

TESIS DEFENDIDA POR
Napoleón Gudiño Elizondo
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Codirector del Comité

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Codirector del Comité

Dr. Stephen Vaughan Smith
Miembro del Comité

Dra. Sarah C. Gray
Miembro del Comité

Dra. Elena Solana Arellano
Miembro del Comité

Dr. Antonio Gonzalez Fernandez
*Coordinador del programa de posgrado
en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

22 de Junio de 2012

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“EROSIÓN E INTEMPERISMO EN LAS CUENCAS CORAL BAY Y LAMESHUR,
ISLA SAINT JOHN DE ISLAS VIRGENES, EUA.”**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Presenta:

Napoleón Gudiño Elizondo

Ensenada, Baja California, México, junio del 2012.

RESUMEN de la tesis de Napoleón Gudiño Elizondo, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales. Ensenada, Baja California. Junio 2012.

“EROSIÓN E INTEMPERISMO EN LAS CUENCAS CORAL BAY Y LAMESHUR, ISLA SAINT JOHN DE ISLAS VIRGENES, E.U.A.”

Resumen aprobado por:

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar

Codirector del Comité

M.C. Alejandro Hinojosa Corona

Codirector del Comité

La Isla Saint John de Islas Vírgenes, E.U.A. se localiza a 80km al sureste de Puerto Rico, cubriendo un área de 50 Km². La erosión e intemperismo en la mayoría de sus cuencas hidrográficas representan un efecto potencial sobre el ecosistema marino. Durante tres tormentas del otoño 2010 se colectaron muestras de agua y sedimentos para analizar la variabilidad espacio-temporal en la composición disuelta del agua de escorrentía, y estimar la tasa de erosión media anual, así como la producida por el huracán Otto (5-8 octubre) sobre una cuenca con desarrollo urbano considerable (Coral Bay) y otra sin desarrollo (Lameshur). En base a la concentración de elementos disueltos se utilizó la ecuación de balance de masa para calcular los índices de saturación mineral inducidos por la interacción agua-roca por medio del software The Geochemist's workbench (GWB). Adicionalmente, se analizaron cinco muestras de sedimento con difracción de rayos X para identificar los productos de alteración química. Las tasas de erosión fueron estimadas con la ecuación universal de pérdida de suelo revisada y modificada (RUSLE y MUSLE). Los resultados indican mayor presencia de Illita y Caolinita (productos de alteración de feldespatos), mayores tasas de erosión y sedimentación costera en Coral Bay; además las imágenes analizadas en el microscopio electrónico de barrido mostraron consistentemente más fragmentos de rocas (caras frescas) en sedimentos de Coral Bay. Lo que sugiere que el desarrollo urbano sobre las cuencas hidrográficas puede estar acelerando la erosión del suelo, el intemperismo y la sedimentación costera, causando un potencial efecto negativo sobre el ecosistema marino.

Palabras Clave: escorrentía superficial, cuenca hidrográfica, RUSLE-MUSLE.

ABSTRACT of the thesis presented by Napoleon Gudiño Elizondo as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Earth Science with emphasis in Environmental Geosciences. Ensenada, Baja California, México June 2012.

“Weathering and soil erosion in Saint John US Virgin Island”

Saint John US Virgin Island is a small island (~50km²) located 80km to southeast from Puerto Rico in the eastern Caribbean. Weathering and soil erosion in Saint John represents a potential effect on the marine ecosystem. Soil and water samples were taken on three storms events (fall 2010) to estimate erosion rates (annual mean and produced by hurricane Otto) and weathering of the bedrock on a developed watershed (coral Bay) compared to undeveloped watersheds (Great and Little Lameshur) on Saint John, US Virgin Islands. Based on the dissolved concentration of the storm water samples I used the mass balance calculation, supported by an X-Ray Diffraction on clay minerals in order to characterize rock-water interactions. Erosion rates were calculated using the Revised and Modified Universal Soil Loss Equation (RUSLE – MUSLE). The results shown a relative high concentration of Illite and Kaolinite (alteration products of feldspars), erosion rates and coastal sedimentation on Coral Bay; furthermore SEM images shows more rock fragments and fresh faces on sediments in Coral Bay as well, suggesting that urban development on watersheds may increase the weathering, soil erosion and coastal sedimentation causing a negative effect on the marine ecosystem.

Keywords: Storm events, watershed, RUSLE-MUSLE

Dedicatorias

Este trabajo es dedicado a toda mi familia.

En especial a mi Padre, el Profesor Napoleón Gudiño González, que adelante esta, por la fortuna de haberlo tenido como Padre y por todas sus enseñanzas a lo largo del camino que recorrimos juntos.

A mi Madre por todo su apoyo y cariño en todo momento, Te amo Madre.

A mis hermanos, que juntos avanzamos en esta vida.

A Belinda, mi compañera en este viaje; Te amo chiquita.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico proporcionado para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada CICESE, por las facilidades otorgadas y apoyo económico proporcionado.

Al Dr. Thomas Kretzschmar, por el apoyo y confianza brindada para la realización de este trabajo.

A la Dra. Sarah C. Gray por aceptarme en su equipo de trabajo, por el apoyo tanto en el campo como durante la elaboración de este trabajo de Tesis

Al Dr. Stephen Smith, MC Alejandro Hinojosa Corona y Dra. Elena Solana Arellano, por el apoyo, las recomendaciones y observaciones realizadas para mejorar mi trabajo de tesis. Además de ser excelentes profesores en los cursos que me impartieron.

A los técnicos de Ciencias de la Tierra, a Mario Vega por el apoyo y colaboración en el manejo de las muestras y la determinación de cationes en el ICP, y a Gabriel Rendón por su valiosa ayuda en la preparación de las muestras de sedimento para la Difracción de Rayos X.

A la técnica del laboratorio de Difracción de Rayos X del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, por el análisis de las muestras de sedimento.

A las secretarías de Ciencias de la Tierra Martha Barrera e Ivonne Piedrín por su valioso apoyo administrativo a lo largo de mis estudios de posgrado.

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
Capítulo I. Introducción	1
I.I Antecedentes.....	4
I.II Hipótesis.....	8
I.III Objetivo del estudio.....	8
I.IV Área de estudio.....	9
I.IV.1 Localización.....	9
I.IV.2 Clima.....	10
I.IV.3 Fisiografía.....	10
I.IV.4 Geología.....	12
 Capítulo II. Materiales y Métodos	 14
II.I Toma de Muestras.....	14
II.II Análisis Hidrogeoquímico.....	14
II.III Corrección por sales recicladas.....	15
II.IV Índices de saturación mineral.....	16
II.V Análisis mineralógico.....	16
II.VI Difracción de rayos X.....	17
II.VII Microscopio electrónico de barrido.....	18
II.VIII Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE.....	18
II.IX Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada MUSLE.....	20
II.IX.1 Escurrimiento Superficial.....	21
II.IX.2 La descarga pico “q _p ”.....	23
II.X Caracterización de las cuencas.....	24
 Capítulo III. Resultados	 26
III.I Elementos mayores (cationes).....	26
III.I.1 Variación temporal.....	27
III.I.2 Variación espacial.....	35
III.II Solmineq.....	37
III.III The Geochemist’s Workbench.....	39
III.IV Difractometría de rayos X.....	41
III.V Microscopio electrónico de barrido.....	45

CONTENIDO (continuación)

	Página
III.VI Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE.....	49
III.VII Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada MUSLE.....	57
III.VIII Sedimentación Costera.....	62
III.IX Balance de erosión – sedimentación.....	65
Capítulo IV. Discusión.....	66
Capítulo V. Conclusión.....	72
Bibliografía.....	73

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Localización geográfica de las cuencas estudiadas.....	9
2	Geología de Saint John US Virgin Islands.....	13
3	Localización de las estaciones de muestreo de agua de escorrentía.....	26
4	Concentración de elementos disueltos en julio de 2010 en Lameshur.....	29
5	Concentración de elementos disueltos en Octubre de 2010 en Lameshur.....	29
6	Concentración de elementos disueltos en Septiembre de 2010 en Coral Bay.....	33
7	Concentración de elementos disueltos en Octubre de 2010 en Coral Bay.....	33
8	Difractograma de la muestra normal de Coral Bay.....	41
9	Difractograma de la muestra calcinada de Coral Bay.....	42
10	Difractograma de la muestra normal de Lameshur.....	43
11	Difractograma de la muestra calcinada de Lameshur.....	44
12	Imagen ampliada 270X de las arcillas en Lameshur Bay...	45
13	Espectro de dispersión de los elementos presentes en el suelo en Lameshur.....	46
14	Imagen ampliada 270X de las arcillas en Coral Bay.....	47
15	Espectro de dispersión de los elementos presentes en el suelo en Coral Bay.....	48
16	Localización geográfica de las estaciones meteorológicas...	49
17	Mapa de erodabilidad del suelo, factor ($\text{Mg hr MJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$).....	51
18	Mapa del factor compuesto LS de RUSLE.....	52
19	Tasa de erosión media anual de la cuenca Coral Bay.....	54
20	Tasa de erosión media anual de la cuenca Great Lameshur	55
21	Tasa de erosión media anual de la cuenca Little Lameshur..	56
22	Datos de precipitación del 2010 en Saint John USVI.....	57
23	Erosión potencial en Little Lameshur producida por el huracán Otto.....	59
24	Erosión potencial en Great Lameshur producida por el huracán Otto.....	60
25	Erosión potencial en Coral Bay producida por el huracán Otto.....	61
26	Localización de las trampas de sedimento submarinas.....	62
27	Tasa acumulada mensual de sedimentación en Coral Bay (Norte).....	63

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
28	Tasa acumulada mensual de sedimentación en Coral Bay (Sur).....	63
29	Tasa acumulada mensual de sedimentación en Great Lameshur.....	64
30	Tasa acumulada mensual de sedimentación en Little Lameshur.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Concentracion de elementos mayores en el agua de mar y su relación con el cloro.....	15
II	Valores de “p” de la comparación temporal en Lameshur...	27
III	Concentración de elementos mayores en las muestras de agua de tormenta de las cuencas Great y Little Lameshur, durante el 20 de julio de 2010 (en ppm).....	28
IV	Concentración de elementos mayores en las muestras de agua de tormenta de las cuencas Great y Little Lameshur, durante el 6-7 de Octubre del 2010.....	28
V	Valores de “p” de la comparación temporal en Coral Bay...	31
VI	Concentración de elementos mayores en las muestras de agua de tormenta de la cuenca Coral Bay, durante el 12 y 19 de septiembre del 2010 (en ppm).....	32
VII	Concentración de elementos mayores en las muestras de agua de tormenta de la cuenca Coral Bay, durante el 5-7 De octubre del 2010, huracán Otto.....	32
VIII	Valores de “p” para el total de muestras.....	35
IX	Valores de “p” durante el huracán Otto.....	36
X	Índices de saturación para los minerales seleccionados en Lameshur.....	37
XI	Índices de saturación para los minerales seleccionados en Coral Bay.....	38
XII	Índices de saturación para los minerales seleccionados en Lameshur (GWB).....	39
XIII	Índices de saturación para los minerales seleccionados en Coral Bay (GWB).....	40
XIV	Datos de precipitación promedio en dos estaciones de la Isla Saint John USVI.....	50
XV	Valores estadísticos del factor K en cada cuenca.....	51
XVI	Valores estadísticos del factor compuesto LS en cada cuenca.....	53
XVII	Factor C, McCreery (2007).....	53
XVIII	Balance de erosion-sedimentacion producido por el Huracan Otto.....	65

Capítulo I

Introducción

El intemperismo es la fracturación mecánica y descomposición química de los materiales rocosos expuestos a los agentes naturales (Rizvi, 2008). La fracturación mecánica convierte grandes masas de roca en clastos y sedimentos, mientras que la descomposición química transforma la roca en productos de alteración conocidos como minerales secundarios, estos productos de alteración además de proveer nutrientes esenciales para algunas plantas y animales, son el inicio de importantes procesos geomorfológicos y biogeoquímicos, como la erosión-depositación de sedimentos, la formación de rocas sedimentarias y suelos; siendo su principal fuerza motriz la escorrentía superficial.

La escorrentía es el agua procedente de la lluvia que circula por la superficie de la tierra y se concentra en los cauces. Este flujo de agua está en función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación (Tarbuck, 1999) e íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas. El agua que escurre en un río es captada en un área denominada cuenca, por lo general por la conformación del relieve (Fetter, 2001), diferenciándose dos tipos; Las cuencas cerradas en las que el flujo de agua no escurre más allá de sus límites, mientras que en las cuencas abiertas el flujo de agua se conecta con el cauce de una cuenca vecina o bien puede alimentar a un cuerpo de agua o desembocar en el océano. La composición salina de los océanos se debe al constante aporte de iones de sal de los continentes.

La erosión del suelo y su efecto sobre la calidad del agua a escala de cuenca es uno de los problemas ambientales más serios en tiempos recientes. Desde la década de 1930, el departamento de agricultura de Estado Unidos reconoció la erosión del suelo como un problema crítico e impulsó la investigación científica para entender y modelar cuantitativamente este proceso. Por lo que desarrollaron varios modelos numéricos para estimar tasas de erosión, en los que destaca el modelo propuesto inicialmente por Wischmeier y Smith en 1978 conocido popularmente como la Ecuación Universal de Pérdida del suelo (USLE por sus siglas en inglés), posteriormente revisado y mejorado por Renard, et al. 1994. Es importante señalar que este modelo ha sido aplicado en diferentes partes del mundo y es comúnmente utilizado para estimar tasas de erosión a nivel de cuencas. No obstante, el modelo RUSLE fue diseñado solamente para calcular la tasa de erosión media anual y es importante hacer notar que los mayores eventos de erosión en Saint John Virgin Island ocurren en eventos de tormenta extremos, es decir, en eventos de corto plazo que pueden ocurrir en cuestión de un par de horas o hasta en el transcurso de algunos días, lo que hace necesario cuantificar los cambios ocasionados por una tormenta en particular.

Williams (1975) propuso la ecuación universal de pérdida de suelo modificada MUSLE (por sus siglas en inglés), este modelo fue diseñado para cuantificar tormentas de corto plazo, es decir por tormentas individuales. Al incluir la escorrentía como un factor independiente en el modelo de erosión, MUSLE tiene una mayor precisión de la predicción de la erosión del suelo sobre USLE y RUSLE (Williams, 1975; Williams y Berndt, 1972; Erskine et al. 2002; Neitsch, et al. 2005; Sadeghi et al. 2004). Sin embargo este modelo no proporciona información más allá del sedimento, una vez que este fue erosionado, es decir, no predice la depositación “aguas abajo” en cuerpos de agua, lugar donde ocurren las consecuencias más importantes de la erosión, como son la contaminación y sedimentación.

Particularmente en la isla Saint John, las altas tasas de erosión en las cuencas representan un alto riesgo para el ambiente marino aguas abajo de los cauces en la mayoría de las cuencas de esta isla (Nemeth y Nowlis, 2001), debido al efecto potencial sobre la claridad del agua creado por extensas plumas de sedimento suspendido (Rogers, 1990), disminuyendo la penetración de la luz en la columna de agua, aumentando la mortalidad de los corales, inhibiendo su reproducción, fecundidad, asentamiento y dispersión de las larvas, entre otros efectos negativos en su ciclo de vida (Bothner et al., 2006). Hubbard et al. 1987 apuntan que existe una disminución en la tasa de crecimiento de los corales en algunas localidades costeras de Saint John, destino final de la escorrentía de estas cuencas, aunque no lo asocian a ninguna causa en específico. Por otra parte, se ha demostrado que las actividades humanas como la deforestación, la urbanización, la agricultura (Ramos et al., 1998), la eliminación de la vegetación natural y la construcción de caminos no pavimentados intensifican en gran medida las tasas de erosión en las Islas Vírgenes EUA. (MacDonald et al., 1997; Ramos-Scharron, 2005).

El objetivo de este estudio es determinar si las tasas de erosión y la calidad del agua producto de la escorrentía superficial son significativamente diferentes en tres eventos tormentas ocurridas en el Otoño del 2010 sobre dos cuencas hidrográficas con distintos niveles de urbanización, específicamente, las cuencas que drenan a las bahías de Coral Bay y Lameshur, en la isla Saint John. Analizando los cambios espacio - temporales utilizando dos modelos geoquímicos basados en la ecuación de balance de masa, Solmineq y The Geochemist's Workbench, y un modelo empírico, la ecuación universal de pérdida de suelo revisada y modificada, que calcula tasas de erosión media en función de las características del suelo, topografía, precipitación y vegetación.

I.I Antecedentes

Para la mayoría de las islas con potencial para el desarrollo turístico, la acelerada erosión de las cuencas y su respectiva sedimentación en la franja de playa y aguas someras ha sido un problema ambiental crítico en el manejo y legislación de estos ambientes. Se han reportado estudios donde se ha cuantificado y modelado esta dinámica, Bothner et al., 2006 utilizando trampas de sedimento submarinas evaluaron la cantidad, composición y fuente de sedimentos en la franja costera al sur de Molokai, Hawaii. Estos autores trabajaron con información de febrero del 2000 a mayo del 2002 y observaron que en solo dos tormentas, caracterizadas por contener fuertes lluvias, inundaciones y olas excepcionalmente altas, las trampas de sedimento acumularon hasta 1000 veces más la cantidad de arena en comparación a otros eventos de condiciones de no tormenta. Sin embargo concluyen que la sedimentación en aguas someras no tuvo un efecto potencial sobre los corales, ya que las fuertes olas y corrientes transportaron el sedimento en suspensión hacia fuera de la costa, en un lapso de tiempo relativamente corto.

El caso de las islas Caribeñas este proceso se ha convertido en un problema ambiental crítico porque la energía de las olas y corrientes costeras es de menor magnitud en comparación a costas expuestas, por la protección que le brindan las islas exteriores del este, en combinación con la cercanía a la masa continental en la parte oeste, se crean zonas de relativa calma causando que el sedimento en suspensión permanezca un mayor tiempo de residencia en las bahías que cubren los arrecifes de corales, causando un mayor efecto potencial en la salud de estos ecosistemas marinos, mismos que han sido descritos en trabajos realizados cerca de nuestra área de interés, tal es el caso de los estudios realizados en Republica Dominicana (Torres et al., 2001) Puerto Rico (Acevedo et al., 1989), así como en St. Croix (Hubbard et al, 1987) y St. Thomas (Nemmeth y Nowlis, 2001) Islas Vírgenes EUA.

