Environmental and Energy, pp.256.
- Montgomery, D.R. and Brandon M.T., 2002, Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges: *Earth and Planetary Science Letters* 201(3-4):481-489.
- Morgan, R.P.C., 1976, *The role of climate in the denudation system: a case study from Peninsular Malaysia*: In Derbyshire E., *Climate and geomorphology*, Wiley and sons, pp.317-343.
- Morisawa, M., 1968, *Streams: their dynamics and morphology*: McGraw Hill, pp.175.

- Muller, G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River: *Geojournal* 2(3):108-118.
- Nagle, G.N., Fahey T.J., Ritchie J.C. and Woodbury P.B., 2007, Variations in sediment sources and yields in the Finger Lakes and Catskills regions of New York: *Hydrological Processes* 21(3-4):828-838.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 1993, OECD core set of indicators for environmental performance reviews, A synthesis report by the group on the state of the environment: Environment monographs 83: OCDE/GD(93)179.
- Owens, P.N., Walling D.E., Leeks G.J.L., 1999, Use of floodplain sediment cores to investigate recent historical changes in overbank sedimentation rates and sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK: *Catena* 36(1):21-47.
- Peizhen, Z., Molnar P., Downs W.R., 2001, Increased sedimentation rates and grain sizes 2±4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates: *Nature* 410: 891-897.
- Petts, G.E., 1984, *Impounded Rivers: perspectives for ecological management*: Wiley and sons, pp.326.
- Petts, G.E. and Gurnell A.M., 2005, Dams and geomorphology: Research progress and future directions: *Geomorphology*, 71(1):27-47.
- PNUMA, 1987, *Impacto global de las actividades de las agencias medioambientales en el mundo*: Ed. PNUMA, UNEP/RE.87, pp.78.
- Poff, N.L., Allan J.D., Palmer M.A., Hart D.D., Richter B.D., Arthington A.H., Rogers K. H., Meyer J.L., Stanford J.A., 2003, River flows and water wars? Emerging sciences for environmental decision-making: *Frontiers Ecology Environment* 1(6):298-306.
- Poff, N.L., Bledsoe B.P., Cuhaciyan C.O., 2006, Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems: *Geomorphology* 79(3-4):264-285.
- Poff, N.L., Hart D.D., 2002, How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal: *Bioscience* 52(8):659-668.
- Prosser, I.P., Rutherford I.D., Olley J.M., Young W.J., Wallbrink P.J. and Morgan C.J., 200, Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia: *Marine and Freshwater Research* 52(1):81-99.
- Ramirez, L., 2002, *Indicadores ambientales: Una visión general, Indicadores ambientales-Situación actual y perspectivas*, Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, pp.306.
- Renschler, C.S., Harbor J., 2002, Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation: *Geomorphology* 47(2-4):189-209.
- Renschler, C.S., Mannaerts C., Diekkruger B., 1999, Evaluating spatial and temporal variability of soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain: *Catena* 34(3-4): 209-225.
- Richter, B.D., Mathews R., Harrison D.L., Wiginton R., 2003, Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity: *Ecological Applications* 13(1):206-224.
- Risse, L.M., Nearing M.A., Nicks A.D. and Laflen J.M., 1993, Error assessment in the Universal Soil Loss Equation: *Soil Science Society of America Journal* 57(3):825-833.