Gray et al., 2008 analizaron la composición del sedimento en las inmediaciones de dos playas y bahías de Saint John, diferenciando tres principales componentes; terrígenos, carbonatados y materia orgánica. Realizaron una comparación entre Fish Bay y Lameshur, el primero regido por escurrimientos de una cuenca urbanizada y el segundo por una cuenca protegida por el parque nacional, sin desarrollo urbano considerable. Los autores encontraron que durante eventos de tormenta el flujo de sedimentos fue de 3 a 73 veces mayor en las playas controladas por una cuenca desarrollada en comparación a la zona sin desarrollo urbano.

Kolupski (2011) reportó que la cuenca Fish Bay, con un elevado nivel de desarrollo humano, produce sedimento en un orden de magnitud mayor a comparación de la cuenca Reef Bay, pese a tener dimensiones similares. Lo que sugiere que el desarrollo humano juega un papel importante en la producción de sedimento en las cuencas hidrográficas de Saint John, y por ende en la sedimentación costera.

Ramos-Scharron et al 2005 han descrito la hidrología regional en Saint John y Puerto Rico. Sin embargo, estos trabajos se han limitado al uso de modelos de elevación digital de menor resolución, por primera vez se estimara la erosión potencial al nivel de cuencas en Saint John integrando datos de elevación LIDAR apoyado con técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica. Cabe mencionar que anteriormente se han hecho estudios de erosión en Saint John con medidas de campo y modelos de vectores por medio de sistemas de información geográfica extrapolando estas mediciones a las dimensiones de los caminos no pavimentados (Ramos Scharon, 2005). Así como también han aplicado el modelo de USLE (Radke, 1997). Donde observaron que la mayor producción de sedimento en Saint John es ocasionada por grandes eventos de tormenta, como fue el caso del "Huracán Hugo" en 1989.

Referente a la composición geoquímica del basamento de las cuencas que drenan a las bahías de Lameshur y Coral Bay, Ramos-Pérez (1989) identificó 3 anomalías geoquímicas en la isla Saint John, colectaron muestras de agua de arroyos, bahías, sedimentos y organismos marinos en 5 diferentes cuencas hidrográficas, analizaron su composición encontrando patrones similares en las concentraciones de los siguientes elementos:



En las muestras correspondientes a la cuenca de Fish Bay se encontraron las concentraciones más altas, en la mayoría de los metales, en comparación con las otras bahías. Lo que seguramente se puede adjudicar a la composición del basamento rocoso sobre el cual drena esta cuenca hidrográfica.

Sin embargo para las cuencas que drenan a las bahías de Lameshur y Coral Bay, Donelly (1968) se estableció el marco de referencia geológica para esta zona, a la cual nombro como la formación "Water Island". Su petrología ha sido descrita en detalle por Donelly, en la cual reporta que las rocas keratofiras representan el 80% de esta formación, y están compuestas por grano fino, color gris claro en sus caras frescas y de marrón a café cuando son intemperizadas. Fenocristales de cuarzo mayores a algunos milímetros de tamaño son comunes, los flujos de bandas son visibles particularmente cuando el intemperismo es acentuado. En láminas delgadas, muchas keratofiras mostraron contener fenocristales de cuarzo (del 5 al 25% del volumen), algunas keratofiras porfiriticas contienen de 5 a 20% de fenocristales de albita, o bien conocida como plagioclasa sódica.

Por otra parte el 20% restante de la formación corresponde a las rocas espilitas, rocas verdes compuestas por granos finos de albita y clorita. En láminas delgadas se observo que consisten de un poco de plagioclasa con los intersticios rellenos de clorita verde, a lo que se debe su coloración Donelly (1968).

En este trabajo se pretende ligar las características hidrogeoquímicas del agua de escorrentía con un modelo de erosión para cuencas con diferentes niveles de desarrollo urbano y similar basamento rocoso, integrando los procesos de erosión, intemperismo, hidrología y sedimentación en un ambiente único a fin de identificar y delimitar las principales fuentes de sedimentos, y posibles contaminantes que recibe la franja de corales estas dos localidades de la isla Saint John Islas Virgenes EUA (USVI); específicamente en las cuencas y bahías de Lameshur y Coral Bay.

I.II Hipótesis

Las tasas de erosión en la isla Saint John USVI son controlados por el grado de urbanización en las cuencas hidrográficas.

Y los productos de alteración química del basamento también lo son?

I.III Objetivos

1. Estimación de la erosión del suelo en las cuencas que drenan a las bahías de Coral y Lameshur, St. John USVI.

Erosión media anual y la erosión causada por el Huracán Otto.

2. Evaluación de la geoquímica del agua de escorrentía:

Variabilidad en la composición química del agua entre las diferentes cuencas y ver si la concentración de cationes se ve reflejada en el modelo de erosión.

Estimación del índice de saturación mineral en cada sitio, buscando los minerales que están siendo precipitados en arcillas como también los minerales que están siendo disueltos por la interacción agua-roca.

3. Comparación espacial entre las diferentes cuencas:

Buscando diferencias en el modelo de erosión RUSLE - MUSLE y el posible efecto de los caminos no pavimentados en las tasas de erosión y cationes disueltos en las muestras de agua.

I.IV Área de estudio

I.IV.1 Localización

La isla Saint John se localiza en el extremo este del mar Caribe, entre las coordenadas $18^{\circ} 21'$ Norte y $64^{\circ} 44'$ Oeste, y pertenece al territorio Estadounidense conocido como Islas Vírgenes. Específicamente, Saint John se encuentra a una distancia aproximada de 80 km al este de Puerto Rico y es la tercera en extensión territorial de este complejo de islas, cubriendo un área total de 50 Km^2 .

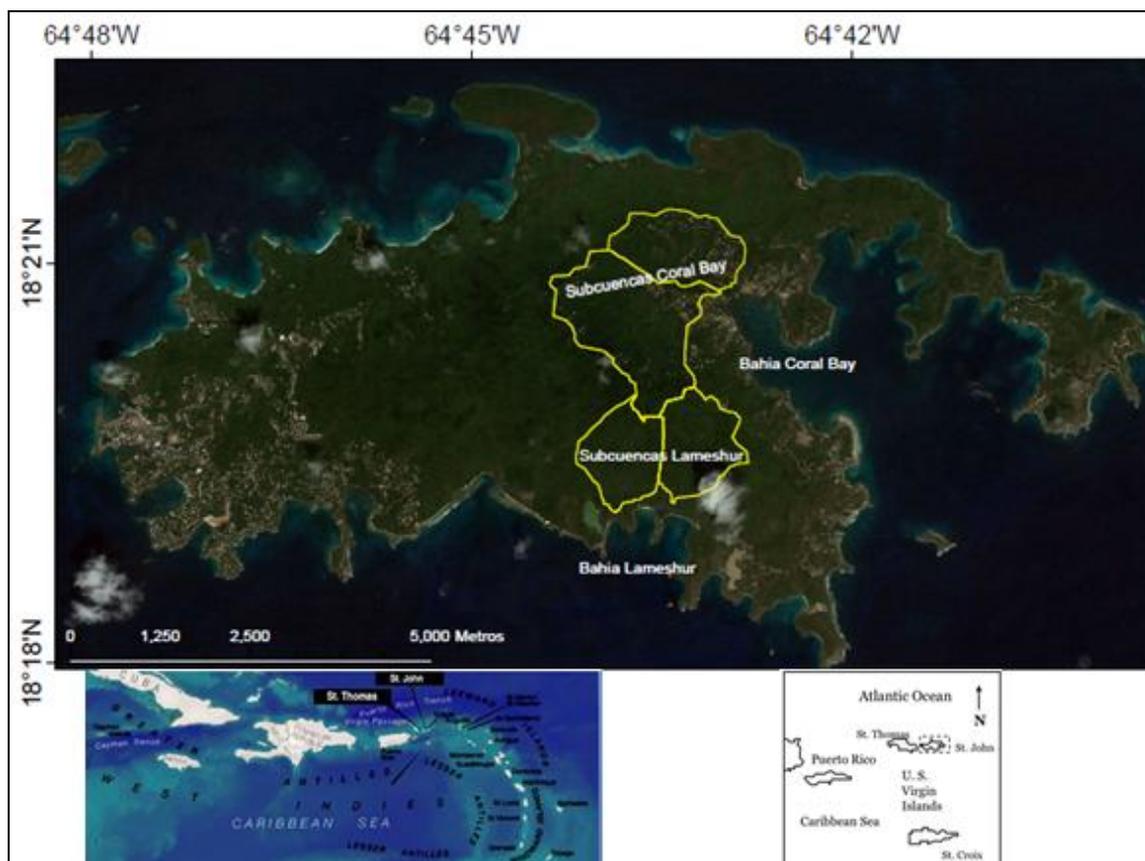


Figura 1. Localización geográfica de la isla Saint John USVI.

I.IV.2 Clima

El clima en Saint John es del tipo tropical seco, donde la evapotranspiración potencial excede la precipitación, a excepción de los meses de septiembre a noviembre. La precipitación media es de 1000 mm/año y el 85% de esta ocurre entre los meses de noviembre y abril. La mayoría de los eventos de precipitación son cortos y por lo regular generan poca escorrentía Cosner (1972). Aunque menos comunes, pero de gran importancia son las depresiones tropicales, las cuales pueden generar mayores precipitaciones, estos eventos ocurren regularmente de junio a noviembre, aunque el record ocurrió en abril de 1983 con una precipitación de 400mm en solo 18 horas.

La temperatura media anual del aire oscila entre los 24 y 28°C, así mismo, los máximos y mínimos, en promedio, de la temperatura diaria varia de 3 a 5°C en cada mes, lo cual sugiere una fluctuación de temperatura bastante baja en el transcurso de un año (Southeast Regional Climate Center, 2005).

I.IV.3 Fisiografía

Por otra parte la limitada precipitación, suelos delgados, la presencia de pastoreo en la zona, además de los vientos del este resultan en una vegetación Xerica - Cactácea de la parte este de isla principalmente, presentando un gradiente este-oeste el cual se caracteriza por convertirse en matorral verde y plantas maderables progresivamente hacia el oeste, cubriendo más de la mitad de la isla. La mayoría del bosque verde ocupa el 17% de la isla, el cual se distribuye en elevaciones mayores donde la lluvia es más abundante (Woodbury y Weaver, 1987).

Las condiciones topográficas de Saint John permiten que haya una variación de elevaciones que van desde nivel del mar hasta aproximadamente los 400msnm en la parte más alta de la isla. Ramos-Scharon (2005) menciona que el área es

topográficamente compleja con la presencia de fuertes pendientes, así mismo Anderson (1994) reporta que más del 80% de la isla presenta pendientes mayores a 30°, también se pueden observar algunos depósitos aluviales en las partes bajas y cercanas a la costa, mismas que trazan la descarga de sedimentos provenientes de las partes altas de la isla.

Las mayores cuencas hidrográficas de la isla Saint John drenan directamente al mar y su red hidrológica está conformada por arroyos intermitentes, localmente conocidos como “ghuts”, por lo que no existe un flujo superficial significativo ni corrientes perennes. En las partes bajas y planas de la isla se forman algunas lagunas de retención “salt ponds”, que brindan refugio a algunas especies de aves y peces marinos. Por otra parte, a pesar de que existen evidencias de agricultura en la isla (principios del siglo IXX), en la actualidad el principal aprovechamiento del agua es para uso doméstico, sin dejar fuera las actividades turísticas.

Coral Bay, localizada al este de la isla, es la tercera cuenca hidrográfica más amplia, cubriendo un área de 12km² y además es la que cuenta con mayor desarrollo urbano en la isla. Se caracteriza por tener pendientes pronunciadas, rocas y suelos altamente erosionables, diferentes tipos de uso de suelo los cuales se encuentran distribuidos en forma de parches a lo largo de la línea de costa. La bahía de *Coral Bay*, es utilizado como marina, albergando embarcaciones de pesca deportiva, buceo y recreación, principalmente. Por otra parte, las cuencas Little and Great Lameshur forman parte del parque nacional protegido donde existe poco o nulo desarrollo urbano, caracterizado por ser un bosque denso con pocos caminos no pavimentados en comparación al desarrollo humano y el número de caminos existentes tanto en Coral Bay como en otras localidades de la isla.

I.IV.4 Geología

En general, la litología de la isla Saint John es dominada por rocas volcánicas del cretácico (Rivera et al., 1966), las cuales han sufrido importantes procesos de deformación, intrusiones magmáticas y alteraciones hidrotermales (Donnelly, 1968; Rankin, 2002). Particularmente, en las cuencas Lameshur y Coral, las rocas en su mayoría corresponden o se clasifican en tres grandes grupos:

1. Keratofiras: rocas ígneas intrusivas y extrusivas, afaníticas (~70% de SiO_2) compuestas por plagioclasa, feldespato y cuarzo.
2. Basalto: roca ígnea extrusiva compuesta por piroxenos y olivino, alto contenido en hierro.
3. Espilita: rocas ígneas maficas compuestas por plagioclasa, feldespato y cloritas.

Rankin et al 2002 reportan rasgos fisiográficos y litológicos que se expresan en plegamientos escarpados de rocas ígneas y metamórficas, tales como basalto y keratofiras, que pertenecen a la formación "Wáter Island Formation", estas rocas son las más antiguas de la Islas Vírgenes, probablemente de edad cretácica tardía, predominantemente flujos submarinos y "brechas" con algunas "camas piroclásticas". Esta formación fue nombrada así por Donnelly (1968) por la excelente exposición de esta en la isla conocida con el mismo nombre "Water Island" cercana al muelle "Charlotte Amalie" en Saint Thomas. La formación también es bien expuesta al sur de Saint Thomas, Saint John, entre otras islas del complejo.

Particularmente en las cuencas a estudiar en este trabajo, esta formación se encuentra muy bien expuesta tal como se muestra en la figura 2.

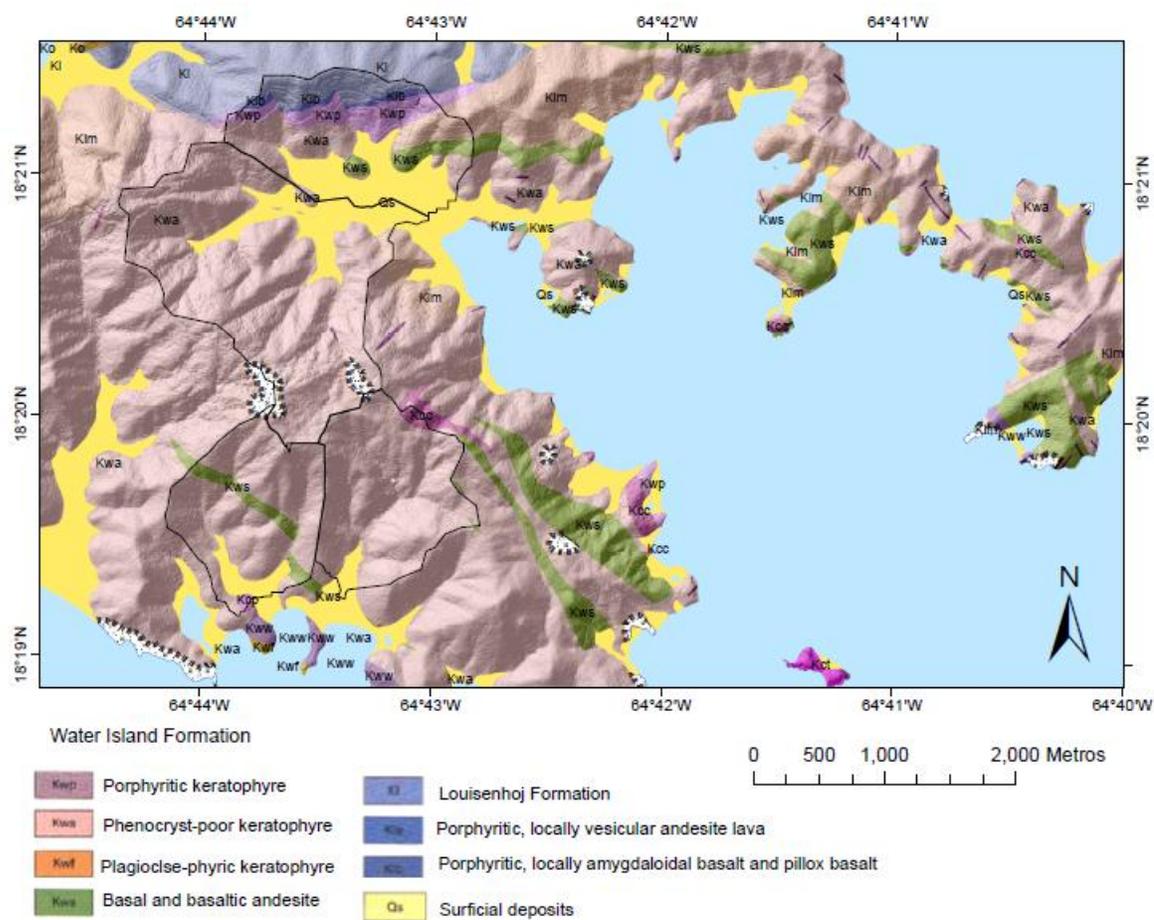


Figura 2. Geología de las cuencas Coral Bay y Lameshur, Saint John USVI. Tomado de Rankin (2002)

II Materiales y métodos

II.I Muestras de agua y sedimentos

Se colectaron muestras de agua y sedimentos en sitios representativos de las cuencas hidrográficas a estudiar con el objetivo de caracterizar los cambios hidrogeoquímicos producidos por la escorrentía desde la parte más alta de las cuencas hasta la línea de costa en las dos bahías, Lameshur y Coral Bay. Estas muestras fueron procesadas siguiendo métodos estándares en el laboratorio de VIERS (por sus siglas en Inglés Virgin Island Environment Resource Station), y enviados a USD/CICESE para posteriores análisis químicos y geológicos.

II.II Análisis Hidrogeoquímico

Con el objetivo de caracterizar la calidad del escurrimiento, se analizaron las muestras de agua tomadas en campo en el laboratorio de hidrogeoquímica de Ciencias de la Tierra en CICESE, a las cuales se les realizó un análisis de constituyentes disueltos (cationes mayores), mediante el uso de un equipo analítico modelo “Varian Liberty 100 ICP-OES”. El cual opera mediante espectrometría de emisión atómica por plasma de acoplamiento inductivo. Fundamentalmente, la alta temperatura del plasma (7000^0K) ioniza completamente la muestra, reduciendo el efecto de interferencias químicas debidas a los enlaces moleculares que no se destruyen por otra fuente de calor. El plasma excita a los iones hasta emitir radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda características. La longitud e intensidad de estas, permite al ICP identificar la concentración de cada elemento (Ruhm et al 1998).

Los cationes mayores que se analizaron para la caracterización de la interacción agua-roca en la escorrentía serán Sodio (Na), Calcio (Ca), Sílice (Si), Magnesio (Mg), y Potasio (K).