- Ro, C., 2008, *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*: Routledge, Taylor & Francis Group, pp.224.
- Rowan, J.S., Black S., Schell C., 1999, Floodplain evolution and sediment provenance reconstructed from channel fill sequences: the upper Clyde Basin, Scotland., In: Brown A.G., Quine T.A., *Fluvial Processes and Environmental Change*: Wiley and sons, pp.223-240.
- Rzhanitsyn, N.A., 1960, *Morphological and Hydrological Regularities of the Structure of the River Net.*: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Division, pp.380.
- Sánchez, P., 2002, *Indicadores ambientales urbanos y de sostenibilidad, Indicadores ambientales-Situación actual y perspectivas*, Madrid: Ministerio de Medio ambiente, pp.306.
- Schiels, F.D., Simon A., Steffen L.J., 2000, Reservoir effects on downstream river channel migration: *Environmental Conservation*, 27(1):54-66.
- Schumm, S.A., 1954, The Relation of Drainage Basin Relied to Sediment Loss. *International Union of Geodesy and Geophysics; 10th General Assembly*, Rome: IASH Publication 36(1):201-254.
- Schumm, S.A., 1956, *Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badland at Perth Amboy, New Jersey*: Geological Society of America Bulletin 67(5):597-646.
- Schumm, S.A., 1969, River metamorphosis, *Proceedings, American Society of Civil Engineers: Journal of Hydraulics Division* 95:255 – 273.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, 2007, *Programa sectorial de medio ambiente y recursos naturales 2007-2012*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp.170, Estado de México, México DF.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, 2005, *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp.120, Estado de México, México DF.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca SEMARNAP, 2000, *Reporte del estado ambiental y de los recursos de la frontera norte de México*, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. pp.258, Estado de México, México DF.
- Secretaría de Energía SENER, 2008, *Balance nacional de energía*. México, Subsecretaria de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección de Planeación Energética, Secretaría de Energía, pp.138, Estado de México, México DF.
- Superintendencia de Estudios Zona Pacifico Norte SEZPN, 1994, *Factibilidad geológica del proyecto hidroeléctrico Faustino, Sonora.*: CFE/GEIC Informe interno, pp.256.
- Spangenberg, J., 1998, *Sustainability Indicators: A compass on the Road Towards Sustainability*: Wuppertal paper 81:1-30.
- Sparks, D.L., 2003, *Environmental Soil Chemistry*, 2nd ed.: Academic Press, pp.345.
- Stanford, J.A., Ward J.V., Liss W.J., Frissell C.A., Williams R.N., Lichatowich J.A., Coutant C.C., 1996, *A general protocol for restoration of regulated rivers*: US Department of Energy Publications, *Regulated Rivers: Research and Management* 12:391-413.
- Stevaux, J.C., Martins D.P., Meurer M., 2009, *Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil*: *Geomorphology* 113(3-4):230-238.

- Strahler, A. H., 1952, Dynamic basis of geomorphology: Geological Society of America Bulletin 63(9):923-938.
- Strahler, A.N., 1957, Quantitative analysis of watershed geomorphology: American Geophysics Union 38(6):913-920.
- Summerfield, M.A. and Hulton N.J., 1994, Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins: Journal of Geophysical Research 99(13):871-884.
- Syvitski, J.P.M., Vorosmarty C.J., Kettner A.J. and Green P., 2005, Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean: Science 308(5720):376-380.
- Trimble, S.W., 1997, Contribution of stream channel erosion to sediment yield from an urbanizing watershed: Science 278(5342):1442-1444.
- Trimble, S.W. and Crosson P., 2000, U.S. soil erosion rates-Myth and reality: Science 289(5477):248-250.
- Troyer, M.E., 2002, A spatial approach for integrating and analyzing indicators of ecological and human condition: Ecological Indicators 2(1):211-220.
- United Nations, 2002, Earth Summit-Agenda 21, The United Nations Programme of Action from Rio: UN Department of Economical and Social Affairs-Division for Sustainable Development, United Nations, pp.249.
- Vanoni, V.A., 1975, Sedimentation engineering-ASCE manuals and reports on engineering practices: ASCE, pp.415.
- Vincent, K.R., Church S.E., Fey D.L., 1999, Geomorphological context of metal-laden sediments in the Animas River floodplain Colorado: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 99-4018A:99-106.
- Vitousek, P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Shlesinger W.H., Tilman D.G., 1997, Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences: Ecological Applications 7(3):737-750.
- Voroney, R.P., Van V.J.A. and Paul E.A., 1981, Organic carbon dynamics in grassland soils, Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion: Canadian Journal of Soil Science 61(6):211-224.
- Vörösmarty, C.J., Meybeck M., Fekete B., Sharma K., Green P. and Syvitski J.P.M., 2003, Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments: Global and Planetary Change 39(1-2):169-190.
- Walling, D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis A.A., Meharg A.A., Wright J., 2003, Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems: Applied Geochemistry 18(2):195-220.
- Wang, Z.Y., Wu B., Wang G., 2007, Fluvial processes and morphological response in the Yellow and Weihe Rivers to closure and operation of Sanmenxia Dam: Geomorphology 91(1-2):65-79.
- Wellmeyer, J.L., Slattery M., Phillips J.D., 2005, Quantifying downstream impacts of impoundment on flow regime and channel planform, lower Trinity River, Texas: Geomorphology 69(1-4):1-13.
- Wilkinson, B.H. and McElroy B.J., 2007, The impact of humans on continental erosion and sedimentation:

Geological Society of America Bulletin 119(1-2):140-156.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith., 1978, Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning, Department of Agriculture: Science and Education Administration, Agriculture Handbook 507, US Department of Agriculture, pp.58.

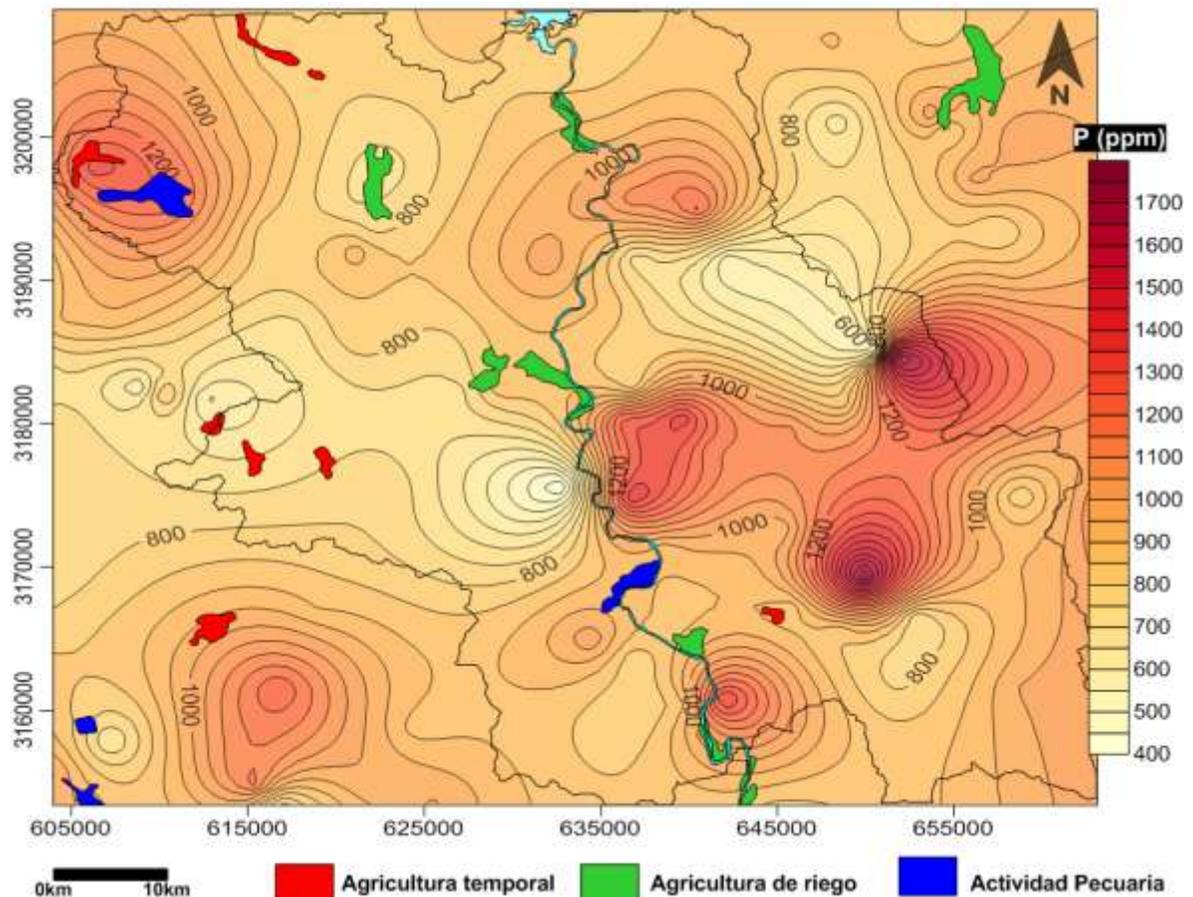
Wolman, M.G. and Leopold L.B., 1957, River Flood Plains: Some Observations on Their Formation: US Geological Survey Professional Paper 282-C:87-109.

Yoder, D.C., G.R. Foster G.A. Weesies K.G. Renard K.K. McCool and J.B. Lown., 2004, Evaluation of the RUSLE soil erosion model, In J.E. Parsons et al. (ed.) Agricultural non-point source water quality models: Their use and application. Southern Cooperative Series Bulletin 398:107-116.