Por medio de la técnica de cromatografía de iones se analizaron las muestras de agua con un cromatografo marca “Dionex ICS-2000”, el cual es capaz de cuantificar parámetros inorgánicos, empleando como fase móvil una solución de hidróxido de sodio 4 mM y realizando mediciones de 11 minutos, para la integración del área bajo la curva que corresponde a la concentración de cada parámetro. Para este trabajo solo se midió la concentración de cloruros para aplicar la corrección de sales recicladas a las muestras de agua.

II.III Corrección por sales recicladas

La corrección por sales recicladas consiste en eliminar la concentración de Magnesio, Calcio, Sodio, y Potasio, presentes en el agua de lluvia. Esta corrección se fundamenta en que la única fuente de cloruros es marina y existe una razón constante entre las concentraciones de estos elementos y la concentración de cloruros en el agua de mar.

En la tabla I se presenta la razón constante entre la concentración de cloruros y la concentración de cada elemento:

Tabla I. Porcentaje de elementos mayores en el agua de mar y su razón con el cloro.

	Cl	Ca	Mg	Na	K
Concentración(g/l)	19.35	0.412	1.294	10.760	0.399
Razón	1	0.021	0.067	0.556	0.021

Por lo tanto se puede sustraer el aporte atmosférico cuantificando así la concentración de estos elementos producto de la interacción agua-roca en las cuencas. Esta normalización por cloruros se lleva a cabo calculando las razones entre la concentración de cada elemento con la concentración de cloruros en las muestras, se sustrae la razón correspondiente al agua marina, y se multiplica por

la concentración de cloruros; eliminando de esta manera las sales recicladas según la metodología de Stallard (1995).

II.IV Índices de saturación mineral

Los resultados de los análisis químicos de la composición disuelta del agua de escorrentía sirvieron de insumo en dos modelos` geoquímicos basados en la ecuación de balance de masa para calcular los índices de saturación mineral y conocer que especies de minerales son los más probables de ser precipitados o en dado caso estén en disolución, aguas arriba de donde fueron tomadas las muestras. Este análisis fue llevado a cabo por medio de los softwares “The Geochemist’s Workbench” (GWB) y SOLMINEQ, globalmente utilizados para el cálculo de reacciones químicas, balances e índices de saturación en cuerpos de agua naturales. El índice de saturación mineral (IS) indica si un agua tenderá a disolver o a precipitar un mineral determinado, se calcula mediante el logaritmo de la razón o proporción entre las actividades químicas de los iones disueltos del mineral, es decir, su producto de actividad iónica (PAI) y su producto de solubilidad (Kps); en forma de ecuación:

$$IS = \log (PAI/Kps) \quad (1)$$

Si el valor del IS resulta negativo nos indica que el mineral está siendo disuelto, mientras que si su valor resulta positivo sugiere que este mineral está siendo precipitado como mineral arcilloso. Un valor de cero significa que el mineral esta en equilibrio con el agua.

II.V Análisis sedimentológico

El procesamiento de las muestras de sedimento consistió en principio por eliminar la materia orgánica mediante el método de pérdida por ignición. Se coloco la

muestra de sedimento en un crisol de porcelana y se introdujo en una mufla a una temperatura de 600° por dos horas. Libres de materia orgánica, las muestras fueron tamizadas por 10 minutos en un juego de tamices (U.S. Standard) para obtener las diferentes fracciones de tamaño de grano. Las fracciones entre $0.4\mu\text{m}$ y 2mm fueron reprocesadas con un Sorteador Laser de Partículas modelo "Beckman-Coulter LS200". Estas diferentes fracciones de las muestras de sedimento (arenas, limos y arcillas) son utilizadas para calcular el factor (K) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, la fracción arcillosa fue analizada con difracción de rayos X para identificar los minerales presentes en el suelo.

II.VI Difracción de rayos X

Se analizó una muestra de sedimentos representativa de cada cuenca como apoyo al análisis del intemperismo químico. La fracción arcillosa ($<4\mu\text{m}$) fue separada utilizando el método de pipeta (Rendon-Marquez, 1995) y fue analizada en tres frotis; normal, con tratamiento de glicol y posteriormente calcinada a 550°C durante 30 minutos. Se utilizó un difractómetro marca Phillips modelo X'Pert y las muestras se corrieron de 0 a 40° de 2θ , con un monocromador de cobre a un intervalo de 0.03 grados.

La difracción de rayos X permite la identificación de los minerales arcillosos de acuerdo a la difracción característica de cada mineral. En un difractograma se grafica el ángulo de incidencia del rayo contra la intensidad de difracción, la posición y número de los picos reflejan la estructura cristalina, la intensidad de estos picos reflejarán su composición. Los minerales presentan una huella digital en base a su composición y a su estructura cristalina, sin embargo algunos minerales presentan las mismas difracciones características, por lo que la muestra se tienen que someter a un tratamiento de glicol y calcinado para cambiar la estructura cristalina de algunos minerales y poder registrar ausencia-presencia en un segundo y tercer análisis de difracción de rayos X en la misma muestra.

La interpretación de los difractogramas se basó en las tablas de Bayliss et al. 1986 y la base de datos del centro internacional de datos de difracción ICDD (por sus siglas en inglés) utilizando la paquetería del software “Xpert High Score Plus”. Estos archivos son aceptados universalmente como referencia estándar para los análisis de difracción de rayos X (Aparicio, 1999).

II.VII Microscopio electrónico de barrido

Se analizaron 10 muestras de suelo de las cuencas Coral Bay y 10 muestras de Lameshur con el microscopio electrónico de barrido, el cual es capaz de fotografiar los granos finos en alta resolución y graficar la intensidad relativa de los elementos químicos presentes en el suelo. Esto de gran utilidad para comparar los elementos que están siendo disueltos en las muestras de agua y los elementos químicos presentes en los minerales arcillosos en cada cuenca.

II.VIII Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo estima la erosión del suelo como un producto de seis factores, los cuales representan la fuerza erosiva por la lluvia (R), la erodibilidad del suelo (K), la longitud de la pendiente (L), la inclinación de la pendiente (S), la cobertura y las prácticas de manejo (C), y las prácticas de conservación (P).

La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (2)$$

Donde (A) es la pérdida del suelo promedio por unidad de área. Solo dos factores de la ecuación tienen unidades, y son la fuerza erosiva por la lluvia (R) y la erodibilidad del suelo (K), por lo que la pérdida de suelo promedio será expresada

en las unidades seleccionadas para (K) y el tiempo seleccionado para (R). Los otros cuatro factores no tienen unidades, son utilizados para escalar las mediciones experimentales del modelo a las dimensiones reales del terreno al cual se aplicara el modelo.

El factor (K) es relacionado a la textura del suelo y representa el potencial de erosión de un suelo en particular. Por lo general, los suelos arenosos se caracterizan por presentar valores bajos del factor (K) en comparación con suelos que presentan partículas mas finas, como limos y arcillas. Este factor se puede estimar en función de la relación empírica con la textura del suelo, utilizando datos de perfiles de suelo, ya que están publicados los valores del factor K de los 255 tipos de suelos existentes de acuerdo a la clase textural (Renard et al. 1996). Por cuestiones prácticas, para el análisis realizado en este trabajo se utilizaron los valores del factor (K) publicados por la Administración Nacional de los Océanos y Atmosfera de los Estados Unidos, NOAA (por sus siglas en ingles), en su sitio oficial de Internet para la isla de Saint John Virgin Island.

Los factores (L) y (S) comúnmente son expresados como un producto (LS) debido a que ambos factores son derivados de la topografía del terreno y calculados a partir del modelo de elevación digital. Se calcula a través de los factores de longitud de pendiente (L), y de la inclinación (S) de la ladera. En conjunto estos factores reflejan el efecto en la erosión potencial al aumentar tanto la longitud como el gradiente de inclinación de la ladera. El factor de longitud de la ladera se define como la distancia horizontal desde el origen del flujo de escorrentía hasta el punto donde la inclinación de la ladera disminuye lo suficiente para que se inicie la sedimentación de las partículas erosionadas aguas arriba o hasta que la escorrentía se concentra definiendo un curso del agua.

Para este trabajo se utilizo una ecuación propuesta por Kinell (2005) y modificada por Smith et al 2007.

La cual expresa el cálculo del factor LS de la siguiente manera:

$$LS = \left[\frac{\text{Acumulación de flujo} * \text{Tamaño de celda}}{22.13} \right]^{0.4} \left[\frac{\text{sen (pendiente)}}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (3)$$

Donde:

Acumulación de flujo: Número de celdas que contribuyen al flujo en una celda.

Tamaño de celda: Tamaño de las celdas en el modelo de elevación digital.

Pendiente: Pendiente expresada en porcentaje para cada celda.

El factor (C) determina la protección de las diferentes técnicas de labranza y/o cubiertas vegetales naturales sobre la pérdida de suelo. Los valores del factor C oscilan entre 0 y 1, el primer caso corresponde cuando la protección contra erosión es total y cuando la reducción de la erosión es nula en el segundo caso (Renard et al. 1996). El factor (P) son las prácticas de manejo para disminuir el impacto erosivo de las precipitaciones y la escorrentía (Renard et al. 1996). Solo que en Saint John son pocas o nulas las prácticas de este tipo, por lo que se asumirá un valor constante de 1.0.

II.IX Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (MUSLE)

La erosión del suelo es un proceso hidrológicamente impulsado y de este depende la cantidad de sedimento aportado por el escurrimiento (Kinnell, 2005). Al incluir la escorrentía como un factor independiente en el modelo de erosión, MUSLE tiene una mayor precisión de la predicción de la erosión del suelo sobre USLE y RUSLE (Williams, 1975; Williams y Berndt, 1972; Erskine et al. 2002; Neitsch, et al. 2005; Sadeghi et al. 2004). La ecuación universal de pérdida de suelo modificada MUSLE, por sus siglas en ingles, se compone de la siguiente multiplicación de factores:

$$A = 11.8 (Q q_p)^{0.56} * K * (LS) * C * P \quad (4)$$

Donde:

A= es la producción de sedimentos en toneladas métricas por evento.

Q= volumen de escorrentía de una lluvia dada en m³.

q_p= es el caudal máximo en m³/s.

II.IX.1 Esguerrimiento superficial

La escorrentía superficial se produce siempre que la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración. Se utilizó el método de curvas numeradas para la estimación de la escorrentía superficial (USDA-SCS, 1972) utilizando datos de precipitación para simular el volumen de escorrentía superficial y la tasa de pico de escorrentía en cada cuenca. La ecuación para el método de curvas numeradas es:

$$Q = (P - I_a)^2 ((P - I_a) + S)^{-1} \quad (5)$$

Donde:

Q= esguerrimiento (mm)

P= precipitación (mm)

I_a= Abstracción inicial (mm)

S= parámetro de retención (mm)

La abstracción inicial es la precipitación necesaria para que ocurra la escorrentía, usualmente se calcula en función del parámetro de retención S. Sin embargo esta relación no es apropiada para la isla Saint John donde las fracturas representan una importante infiltración inicial. Ramos Scharron (2004) estimó que es necesaria una precipitación de 25 mm para que ocurra la escorrentía.

El parámetro de retención es el potencial máximo de retención de humedad del suelo antes de iniciar la escorrentía, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = (1000/CN) - 10 \quad (6)$$

Donde:

CN = Curva numerada

El valor de curva numerada está en función de la permeabilidad del suelo, el uso de suelo y las condiciones de agua en el mismo. El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos basados en las características de infiltración de cada uno de estos. La NRCS Soil Survey Staff define un grupo hidrológico como un grupo de suelos con potencial de escurrimiento similares bajo una tormenta de condiciones similares. Las propiedades del suelo que influyen en la escorrentía potencial son las que no tienen repercusiones en la tasa mínima de infiltración para un suelo desnudo después de un humedecimiento prolongado o cuando se congela. Estas propiedades son la profundidad de la capa freática, la conductividad hidráulica y la profundidad de la capa permeable. Los suelos pueden caracterizarse por sus propiedades de escorrentía e infiltración. Son propiedades inversamente proporcionales, a mayor capacidad de escurrimiento, menor infiltración y viceversa, a mayor infiltración, menor escurrimiento. Ordenados de menor a mayor potencial de escurrimiento y de mayor a menor infiltración, los suelos pueden ser clasificados en uno de los cuatro grupos A, B, C y D.

Grupo A: los suelos tienen bajo potencial de escurrimiento y alta infiltración aún cuando están saturados. Consisten principalmente de suelos profundos, de bien drenados a excesivamente drenados, arenas y gravas principalmente y tienen alto rango de transmisión de agua (>0.0021 mm/s).

Grupo B: los suelos tienen valores de infiltración moderados cuando se encuentran completamente húmedos y consisten principalmente de suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen un índice moderado de transmisión de agua (0.0011-0.0021 mm/s).

Grupo C: los suelos tienen baja infiltración cuando están completamente húmedos. Son suelos con una capa poco permeable que impide el movimiento vertical del agua y suelos de texturas moderadamente fina a fina. Esos suelos tienen un rango bajo de transmisión del agua (0-0.0003 -0.0011mm/s).

Grupo D: Los suelos tienen un alto potencial de escurrimiento. Tienen un bajo rango de infiltración cuando está completamente húmedo. Consisten en suelos arcillosos con un alto potencial de abultamiento, y un alto nivel freático permanente, con una capa de arcilla sobre o cerca de la superficie, y son suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen un valor muy bajo de transmisión (0-0.0003 mm/s).

De acuerdo a la USDA, la infiltración inicial es calculada como una fracción del parámetro S, sin embargo, esta relación es inapropiada para Saint John, donde las fracturas de rocas resultan ser las mayores fuentes de infiltración inicial. Ramos-Scharron 2004, estimo que es necesaria una precipitación de entre 25 y 30 mm para que la escorrentía empiece a fluir.

II.IX.2 La descarga pico “ q_p ”

La descarga pico está en función tanto de las características de la cuenca como de la tormenta y se define como la máxima tasa de flujo de escorrentía. El Servicio Nacional de Conservación de Recursos de EUA., NRCS (por sus siglas en ingles) publico la siguiente ecuación para calcular la descarga pico (Snider, 1972):

$$q_p = (484 * A * Q) * ((AD/2) + (0.6 * T_c))^{-1} \quad (7)$$

Donde:

Q= profundidad de la esorrentía en mm,

A= área de la cuenca en Km².

AD= incremento de tiempo en los datos de precipitación (3min),

T_c= tiempo de concentración (min)

El tiempo de concentración (T_c) es el tiempo que le toma a una parcela de fluido para viajar desde el punto más lejano, por lo regular del más elevado, hasta la salida de la cuenca, en este caso las bahías de Lameshur y Coral Bay. El T_c se calculo según la metodología de Kirpich (1940).

Para la alimentación de los datos del modelo, se partió de la información generada, tal como la delimitación de las cuencas, subcuencas y corrientes de agua calculadas anteriormente para RUSLE, utilizando la paquetería de Arcmap 10, especialmente la herramienta "Hydrology" de "Spatial Analysis". Se calcularon los factores requeridos por MUSLE para la estimación de los parámetros métricos y estadísticos del factor de escurrimiento que desplaza al de la precipitación (R) de RUSLE siguiendo la metodología de Williams, 1975. Se utilizaron los valores de los factores K, LS, C y P calculados anteriormente para RUSLE.

La información utilizada para la estimación de las tasas de erosión fue estandarizada al sistema de referencia espacial UTM Zona 20 Norte y DATUM WGS84, a los archivos raster se les asigno una resolución espacial de 5 metros. Las herramientas del software ArcGIS 10 utilizadas para el procesamiento de los datos fueron principalmente "*Spatial Analyst*", así como las que corresponden a la función de "Hydrology" y Raster Calculator, con las cuales se realizó el cálculo de la dirección del flujo, la acumulación, y los cálculos necesarios para resolver la ecuación universal de pérdida de suelo.

II.X Caracterización de las cuencas

Se calculó un modelo de elevación digital con una resolución horizontal de 5 metros y 15 centímetros en la vertical para la isla Saint John, basado en datos LIDAR disponibles al público por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2011). El levantamiento topo - batimétrico LIDAR se realizó en abril del 2003 con una densidad de puntos de 25 puntos por celda. La nube de puntos LIDAR fue analizada y procesada con los programas de cómputo lastools (2011) para obtener la nube de puntos del suelo desnudo, eliminando la vegetación, y calcular el modelo de elevación digital del suelo desnudo. Se delimitaron las cuencas hidrográficas y las principales corrientes de agua que drenan a las bahías de Lameshur y Coral Bay. Para la modelación de las cuencas se utilizó la herramienta "Spatial Analyst" de la paquetería de ArcGIS 10, ESRI.

En Lameshur se delimitaron dos sub-cuencas, Great y Little Lameshur; mientras que en Coral Bay también se delimitaron dos sub-cuencas (norte y sur) que desembocan a la bahía en un mismo punto, por lo que se decidió considerarlas como una sola cuenca (Coral Bay) para la modelación RUSLE-MUSLE (figura 2) .

Para determinar diferencias significativas en los cationes disueltos en las muestras de agua de tormenta, se realizó un análisis estadístico (prueba t) buscando diferencias significativas en la variabilidad espacio-temporal de las cuencas estudiadas. Para cada sitio se comparó la variación temporal de los elementos disueltos en el agua de escorrentía en dos tormentas, buscando posibles correlaciones entre variables que expliquen la variabilidad dentro de cada cuenca, así como entre las cuencas que drenan a las dos bahías; la concentración de los elementos disueltos fue corregida por sales recicladas.

Los análisis estadísticos mencionados anteriormente se realizaron con el programa de cómputo Statistica 7, con un valor de significancia $p=0.05$.