ANEXO: GEOQUÍMICA DEL FÓSFORO

El fósforo es un importante nutriente, se relaciona con el proceso de eutrofización. Las fuentes naturales de fósforo son los procesos de intemperismo de las rocas formadas de minerales con contenidos de éste elemento; el mineral más común es el apatito $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$. En concentraciones suficientemente altas, el apatito, y los minerales fosfatados similares forman depósitos minerales, los cuales son minados para emplearlo como fertilizante. Por tanto, una fuente de fósforo de carácter antropogénico se asocia al drenaje con contenidos de fertilizantes, así como el drenaje asociado a detergentes y desechos humanos orgánicos.

La ocurrencia del fósforo esta ampliamente diseminada como un accesorio constituyente en toda clase de rocas, desde ígneas, sedimentarias a metamórficas. También se encuentra en pegmatitas y otro tipo de vetillas mineralizadas, probablemente de origen hidrotermal asociadas con rocas alcalinas. La figura que se muestra a continuación muestra la ubicación de los distintos usos de suelo, la delimitación de la cuenca de estudio y los puntos con las anomalías de éste elemento y su dispersión en el sistema de estudio.



El mapa muestra la ubicación de las zonas con actividades agrícolas y pecuarias, así como la delimitación de la cuenca de estudio y la distribución del fosforo en el área de estudio. Como se observa el fosforo no posee su origen en las actividades antropogénicas, en lugar de esto, se propone su origen en la unidad KsTpa Gr-Gd, una roca intrusiva clasificada como granito-granodiorita y diorita, la cual posee fluorapatito como mineral secundario.

KsTpa Gr-Gd (Granito-Granodiorita y Diorita)

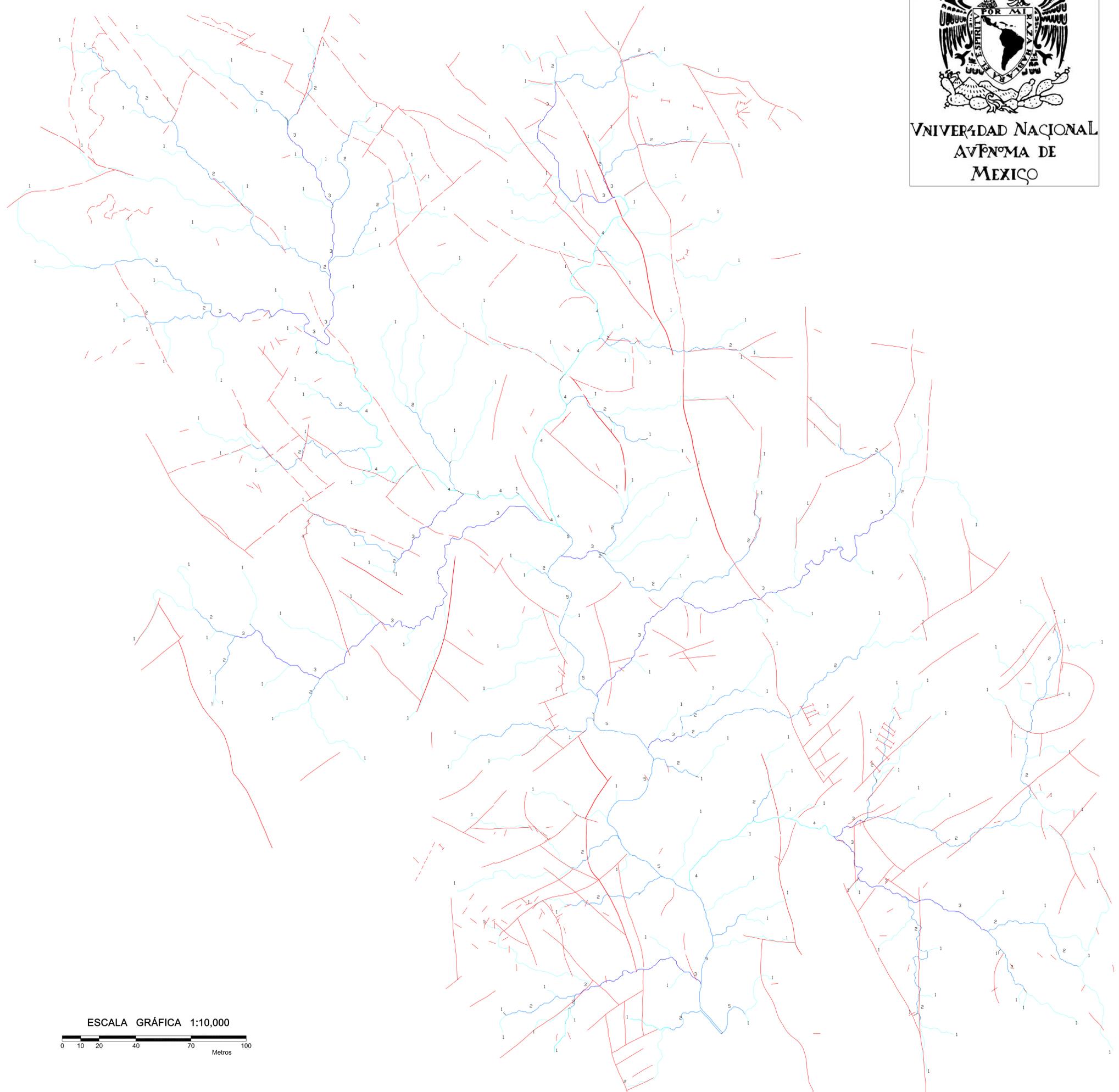
Rocas plutónicas, cuya composición varía de granito a granodiorita, con facies locales de tonalita a cuarzomonzonita, de color gris claro con tonos crema en superficie fresca y crema con tonalidades rojizas a la intemperie, su textura generalmente es equigranular y su estructura de deleznable a compacta y masiva.