III. RESULTADOS

III.I Elementos mayores (cationes)

Se analizaron un total de 33 muestras de agua en el laboratorio de Hidrogeoquímica de CICESE, las cuales corresponden al huracán Otto, ocurrido durante el 5-8 de octubre del 2010, y a otras dos tormentas ocurridas durante el otoño del 2010 (julio y septiembre), en la siguiente figura se presenta la localización geográfica de las estaciones de monitoreo donde fueron colectadas las muestras de agua de escorrentía:

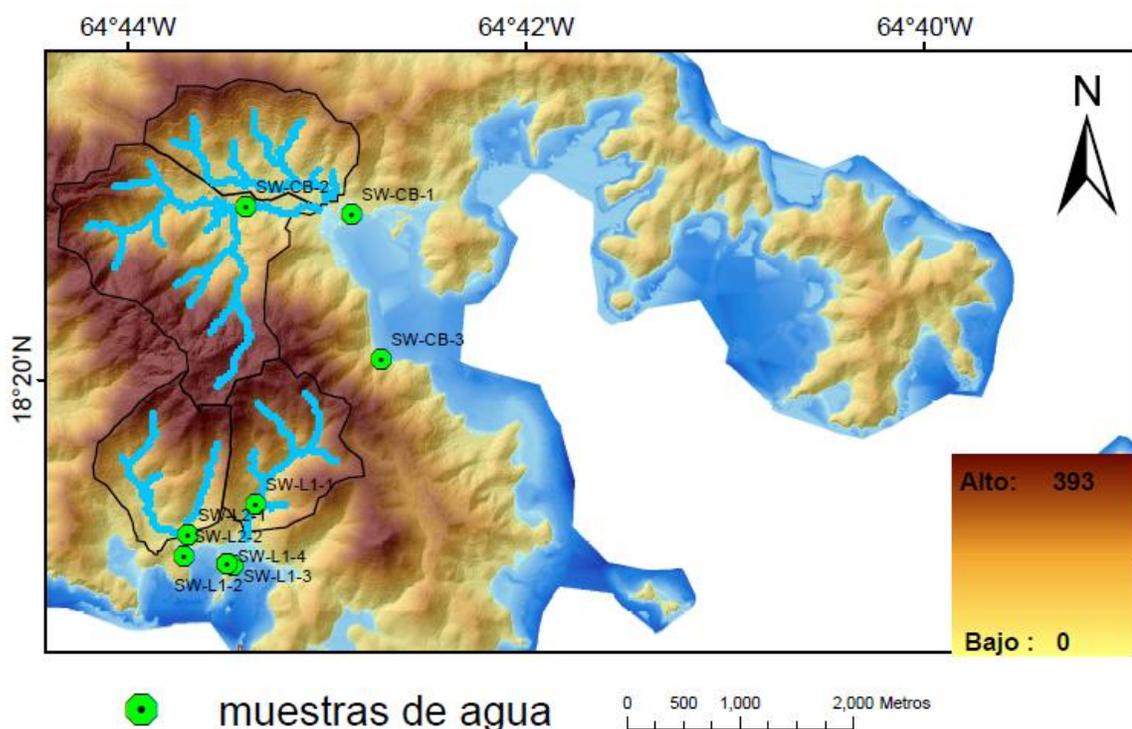


Figura 3. Localización de las estaciones de muestreo de agua de escorrentía.

A los resultados obtenidos del análisis químico se les aplicó un modelo estadístico para buscar diferencias significativas espacio-temporales en la composición disuelta de las muestras de agua de cada tormenta en cada sitio para conocer la variabilidad entre las cuencas, así como entre cada una de ellas.

Variación temporal

Se analizaron muestras de agua colectadas en dos diferentes eventos de tormenta; el 20 de julio y el 6-7 de Octubre del 2010 en sitios representativos de las sub-cuencas Lameshur. A las cuales se les realizó un análisis estadístico (prueba t) para buscar diferencias significativas en la concentración de elementos disueltos entre los dos eventos de tormenta (9 muestras de cada tormenta), se probaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad en los datos.

En la tabla II se presenta el resultado del análisis estadístico (valores de “p”), de estos dos eventos:

Tabla II. Valores de “p” de la comparación temporal en Lameshur.

Muestras Dependientes	
t-test	p-values
Ca	0.001
Mg	0.001
Na	0.113
K	0.038
Si	0.185

De acuerdo con el análisis estadístico (prueba t), se encontraron diferencias significativas en la concentración de Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K). Mientras que el sodio y el silicio no mostraron diferencias significativas entre estos dos eventos de tormenta en las cuencas de Lameshur.

Las tablas III y IV, y figuras 4 y 5 muestran la variabilidad en la concentración de elementos disueltos durante los eventos de tormenta de julio y octubre del 2010 en las sub-cuencas Great (L1) y Little Lameshur (L2).

Tabla III. Concentración de elementos mayores en las muestras de agua de tormenta de las cuencas Great y Little Lameshur, durante el 20 de julio de 2010 (en ppm).

	Muestra	Fecha	Ca	Mg	Na	K	Si
L	SW-L2-2	20-Julio-10	5.38	3.10	19.28	3.45	7.12
A	SW-L2-2	20-Julio-10	6.07	2.57	21.04	3.56	6.73
M	SW-L2-2	20-Julio-10	5.87	2.52	20.16	3.35	7.01
E	SW-L1-2	20-Julio-10	3.15	1.23	23.71	4.16	6.82
S	SW-L2-2	20-Julio-10	7.05	2.91	16.64	4.59	5.77
H	SW-L1-2	20-Julio-10	2.77	1.80	18.84	2.15	7.59
U	SW- L1-2	20-Julio-10	3.07	1.16	24.94	3.14	6.65
R	SW- L1-2	20-Julio-10	5.84	2.02	15.40	3.00	6.80
	SW-L2-2	20-Julio-10	5.52	2.12	18.29	3.73	7.21
	PROM		4.97	2.16	19.81	3.46	6.86
	MAX		7.05	3.10	24.94	4.59	7.59
	MIN		2.77	1.16	15.40	2.15	5.77
	RANGO		4.27	1.94	9.54	2.44	1.82

Tabla IV. Concentración de cationes en las muestras de agua de tormenta de las cuencas Great y Little Lameshur, durante el 6-7 de Octubre del 2010 (en ppm).

	Muestra	Fecha	Ca	Mg	Na	K	Si
L	SW L1-2	6-October-10	2.92	4.67	30.97	2.84	10.52
A	SW L1-1	6-October-10	3.50	5.04	19.70	2.45	8.744
M	SW L2-1	6-October-10	3.864	4.187	16.754	3.094	7.881
E	SW L1-1	6-October-10	2.44	3.44	31.05	1.77	8.577
S	SW L2-1	7-October-10	4.42	5.85	36.95	3.46	6.603
H	SW L1-1	7-October-10	1.14	1.57	16.32	0.77	6.211
U	SW L2-1	7-October-10	3.48	3.78	16.05	3.00	5.133
R	SW L2-2	7-October-10	5.21	6.98	37.35	4.50	5.791
	SW L2-1	7-October-10	3.88	4.62	16.49	2.74	7.059
	PROM		3.43	4.46	24.63	2.74	7.39
	MAX		5.21	6.98	37.35	4.50	10.52
	MIN		1.14	1.57	16.05	0.77	5.13
	RANGO		4.07	5.40	21.30	3.73	5.39

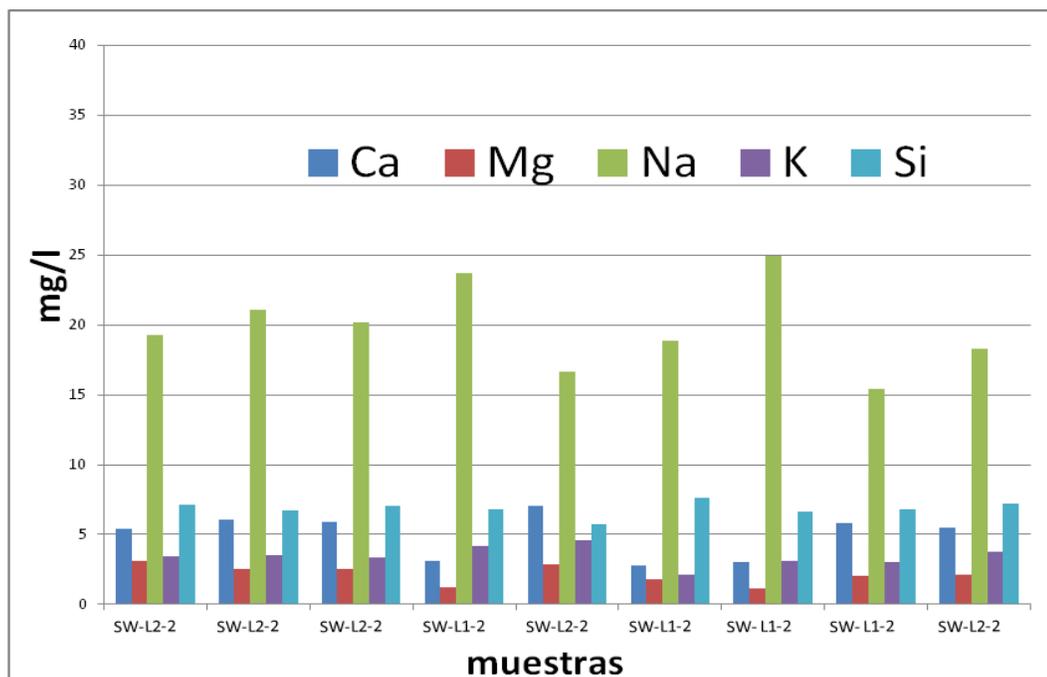


Figura 4. Concentración de elementos disueltos en julio de Lameshur.

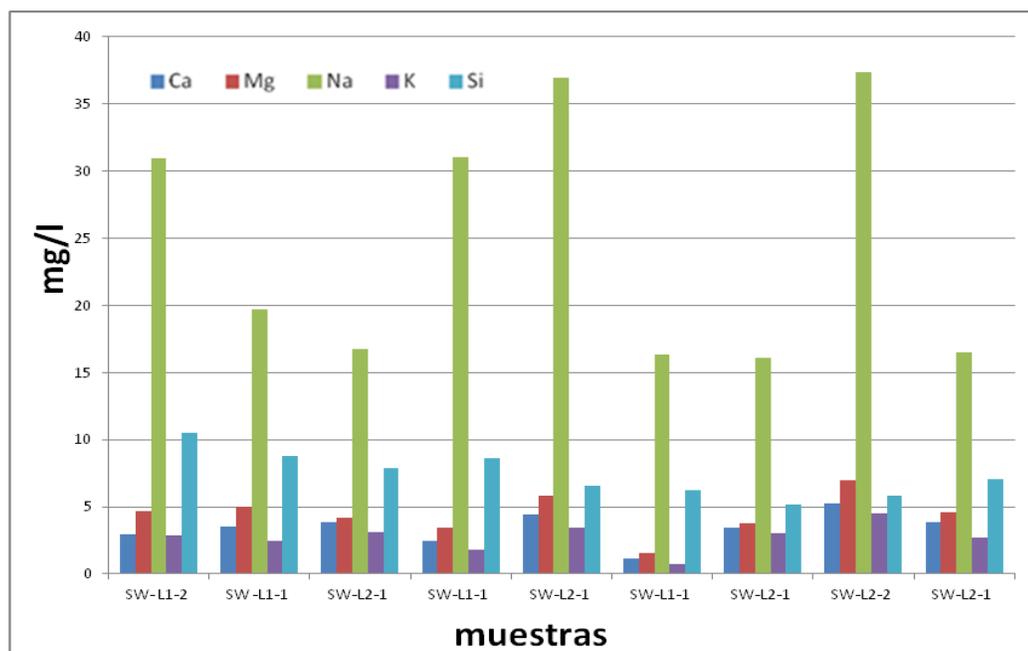


Figura 5. Concentración de elementos disueltos en octubre de Lameshur.

Para la tormenta ocurrida el 20 de julio 2010 (tabla III y figura 4), se observa que el sodio es, en promedio, el elemento de mayor concentración de todos los elementos disueltos en todas las muestras con un valor de 19.81, un máximo de 24.94 y un mínimo de 15.40 mg/l. El silicio fue el siguiente en concentración promedio, con un valor de 6.86, un máximo de 7.59 y un mínimo de 5.77 mg/l. Las siguientes concentraciones en orden descendente fueron el calcio, potasio y magnesio.

En la tabla IV y figura 4 se presentan los resultados del análisis químico de las muestras de agua colectadas durante el huracán Otto (6-7 de Octubre del 2010). De manera similar al evento de julio, esta tormenta resultó que el sodio es el elemento de mayor concentración en todas las muestras con un valor promedio de 24.63, un máximo de 37.35 y un mínimo de 16.05 mg/l. El silicio fue el siguiente en concentración promedio, con un valor de 67.39, un máximo de 10.52 y un mínimo de 5.13 mg/l. Las siguientes concentraciones en orden descendente fueron el magnesio, calcio, y potasio.

La concentración de los cationes en los dos eventos de tormenta presentó un comportamiento similar, a excepción del calcio y el magnesio que presentaron diferencias significativas.

El sílice no presentó diferencias significativas y en los dos eventos de tormenta resultó que el sodio es, en promedio, el elemento de mayor concentración en todas las muestras de agua.

CORAL BAY

Respecto a la cuenca de Coral Bay se colectaron muestras de agua de escorrentía en dos diferentes eventos de tormenta ocurridos durante septiembre y octubre del 2010. Se probaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad en los datos para hacer la prueba t (student).

En la tabla V se presenta el resultado del análisis estadístico, la prueba t (student), buscando diferencias significativas en la concentración de los elementos disueltos en estos dos eventos de tormenta.

Tabla V. Valores de “p” de la comparación temporal en Coral Bay.

Muestras Dependientes	
t-test	p-values
Ca	0.097
Mg	0.113
Na	0.141
K	0.169
Si	0.201

De acuerdo con el análisis anterior (prueba t), no se encontraron diferencias significativas en la concentración de ninguno de los elementos disueltos en las muestras de agua de escorrentía entre ambas tormentas, todos los elementos químicos se comportaron de manera similar en la cuenca de Coral Bay.

Las tablas VI y VII, y figuras 6 y 7 muestran la variabilidad de la concentración de los elementos disueltos en las muestras de agua de escorrentía colectadas durante septiembre y octubre del 2010.

Tabla VI. Concentración de cationes en las muestras de agua de tormenta de la cuenca Coral Bay, durante el 12 y 19 de Septiembre del 2010 (en ppm).

	Muestra	Fecha	Ca	Mg	Na	K	Si
C	SW-CB-1	12- Septiembre-10	13.21	11.74	56.80	14.35	1.56
O	SW-CB-5	12- Septiembre-10	14.31	13.95	67.89	9.00	5.97
R	SW-CB-3	12- Septiembre-10	3.23	3.15	23.14	2.67	8.52
A	SW-CB-5	12- Septiembre-10	14.49	14.31	66.84	8.73	5.63
L	SW-CB-7	19- Septiembre-10	11.14	6.22	20.32	5.85	5.57
B	SW-CB-3	19- Septiembre-10	3.29	5.58	34.18	4.62	9.58
A	SW-CB-3	19- Septiembre-10	4.07	4.27	29.25	4.75	8.80
Y	SW-CB-7	19- Septiembre-10	10.16	5.81	31.49	7.09	3.18
PROM			9.24	8.13	41.24	7.13	6.10
MAX			14.49	14.31	67.89	14.35	9.58
MIN			3.23	3.15	20.32	2.67	1.56
RANGO			11.25	11.16	47.57	11.68	8.02

Tabla VII. Concentración de cationes en las muestras de agua de tormenta de la cuenca Coral Bay, durante el 5-7 de Octubre del 2010, huracán Otto:

	Muestra	Fecha	Ca	Mg	Na	K	Si
C	SW-CB-1	5-Octubre-10	7.48	4.68	18.66	5.17	6.15
O	SW-CB-3	5-Octubre-10	3.17	4.58	27.76	2.98	8.38
R	SW-CB-3	5-Octubre-10	3.77	4.79	35.87	3.56	10.32
A	SW-CB-3	5-Octubre-10	3.41	3.56	25.79	2.64	8.94
L	SW-CB-1	5-Octubre-10	13.68	12.26	60.24	13.81	1.14
	SW-CB-5	6-Octubre-10	8.30	4.55	15.45	4.58	6.42
	SW-CB-2	7-Octubre-10	5.20	4.43	21.02	3.78	7.13
PROM			6.43	5.55	29.26	5.22	6.93
MAX			13.68	12.26	60.24	13.81	10.32
MIN			3.17	3.56	15.45	2.64	1.14
RANGO			10.51	8.70	44.79	11.16	9.18

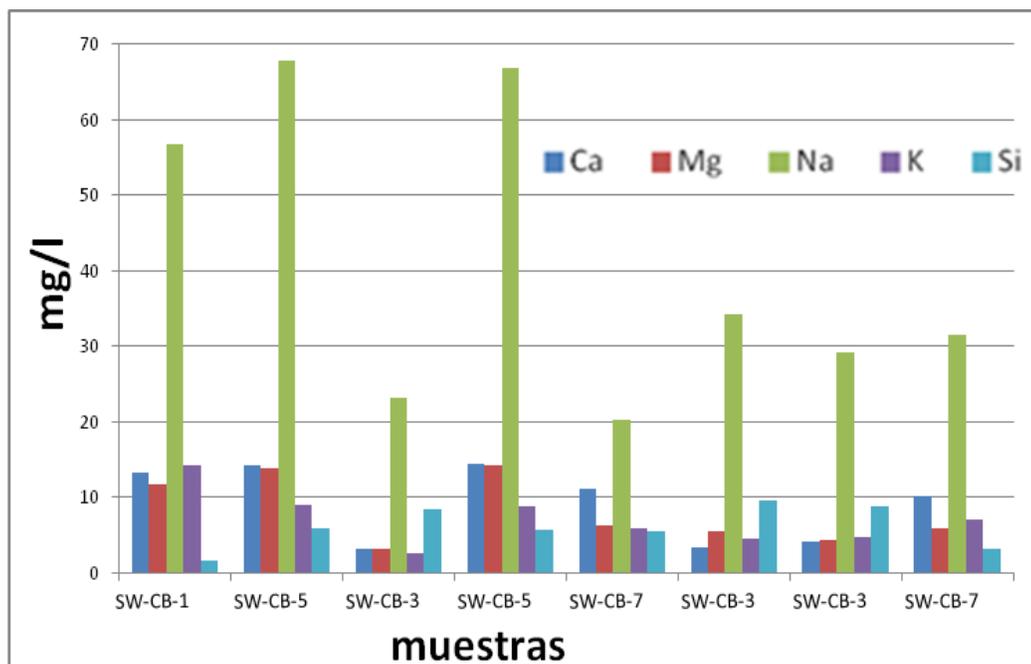


Figura 6. Concentración de elementos disueltos en septiembre de Coral Bay

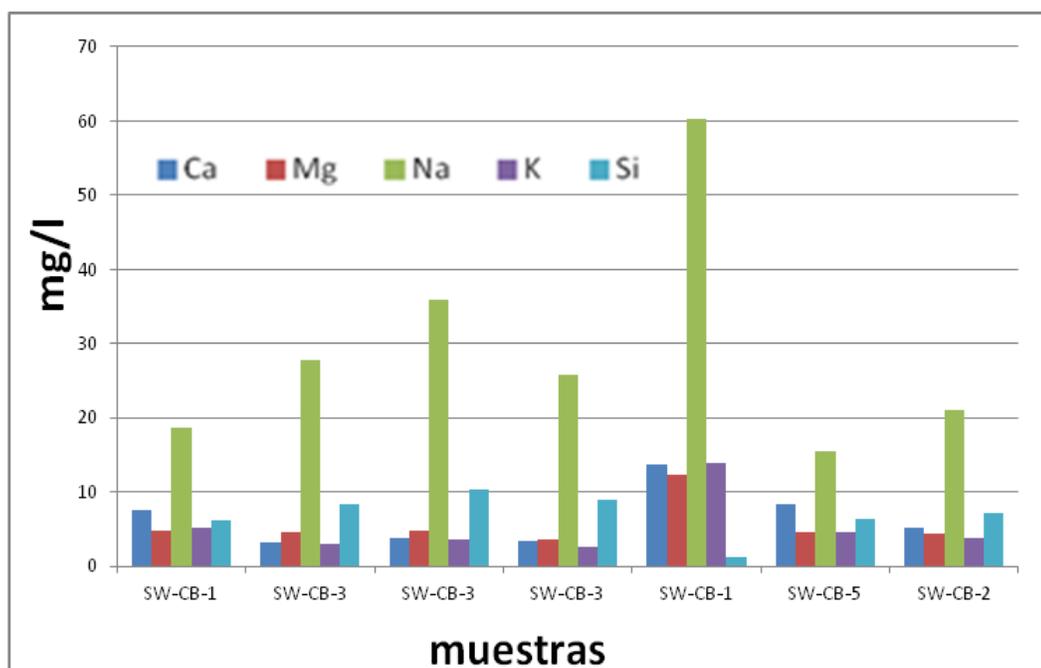


Figura 7. Concentración de elementos disueltos en octubre de Coral Bay.