Megascópicamente se le observan plagioclasa sódica, feldespato potásico, cuarzo, hornblenda y biotita, con alteraciones locales de propilitización, caolinización, seritización, cloritización y oxidación. Las muestras petrográficas, colectadas en las inmediaciones de la mina El Cobre, son de color gris claro con manchas blancas, textura fanerítica equigranular y se le observan hornblenda, plagioclasas, cuarzo y biotita. Fueron clasificadas como tonalita de biotita-hornblenda que presentan oligoclasa, biotita, cuarzo y hornblenda como minerales esenciales y hematita y magnetita como minerales secundarios.

Se clasificarán petrográficamente como una diorita de biotita-anfíbol, que presenta a la albita-oligoclasa, hornblenda y biotita como minerales esenciales, y a la magnetita, hematita y fluorapatito como minerales secundarios.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



CONFIGURACIÓN DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YAQUI

PARÁMETROS DEL DRENAJE

- Densidad de drenaje = 47
- Grado de desarrollo del drenaje de la cuenca = 5
- Longitud total de drenaje = 949,5196 km
- Numero de tributarios de:
 - 1er orden = 202
 - 2do orden = 44
 - 3er orden = 12
 - 4to orden = 3
 - 5to orden = 1
- Longitud aportada por tributarios de:
 - 1er orden = 504.72 km
 - 2do orden = 240.72 km
 - 3er orden = 109.94 km
 - 4to orden = 57.21 km
 - 5to orden = 36.83 km
- Longitud promedio por orden de tributario:
 - 1er orden = 2.498 km
 - 2do orden = 5.473 km
 - 3er orden = 9.162 km
 - 4to orden = 19.07 km
 - 5to orden = 36.83 km

- SIMBOLOGÍA :**
- Tributaria de grado 1
 - Tributaria grado 2
 - Tributaria grado 3
 - Tributaria grado 4
 - Tributaria grado 5
 - Fallas

PARÁMETROS DE LA CUENCA

- Área = 2006.49 km²
- Perímetro = 364.0 km
- Pendiente = 0.2663
- Longitud = 62.41 km
- Factor de forma = 1.94
- Factor de sinuosidad = 1.48
- Elevación promedio = 598.62
- Aspectos:
 - norte = 0.48
 - sur = 0.52
- Promedio de escorrentía = 1.16 km
- Distancia máxima de flujo = 95.13 km
- Pendiente máxima de flujo = 0.0113
- Longitud máxima de corriente = 92.12 km
- Pendiente máxima de corriente = 0.0090

- Localización de centroides en:
 - X = 634,770.48946
 - Y = 3,181,771.15974
- Distancia mínima del centroide a corriente = 0.49 km
- Distancia máxima del centroide a corriente = 38.57 km
- Pendiente del centroide a corriente = 0.0015

Dirección preferencial del drenaje