Para la tormenta ocurrida en septiembre del 2010 (tabla VI y figura 6), se observa que el sodio es el elemento de mayor concentración de todos los elementos disueltos en todas las muestras de agua con un valor promedio de 29.26, un máximo de 60.24 y un mínimo de 15.45 mg/l. El silicio fue el siguiente en concentración promedio, con un valor promedio de 6.93, un máximo de 10.32 y un mínimo de 1.44 mg/l. Las siguientes concentraciones promedio en orden descendente fueron el calcio, magnesio y potasio.

En la tabla VII y figura 7 se presentan los resultados del análisis químico de las muestras de agua colectadas durante el huracán Otto (6-7 de Octubre del 2010). De manera similar a la tormenta de septiembre, resulto que el sodio es el elemento de mayor concentración en todas las muestras con un valor promedio de 29.26, un máximo de 60.24 y un mínimo de 15.45 mg/l. El silicio fue el siguiente en concentración promedio, con un valor de 6.93, un máximo de 10.32 y un mínimo de 1.14 mg/l. Las siguientes concentraciones en orden descendente fueron el calcio, magnesio y potasio.

En las dos tormentas resulto que el sodio es, en promedio, el elemento de mayor concentración en todas las muestras de agua.

Variación Espacial

En la tabla VIII se presenta el resultado del análisis estadístico, la prueba t (student) entre las cuencas Coral Bay y Lameshur para el total de las muestras de agua de escorrentía colectadas en ambos sitios, cumpliendo los supuestos requeridos de normalidad y homocedasticidad en los datos para hacer este análisis.

Tabla VIII. Valores de “p” para el total de muestras.

Muestras Independientes	
t-test	p-values
Ca	0.003
Mg	0.001
Na	0.005
K	0.002
Si	0.140

Se encontraron diferencias significativas en la concentración de Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Potasio (K) entre las cuencas Coral Bay y Lameshur, mientras que para las concentraciones del silicio no se encontraron diferencias significativas. Es decir que solamente el silicio se comporta similar en las dos cuencas hidrográficas, resultando que no existen diferencias significativas en el análisis estadístico con una significancia de $p=0.05$.

Huracán Otto

La variabilidad espacial entre las dos cuencas hidrográficas se analizó con la concentración de cationes de las muestras de agua de escorrentía colectadas

durante el huracán Otto (del 5 al 8 de octubre del 2012) en las cuencas de Coral Bay y Lameshur.

En la tabla IX se presenta el resultado del análisis estadístico, la prueba t (student), buscando diferencias significativas en la concentración de los elementos disueltos en las muestras de agua de escorrentía entre las cuencas Coral Bay y Lameshur durante el huracán Otto, cumpliendo con los supuestos de normalidad y homocedasticidad en los datos requeridos para hacer este análisis.

Tabla IX. Valores de “p” durante el huracán Otto.

Muestras Independientes	
t-test	p-values
Ca	0.030
Mg	0.214
Na	0.366
K	0.062
Si	0.374

Se encontraron diferencias significativas en la concentración de calcio entre las cuencas Coral Bay y Lameshur, mientras que para las concentraciones de los demás elementos no se encontraron diferencias significativas. Es decir que para una misma tormenta en particular, el huracán Otto, solamente el calcio se comporta diferente en estas dos cuencas hidrográficas, resultando significativamente mayor en Coral Bay.

III.II Resultados del modelo geoquímico “Solmineq”

El índice de saturación se calculó basado en los resultados de los análisis físico-químicos de las muestras de agua colectadas en las cuencas que drenan a las bahías de Lameshur y Coral Bay. Los valores negativos indican que el mineral está siendo disuelto, mientras que los valores positivo indican está siendo precipitado como mineral arcilloso. Un valor de cero significa que el mineral esta en equilibrio con el agua. En la tabla X se presentan los índices de saturación calculados para las cuencas de Lameshur:

Tabla X. Índices de saturación para los minerales seleccionados de las cuencas Lameshur.

	SW-L2-1	SW-L2-2	SW-L1-1	SW-L1-2	SW- L1-4
Caolinita	5.04	4.99	5.02	5.00	5.05
Esmectita	3.64	3.56	3.62	3.60	3.65
Illita	3.11	3.01	3.05	2.99	3.11
feldespatos	2.41	2.35	2.38	2.44	2.46
Gibbsita	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
Albita	0.34	0.30	0.34	0.38	0.33
Cuarzo	0.33	0.31	0.33	0.31	0.34
Calcita	-1.12	-1.07	-1.08	-1.35	-1.11
Dolomita	-1.16	-1.19	-1.21	-1.79	-1.31
Anortita	-3.53	-3.52	-3.50	-3.79	-3.50

El criterio de selección para calcular los índices de saturación consistió en escoger los minerales que están presentes en el basamento y puedan estar en disolución, así como los productos de alteración que se pudieran estar formando en los minerales arcillosos. En la tabla X se puede observar que la calcita y la gibbsita son

los minerales con mayor probabilidad de estar en disolución y precipitación, respectivamente.

En la tabla XI se presentan los índices de saturación calculados en cuatro estaciones de monitoreo de la cuenca Coral Bay:

Tabla XI. Índices de saturación para minerales seleccionados en Coral Bay.

	SwCB-1	SwCB-3	SwCB-5	SwCB-2
Caolinita	4.91	5.18	4.94	5.04
Esmectita	3.39	3.95	3.44	3.65
Illita	3.03	3.36	3.06	3.17
feldespatos	2.39	2.56	2.40	2.45
Gibbsita	2.18	2.18	2.18	2.18
Albita	0.13	0.71	0.11	0.38
Cuarzo	0.27	0.40	0.29	0.33
Calcita	-0.98	-1.36	-0.94	-1.14
Dolomita	-0.85	-1.23	-0.82	-1.03
Anortita	-3.52	-3.62	-3.43	-3.54

La tabla anterior muestra que la calcita y la gibbsita son los minerales con mayor probabilidad de estar en disolución y precipitación, respectivamente. Las muestras SwCB-2 y SwCB-3 presentan importantes variaciones respecto al índice de saturación de calcita y albita.

En general el resto de los elementos no presentaron variaciones en las muestras analizadas.

III.III Resultados del modelo geoquímico “The Geochemist’s Workbench”

En base a los resultados de los análisis químicos en las muestras de agua, se aplicó el modelo geoquímico “The Geochemist’s Workbench” (GWB) el cual opera mediante la ecuación de balance de masa para calcular la fuente de los constituyentes disueltos en las aguas naturales. Los valores negativos indican que el mineral está siendo disuelto, mientras que los valores positivos indican que está siendo precipitado como mineral arcilloso. En la tabla XII se presentan los índices de saturación mineral calculados para las cuencas de Lameshur:

Tabla XII. Índices de saturación para minerales seleccionados en las cuencas Lameshur (WGB).

	SW-L2-1	SW-L2-2	SW-L1-2	SW-L2-2	SW-L1-4
Muscovita	2.97	2.94	3.00	2.86	3.02
Kaolinite	2.32	2.30	2.28	2.37	2.33
Illita	1.12	1.07	1.01	1.04	1.11
Gibbsita	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Cuarzo	0.21	0.21	0.20	0.24	0.22
Feldspatos	0.14	0.11	0.17	0.02	0.19
Calcita	-1.57	-1.54	-1.80	-1.85	-1.57
Albita	-1.90	-3.21	-3.18	-3.14	-3.22
Anortita	-7.28	7.26	-7.54	-7.50	-7.26

En la tabla XII se observa que la calcita y la illita son los minerales con mayor probabilidad de estar en disolución y precipitación, respectivamente. La gibbsita, el cuarzo y feldspatos se encuentran cercanos al cero, siendo más probables a estar en equilibrio con el agua.

En la tabla XIII se muestran los índices de saturación calculados para la cuenca de Coral Bay:

Tabla XIII. Índices de saturación para minerales seleccionados en Coral Bay (GWB).

	SwCB-1	SwCB-3	SwCB-5	SwCB-2
Muscovita	5.04	4.99	5.02	5.00
Kaolinita	3.64	3.56	3.62	3.60
Illita	3.11	3.01	3.05	2.99
Feldespatos	2.41	2.35	2.38	2.44
Gibbsita	2.18	2.18	2.18	2.18
Cuarzo	0.34	0.30	0.34	0.38
Calcita	0.33	0.31	0.33	0.31
Albita	-1.12	-1.07	-1.08	-1.35
Anortita	-1.16	-1.19	-1.21	-1.79

El modelo geoquímico “The Geochemist’s Workbench” resultó que la Illita fue el mineral más probable a ser precipitado como arcilla, mientras que la calcita el más probable a estar en disolución. En la muestra SwCB3 se observan ordenes de magnitudes mayores en comparación con las demás muestras en todos los elementos.

III.IV Difracción de Rayos X

Se analizaron cinco muestras de suelos en el laboratorio de Difractometría de rayos X de la UNAM campus Ensenada. Se escogió una muestra representativa de cada cuenca para ser analizada bajo los tres tratamientos (normal, glicol y calcinado). En las figuras 8 y 9 se presentan los difractogramas correspondientes a la muestras de Coral Bay:

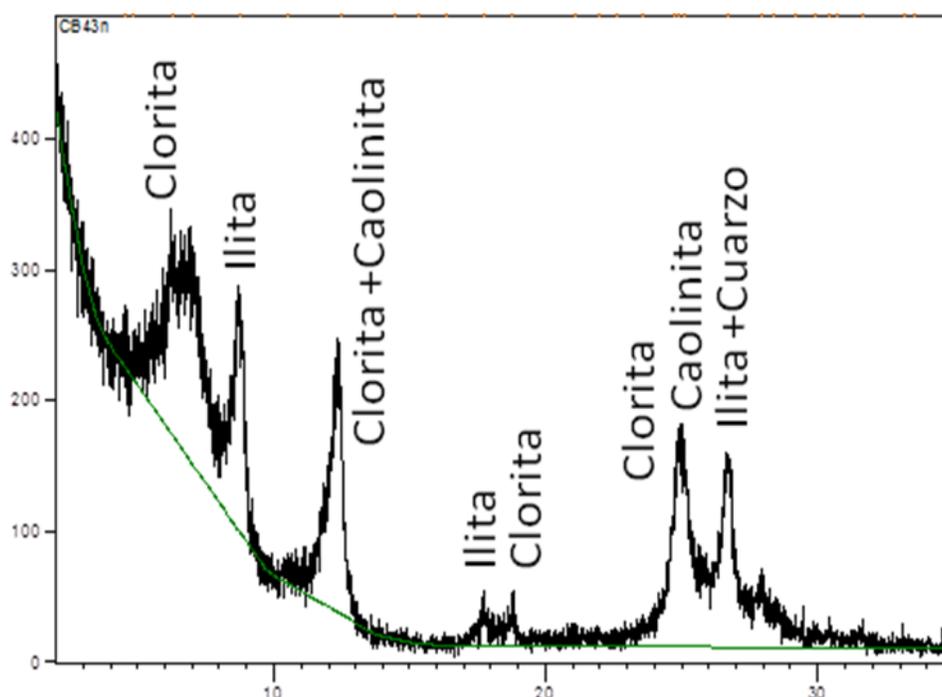


Fig 8. Difractograma de la muestra normal de Coral Bay.

En el difractograma de la muestra secada al aire (normal) de Coral Bay resultó que el pico de mayor concentración corresponde a illita, el segundo pico importante presento un traslape entre clorita y caolinita, por lo que es necesario el calcinado de la muestra y analizarla de nuevo para conocer cuál es el mineral dominante o de mayor proporción entre estos dos minerales. El cuarzo pese a que no es un mineral arcilloso estuvo presente en la muestra de Coral Bay.

La figura 9 presenta el difractograma de la muestra calcinada de Coral Bay.

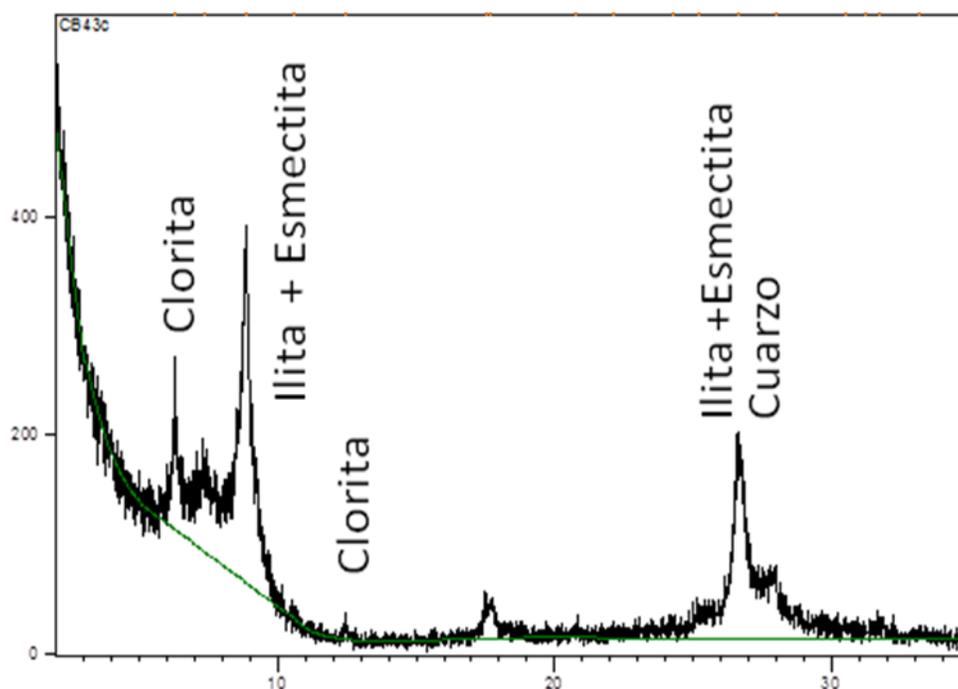


Figura 9. Difractograma de la muestra calcinada de Coral Bay.

La muestra calcinada conservó una alta concentración de Illita, representando el mayor componente en la concentración de minerales arcillosos de esta muestra de suelo. El traslape de clorita y caolinita en la muestra secada al aire (figura 8) se resolvió con este tratamiento que el pico es representado en mayor proporción por clorita. Por lo que se encontró un patrón mineralógico en Coral Bay con las concentraciones relativas de los siguientes minerales:

Illita > Clorita > Caolinita > Esmectita

En las figuras 10 y 11 se presentan los difractogramas correspondientes a la muestras de Lameshur:

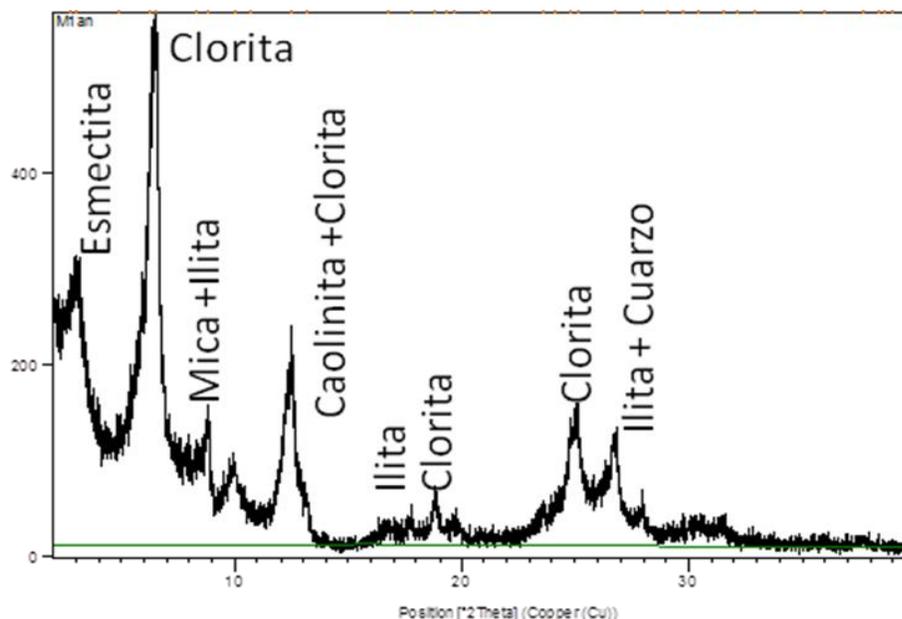


Figura 10. Difractograma de la muestra normal de Lameshur

El difractograma de la muestra secada al aire de Lameshur (figura 10) estuvo dominado por clorita, representando el pico de mayor concentración en este tratamiento. El pico de caolinita mas clorita represento una importante componente, por lo que será necesario revisar el tratamiento del calcinado de la muestra para conocer la proporción relativa de estos minerales. La esmectita estuvo presente en los resultados de este análisis, aunque en proporción menor comparada a los demás minerales. Se encontró presencia de cuarzo en la muestra, mineral primario fragmentado por el intemperismo mecánico.

La figura 11 presenta el difractograma de la muestra calcinada de Lameshur.

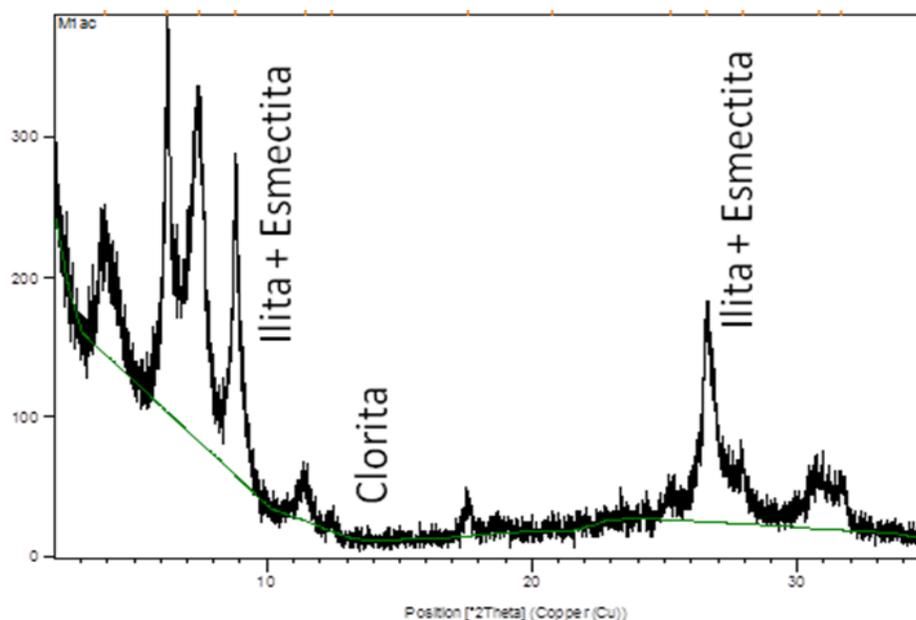


Figura 11. Difractograma de la muestra calcinada de Lameshur.

El tratamiento de la muestra calcinada de Lameshur conservó una alta concentración de clorita, representando el mayor componente en la concentración de minerales arcillosos de esta muestra de suelo. El traslape de clorita y caolinita en la muestra secada al aire (figura 8) se resolvió con este tratamiento que el pico es representado en mayor proporción por clorita. Por lo que se encontró un patrón mineralógico en Lameshur con las concentraciones relativas de los siguientes minerales:

Clorita > Illita > Caolinita > Esmeclita

III.V Microscopio Electrónico de Barrido

Se analizaron un total de 20 muestras de suelo en las dos localidades, 10 para las cuencas que drenan a la bahía Lameshur y 10 muestras para las cuencas que drenan a la bahía de Coral Bay. En la figura 12 se muestra una imagen representativa del conjunto de datos de Lameshur:

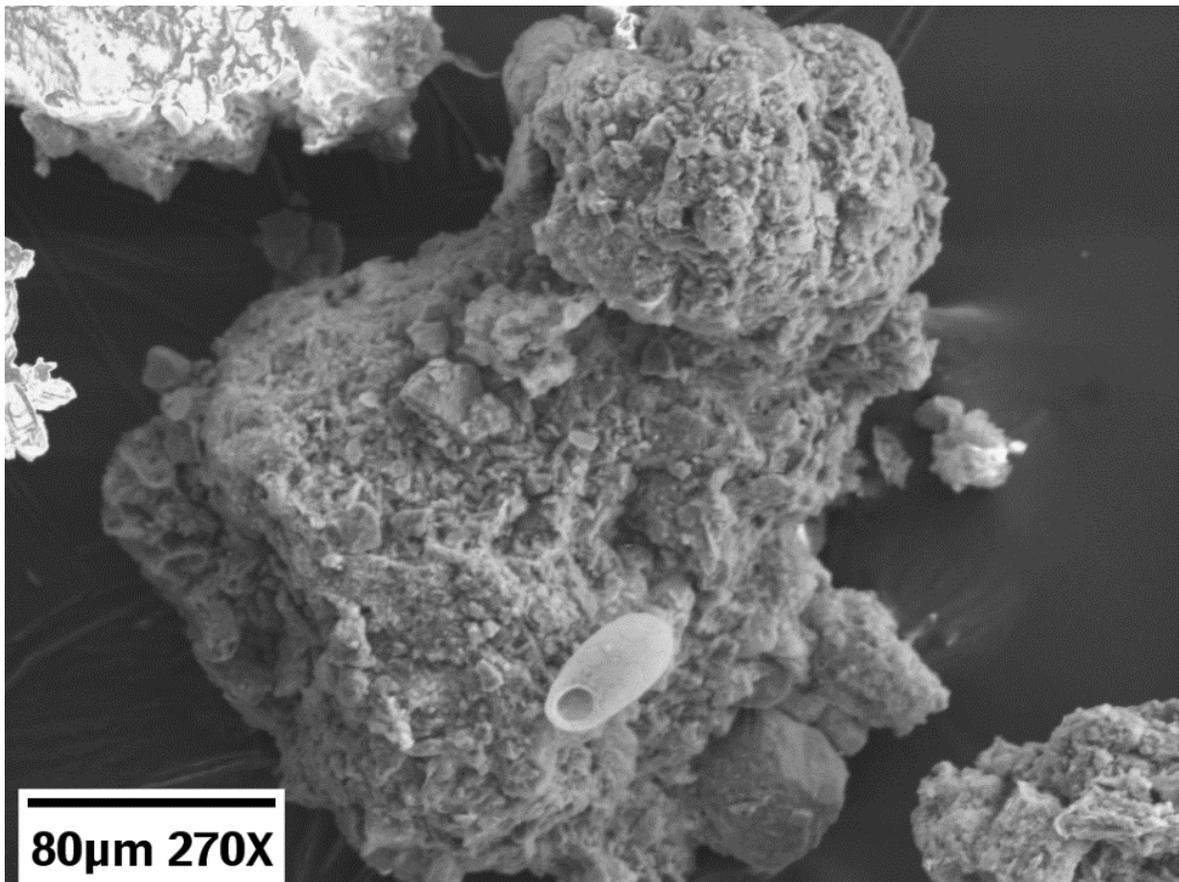


Figura 12. Imagen ampliada 270X de las arcillas en Lameshur Bay.

En la figura 12 se observa una arcilla correspondiente a una muestra de suelo de la cuenca Lameshur, es evidente la cohesión entre partículas creando un *falso* tamaño de grano. La cohesión es la cualidad de las partículas para mantenerse unidades por fuerzas eléctricas y va a depender del número de puntos de contacto, entre más fina la partícula es mayor la cohesión. Esta aglomeración de

las arcillas minimiza el transporte de sedimentos, ya que se necesita mayor energía para ponerla en suspensión e inicie el transporte en el proceso de erosión de suelos.

La figura 12 es una imagen representativa del total de muestras analizadas en el microscopio electrónico de barrido de las cuencas Lameshur, presentaron esta característica de la cohesión entre partículas consistentemente y una similitud en los picos de intensidad relativa en los elementos químicos presentes en las muestras de suelo.

En la figura 13 se muestra su respectivo espectro de dispersión de energía, que representa las intensidades relativas de los elementos presentes en el suelo:

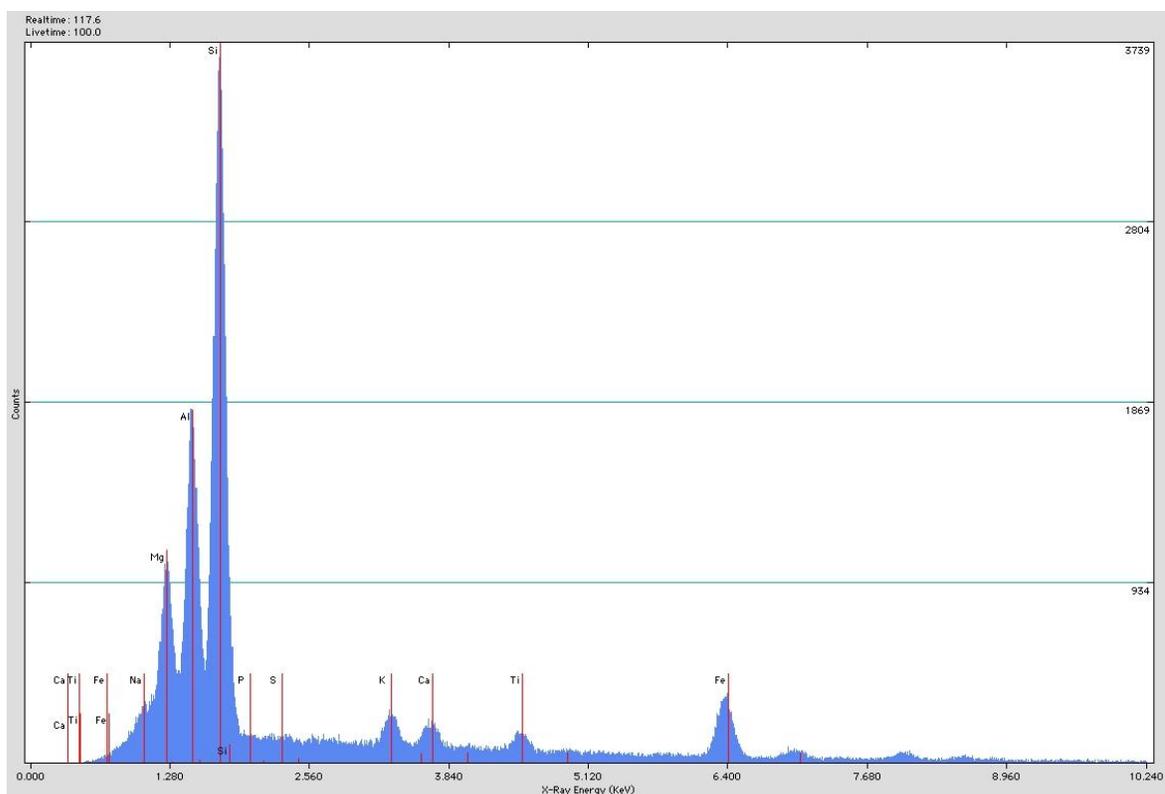


Figura 13. Espectro de dispersión de los elementos presentes en el suelo de Lameshur.

En a base a la imagen anterior (figura 13) se observa que el Silicio y el aluminio son los elementos químicos que estuvieron presentes consistentemente en las muestras de suelo de las cuencas que drenan a la bahía de Lameshur.

La figura 14 es una imagen representativa del conjunto de datos de Coral Bay:

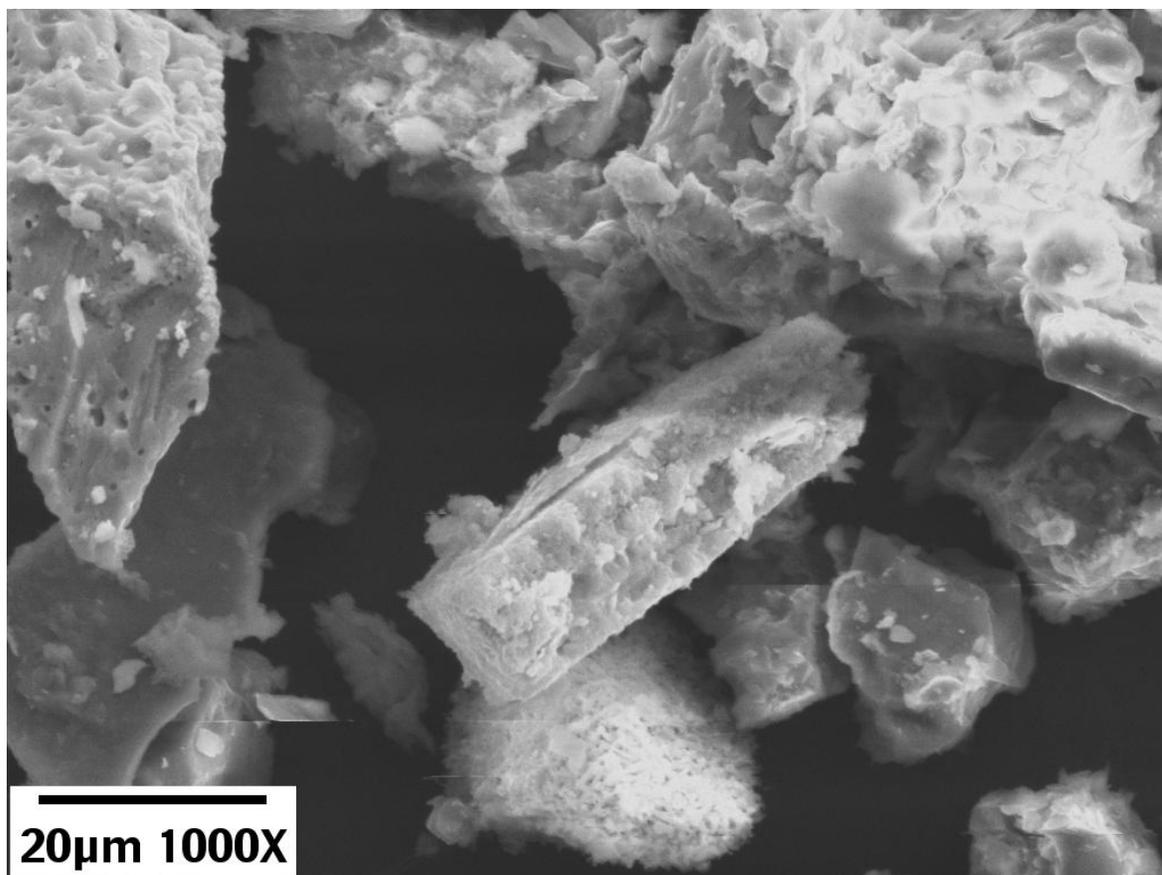


Figura 14. Imagen amplificada 270X de las arcillas en Coral Bay.

En la figura 14 se puede observar un mayor número de caras frescas, en el centro de la imagen se puede distinguir un feldespato, el cual puede ser un indicio de que el material fragmentado no ha sido transportado mucha distancia del lugar donde fue colectada la muestra. Los hoyos en las caras frescas son una señal de la disolución de algunos elementos al contacto con el agua de escorrentía.

En la figura 15 se muestra su respectivo espectro de dispersión de energía, que representa las intensidades relativas de los elementos presentes en el suelo en una muestra de Coral Bay:

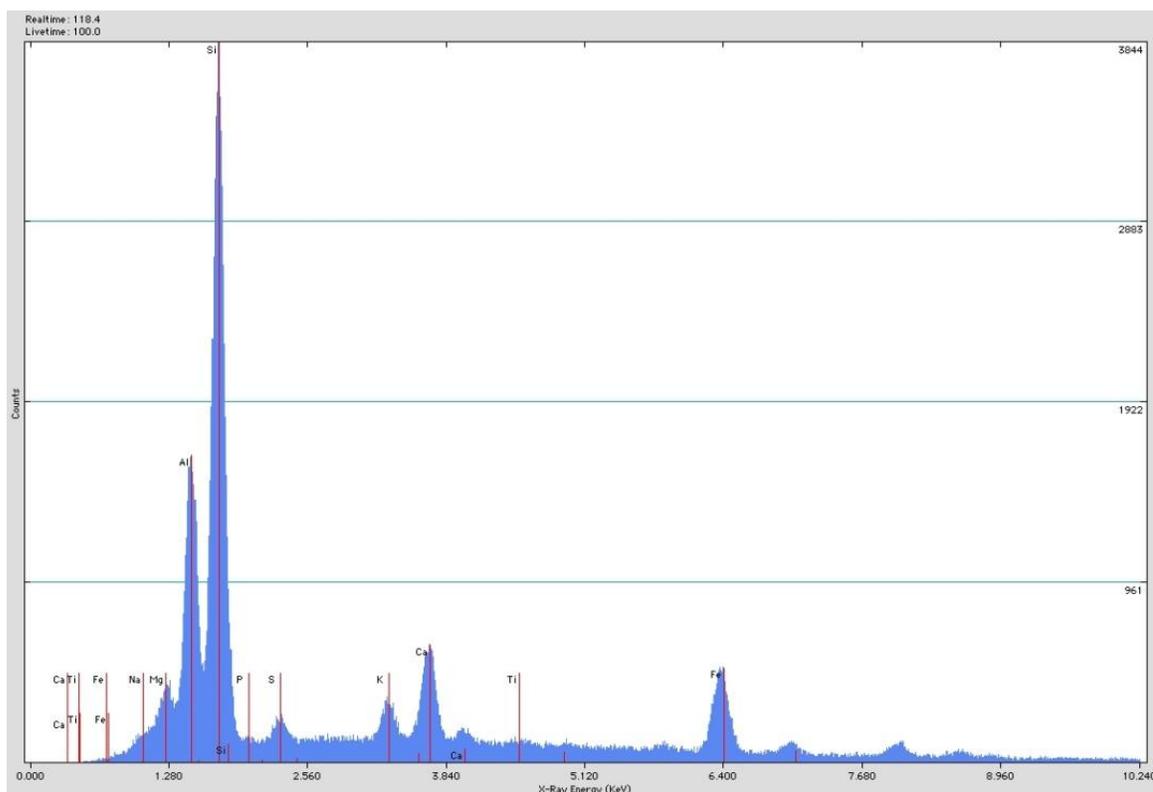


Figura 15. Espectro de dispersión de los elementos presentes en el suelo de Coral Bay.

El espectro de energía presenta algunas diferencias respecto a las muestras analizadas de Lameshur, aunque el silicio y el aluminio se mantuvieron como las componentes más importantes, el magnesio bajo y se observa una concentración ligeramente mayor de calcio en las muestras de suelo de Coral Bay.

III. VI Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

El modelo RUSLE se calculo multiplicando los seis factores que componen su ecuación:

$$A = R * K * LS * C * P$$

El método utilizado para calcular el factor de erosividad por la lluvia (R) convencionalmente requiere de datos de la frecuencia de tormentas de por lo menos 10 años de registro. Para este trabajo se utilizaron datos de precipitación promedio de los últimos 20 años registrados en Coral Bay y Cruz Bay, su localización geográfica se presenta en la figura 16:

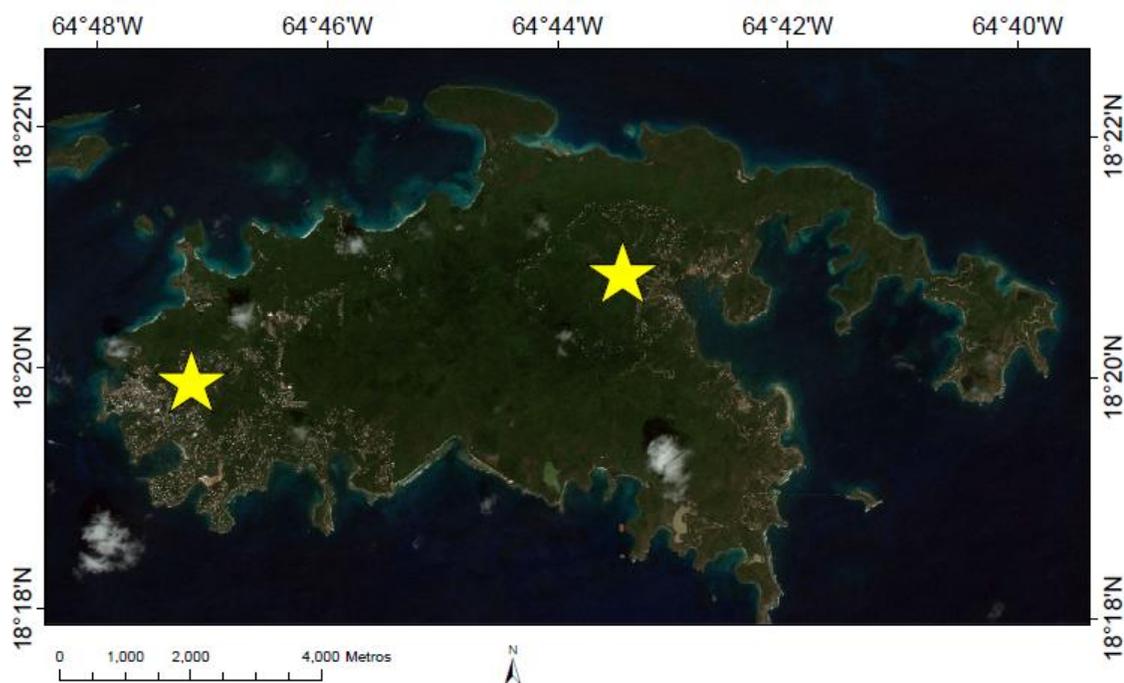


Figura 16. Localización geográfica de las estaciones meteorológicas.

Los valores de precipitación promedio se presentan en la tabla XV:

Tabla XIV. Datos de precipitación promedio en dos estaciones de la isla Saint John USVI.

NCDC 1981- 2010 (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Coral Bay	79.5	48.2	41.1	82	101	67	87.1	94.9	149	143	186	107	1187
Cruz Bay	76.4	44.9	43.1	78.4	103	70.3	88.6	97.5	140	133	151	88.9	1115
Promedio	77.9	46.5	42.1	80.2	102	68.6	87.8	96.2	144	138	168	98.1	1151

Las dos estaciones meteorológicas mostraron una precipitación promedio anual de 1150 mm en los últimos 20 años, con una desviación estándar de 35. Este fue el valor que se utilizó para calcular el factor de erosividad causado por la lluvia (R).

Se calculó una $R = 370,000 \text{ (MJ.mmkm}^{-2}\text{hr}^{-1}\text{yr}^{-1}\text{)}$ para Saint John según la metodología descrita por Renard, 1994.

Factor K, erodabilidad del suelo.

Se utilizaron los valores de erodabilidad del suelo (factor K) publicados por NOAA (2011) en un archivo raster, el cual fue re-muestreado utilizando la paquetería de ArcGis (Arcmap 10) de ESRI, específicamente la herramienta "Arctools- Data management- Raster processing- Resample". Este archivo raster fue publicado originalmente con una resolución de 30 metros y para los objetivos de este trabajo se calculó una rejilla regular de 5 metros con el método de interpolación "Nearest".

En la figura 17 se presentan los resultados espaciales del factor K en la isla Saint John, destacando los valores de este factor en las cuencas estudiadas:

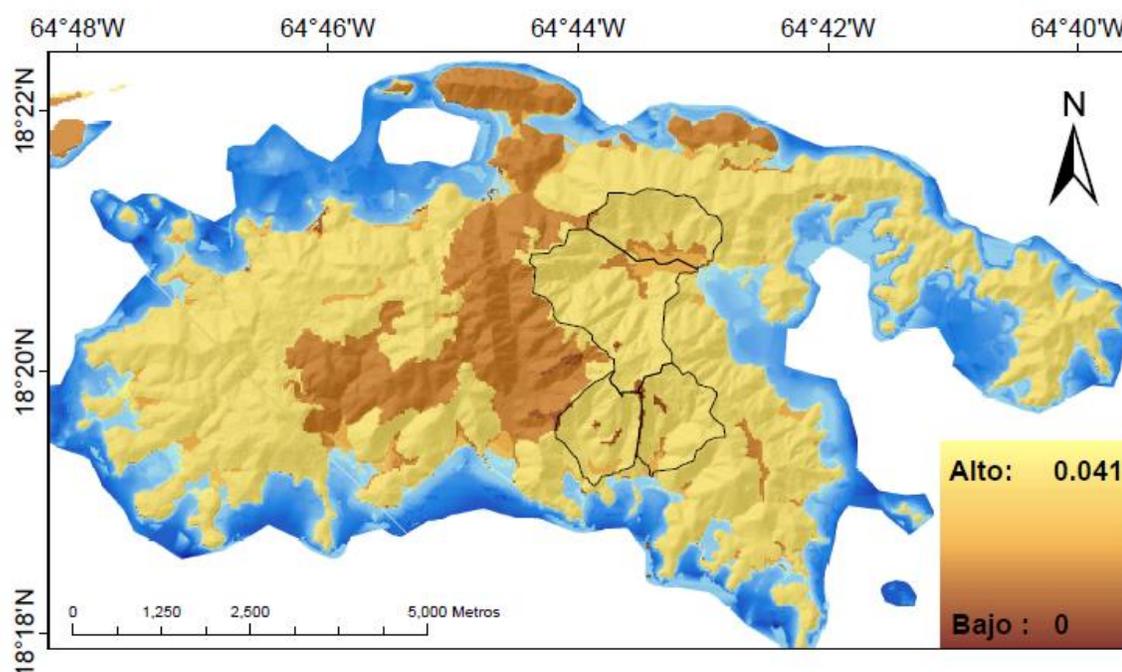


Figura 17. Mapa de erodabilidad del suelo, factor K ($\text{Mg.hrMJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$). Fuente NOAA (20011).

En la tabla XV se presenta el análisis zonal de cada cuenca con las estadísticas básicas del factor K por cada cuenca.

Tabla XV Valores estadísticos del factor K en cada cuenca.

	Coral Bay	Great Lameshur	Little Lameshur
Máximo	0.041	0.036	0.036
Mínimo	0.013	0.013	0.013
Promedio	0.035	0.035	0.035
Desviación Ext.	0.004	0.005	0.004

La distribución espacial del factor K se presentó valores entre 0 y 0.041. En su mayoría se observa un potencial alto de erosión en las cuencas estudiadas por su coloración clara en general (figura 17), lo cual significa que son suelos altamente erosionables. Sin embargo, Lameshur presentó valores más bajos en comparación con la cuenca Coral Bay.

Factor LS

Este factor se calculo de acuerdo a la metodología descrita en Smith et al 2007 a partir del modelo de elevación digital LIDAR, en la figura 18 se presentan los resultados espaciales de las cuencas estudiadas.

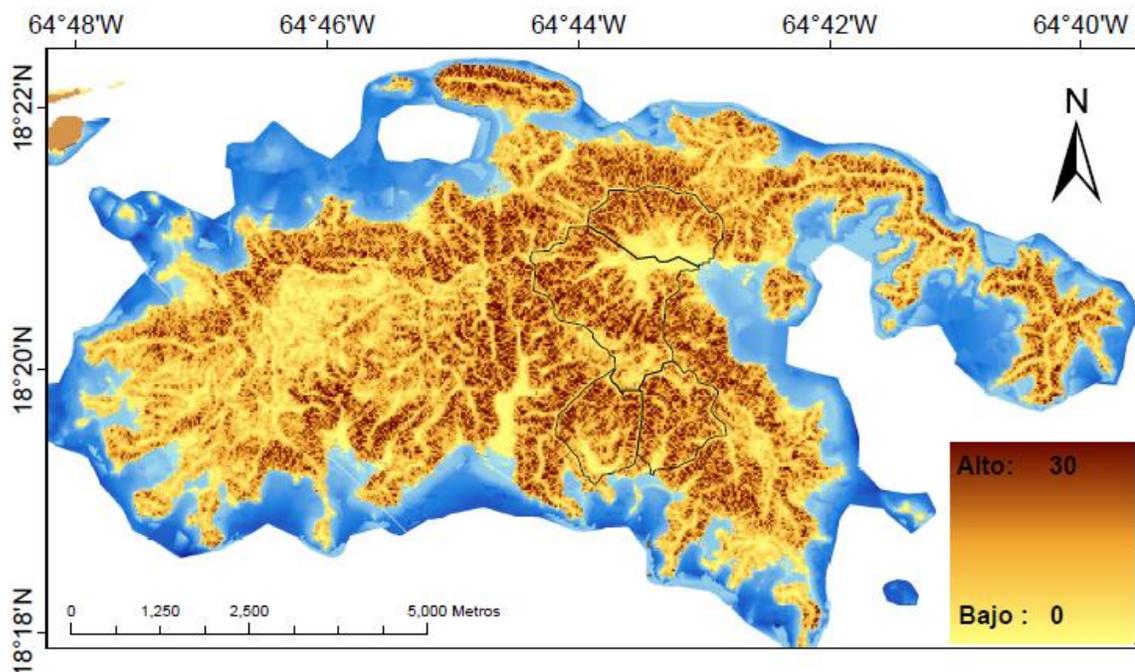


Figura 18. Mapa del factor compuesto LS (pendiente y longitud de la parcela).

Los resultados del factor LS oscilaron entre 0 y 30. Su distribución espacial se vio altamente influenciada por la irregularidad de la superficie. En la figura 18 un potencial alto de erosión en función a este factor se relaciona por una coloración más oscura.

En la tabla XVI se presenta el análisis zonal de cada cuenca con las estadísticas básicas del factor compuesto LS por cada cuenca.

Tabla XVI Valores estadísticos del factor compuesto LS en cada cuenca.

	Coral Bay	Great Lameshur	Little Lameshur
Máximo	26.896	26.535	27.067
Mínimo	0.012	0.093	0.042
Promedio	8.050	9.268	8.425
Desviación Est.	5.448	5.024	5.101

Las cuencas de Lameshur y Coral Bay presentaron valores de igual magnitud y son relacionados con la compleja topografía del terreno en las cuencas estudiadas.

Factor C

Los valores del Factor C fueron tomados de McCreery (2007) y se presentan en la tabla XVII:

Tabla XVII. Factor C, McCreery (2007).

Cuenca	Factor C
Lameshur	0.0017
Coral Bay	0.0055

Este factor es un valor promediado por peso en base a mediciones de campo siguiendo la metodología descrita por Wischmeier y Smith, 1978. En Coral Bay se presenta un valor mayor en comparación con Lameshur, representando un potencial mayor de erosión en función de este factor.

Factor P

El factor (P) son las prácticas de manejo para disminuir la erosión del suelo (Renard et al. 1996). En Saint John las prácticas de este tipo son pocas o nulas, por lo que se asumirá un valor constante de 1.0 para las cuencas estudiadas.

Estimación de la erosión media anual.

El producto de los factores que conforman el modelo RUSLE, tales como la erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, topografía y cubierta vegetal permiten obtener un mapa con sus respectivos valores de erosión. Las figuras 19, 20 y 21 muestran las tasas de erosión en la cuenca Coral Bay y las sub-cuencas de Lameshur presentadas en la misma escala grafica y de color para hacer más fácil su comparación. Las tasas de erosión del suelo estimadas en la cuenca Coral Bay se presentan en la figura 19.

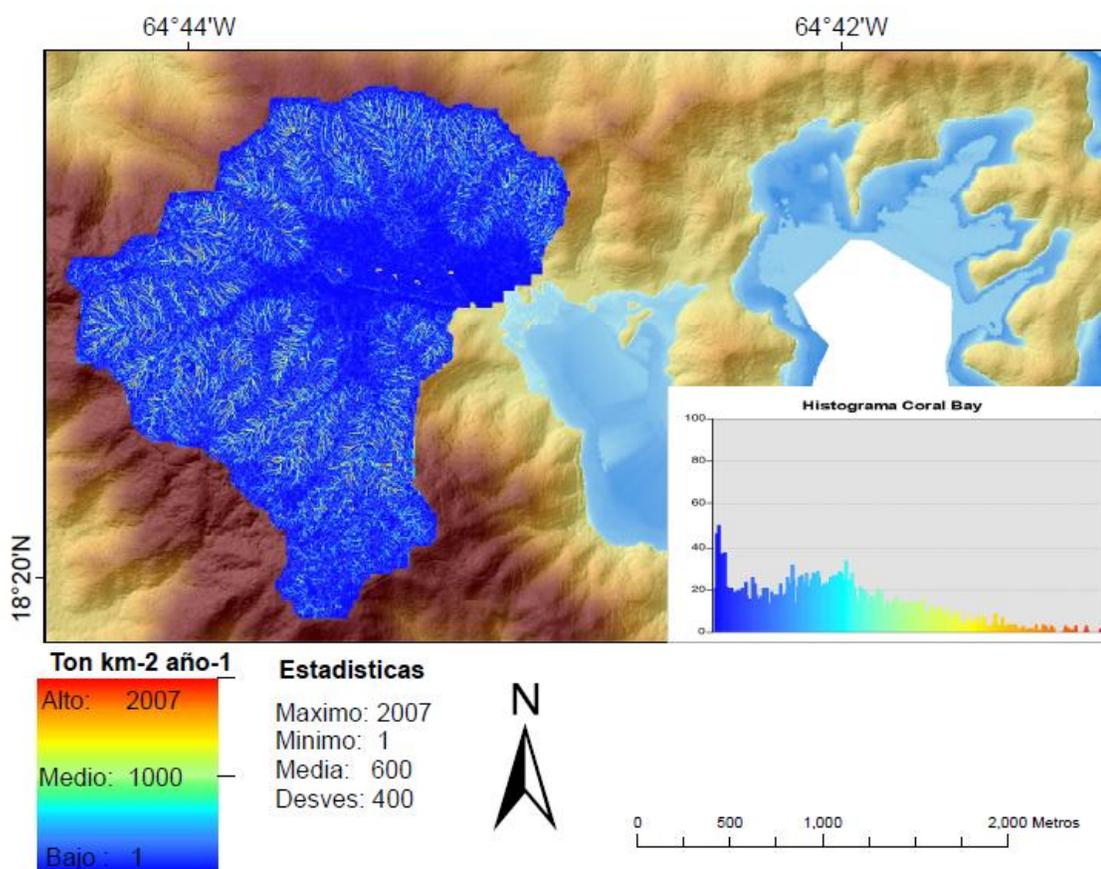


Figura 19. Tasa de erosión media anual en $\text{ton km}^{-2} \text{año}^{-1}$ calculada por medio de RUSLE para la cuenca Coral Bay.

Las tasas de erosión en Coral Bay presentaron un valor máximo de $2,007 \text{ ton km}^{-2} \text{año}^{-1}$, con un valor promedio de $600 \text{ ton km}^{-2} \text{año}^{-1}$, y una desviación estándar de

400. Se observo que las mayores tasas de erosión corresponden a las zonas con mayor pendiente, y por lo que los resultados del modelo RUSLE está siendo altamente influenciadas por el factor LS (figura 18).

En la figura 20 se presenta la variación espacial de RUSLE en Great Lameshur:

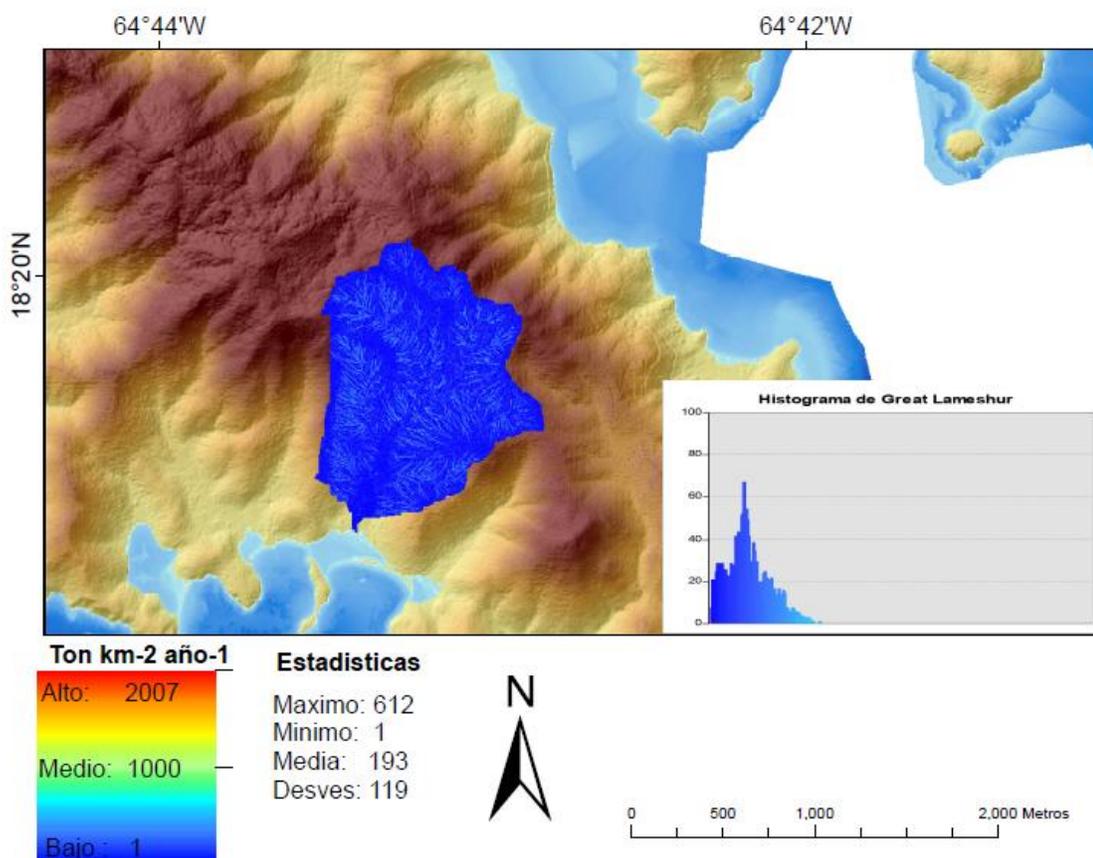


Figura 20. Tasa de erosión media anual en ton km⁻² año⁻¹ calculada por medio de RUSLE para la cuenca Great Lameshur.

La erosión estimada para las cuencas Great Lameshur presentaron una tasa de erosión anual máxima de 612 ton km⁻² año⁻¹, con un promedio de 193 ton km⁻² año⁻¹, y una desviación estándar de 119. El histograma en esta figura destaca la distribución de los valores de erosión calculados en esta cuenca, los cuales resultaron muy inferiores a la erosión calculada en Coral Bay.

En la figura 21 se presenta la variación espacial de RUSLE en Little Lameshur:

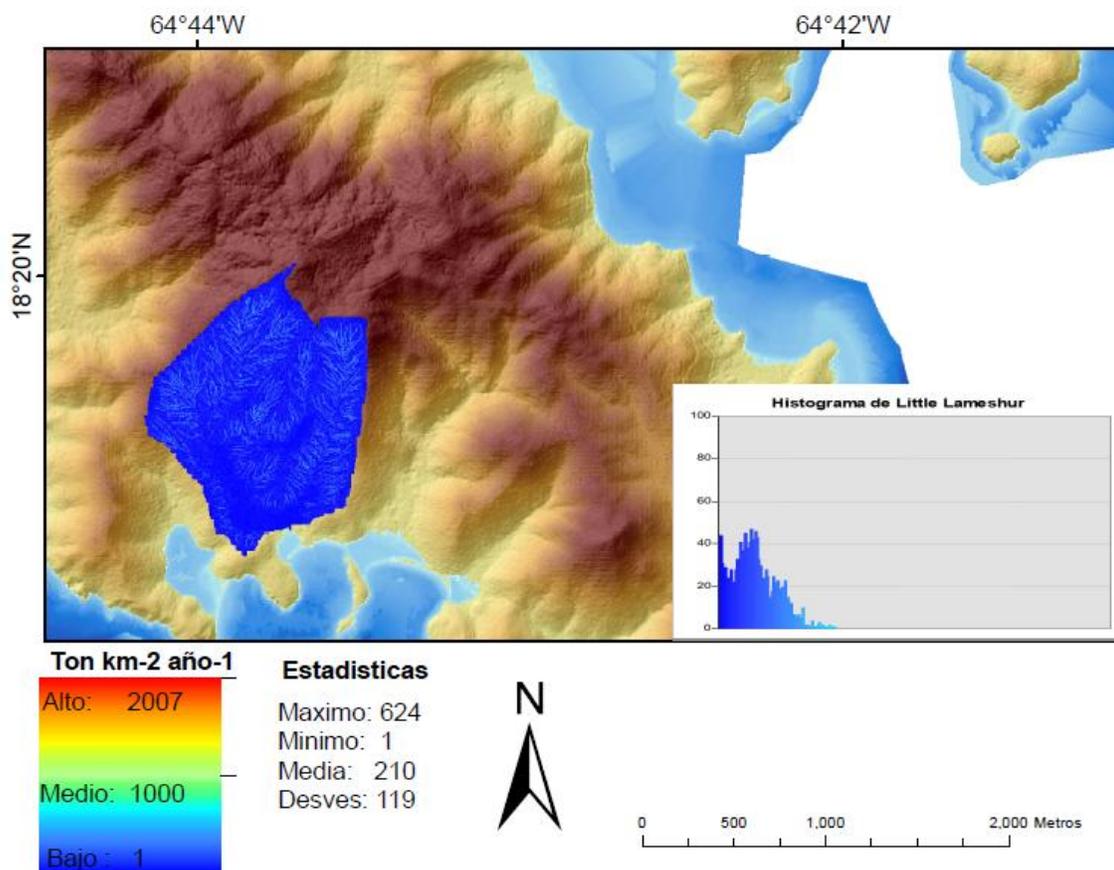


Figura 21. Tasa de erosión media anual en ton km⁻² año⁻¹ calculada por medio de RUSLE para la cuenca Little Lameshur.

La erosión estimada para la cuenca Little Lameshur presento una tasa de erosión media anual máxima de 624 ton km⁻² año⁻¹, con un promedio de 210 ton km⁻² año⁻¹, y una desviación estándar de 119.

En los resultados presentados en las figuras 19, 20 y 21 se observa una gran diferencia entre las tasas de erosión de la cuenca Coral Bay respecto a las cuencas Great y Little Lameshur. En promedio, la cuenca Coral Bay genera aproximadamente 300% mas material sedimentario por kilometro cuadrado que las cuencas Lameshur al año. La diferencia en el factor C asignado a cada cuenca tiene un potencial efecto en las tasas de erosión calculadas.

III.VII Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)

La erosión del suelo es un proceso hidrológicamente impulsado y dependiente del escurrimiento (Kinnell, 2005). Por lo tanto, al incluir la escorrentía como un factor independiente en el modelo de erosión, MUSLE tiene una mayor precisión de la predicción de la erosión del suelo sobre USLE y RUSLE (Williams, 1975; Williams y Berndt, 1972; Neitsch, et al. 2005; Sadeghi et al. 2004).

En la figura 22 se presenta el registro de precipitación del 2010, es evidente que los eventos de corto plazo dominan los eventos máximos de erosión hídrica, por lo que se considero la tormenta del “Huracán Otto” con duración de 3 días para estimar las tasas de erosión con el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) propuesta por Williams and Berndt, 1977.

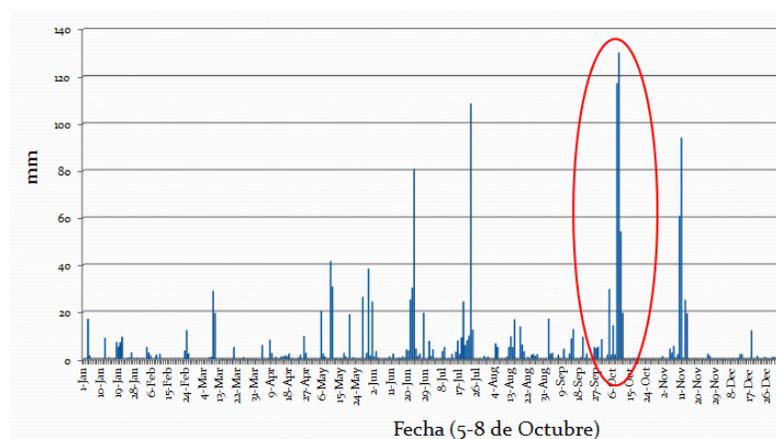


Figura 22. Datos de precipitación del 2010 en Saint John USVI.

III.VII.1 Profundidad de la escorrentía

De acuerdo a las ecuaciones (4 y 5) mencionadas en la metodología se calculó la profundidad de escorrentía Q para las cuencas que drenan a cada bahía:

Resultando un valor de **$Q=257\text{mm}$** para ambos sitios.

III.VII.2 Descarga pico “ q_p ”

De acuerdo a la ecuación (6) mencionada en la metodología se calculó la descarga pico q_p para las cuencas que drenan a cada bahía:

Resultando un valor de **$Q_p = 58,000 \text{ km}^2 \text{ mm min}^{-1}$** en Lameshur, y **$64,000 \text{ km}^2 \text{ mm min}^{-1}$** en Coral Bay.

$Q_p = 58,000 \text{ km}^2 \text{ mm min}^{-1}$ en Lameshur, y

$Q_p = 64,000 \text{ km}^2 \text{ mm min}^{-1}$ en Coral Bay.

Sustituyendo los valores necesarios para calcular el factor de erosividad para esta tormenta en particular en la ecuación universal de pérdida de suelo modificada, según la ecuación (3):

Por lo tanto, la ecuación MUSLE para la cuenca de Coral bay es:

$$A = 130,000_{CB} \times K \times (LS) \times C \times P$$

Mientras que para la cuenca de Lameshur es:

$$A = 122,500_{LB} \times K \times (LS) \times C \times P$$

En la figura 23 se presenta un mapa con los valores de erosión potencial producidos por el Huracán Otto en la cuenca Little Lameshur.

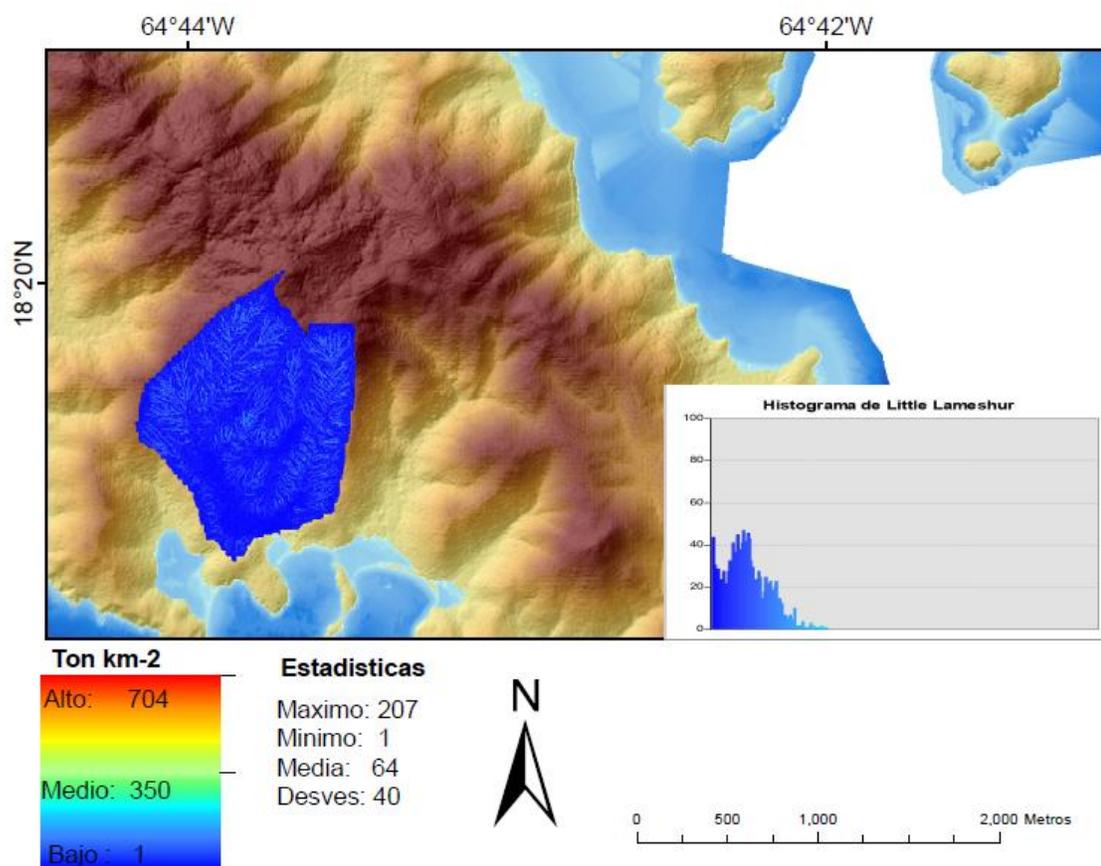


Figura 23. Erosión potencial en Little Lameshur producida por el huracán Otto.

En Little Lameshur las tasas de erosión producidas por el Huracán Otto, en toneladas por kilómetro cuadrado oscilaron entre 1 y 207 ton km⁻², mientras que en promedio se erosionan aproximadamente 70 ton km⁻², con una desviación estándar de 39 ton km⁻². Los valores máximos de erosión potencial estuvieron asociados a los valores máximos del factor LS, los cuales reflejan la pendiente del terreno. Mientras que las zonas más planas presentaron valores menores de erosión.

En la figura 24 se presenta un mapa con los valores de erosión potencial producidos por el Huracán Otto en la cuenca Great Lameshur.

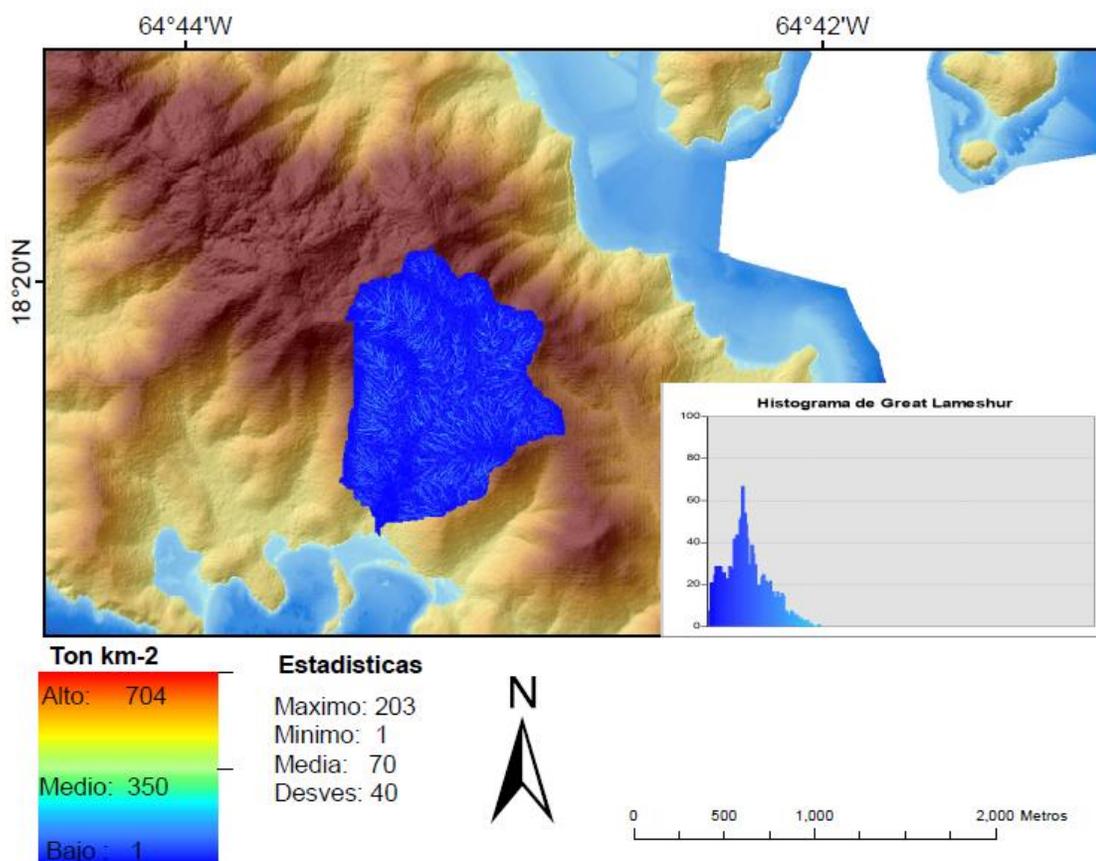


Figura 24. Erosión potencial en Great Lameshur producida por el huracán Otto.

En Great Lameshur las tasas de erosión producidas por el Huracán Otto, en toneladas por kilómetro cuadrado oscilaron entre 1 y 203 ton km⁻², mientras que en promedio se erosionan aproximadamente 63 ton km⁻², con una desviación estándar de 38 ton km⁻². Los valores máximos estuvieron asociados a los valores máximos del factor LS, los cuales reflejan la pendiente del terreno. Mientras que las zonas más planas presentaron valores menores de erosión.

En la figura 25 se presenta un mapa con los valores de erosión potencial producidos por el Huracán Otto en la cuenca Coral Bay.

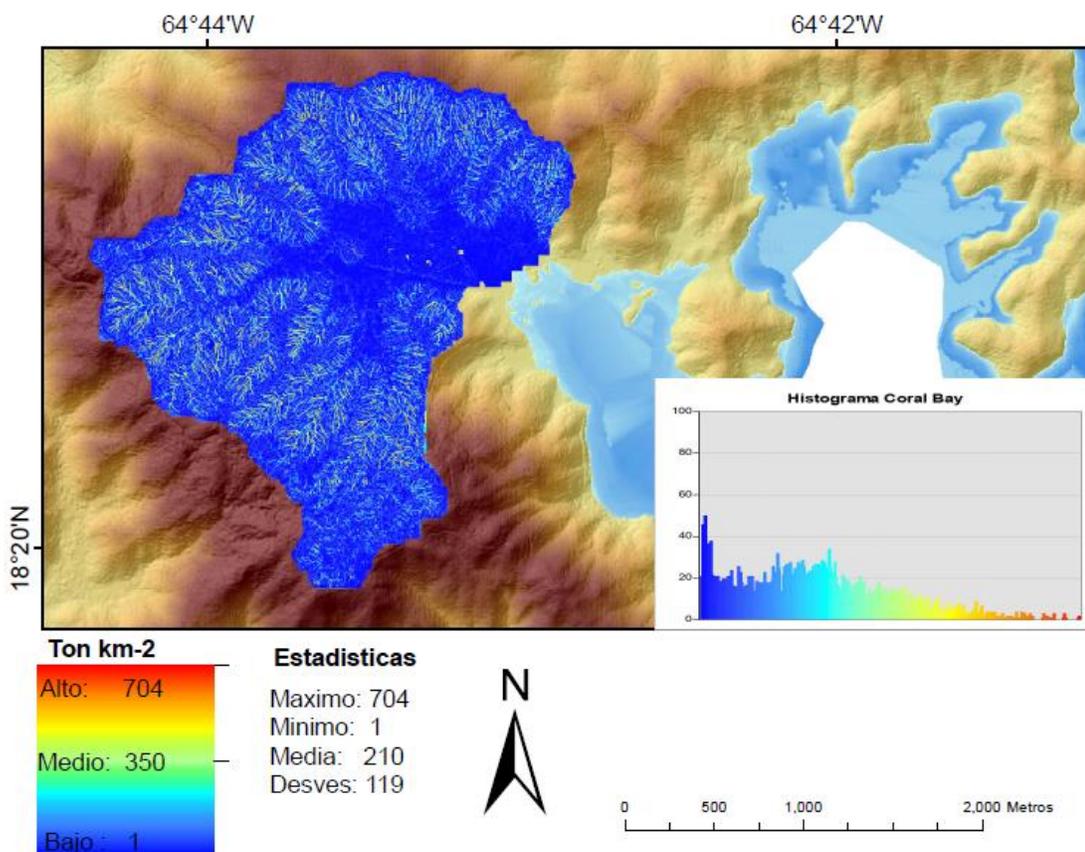


Figura 25. Erosión potencial en Coral Bay producida por el huracán Otto.

Las tasas de erosión producidas por el Huracán Otto en Coral Bay oscilaron entre 1 y 700 ton km⁻², mientras que en promedio se erosionan 210 ton km⁻², con una desviación estándar de 140 ton km⁻². Se observa una gran diferencia entre las tasas de erosión de la cuenca Coral bay respecto a Lameshur.

Coral Bay presento un potencial de erosión 3 veces mayor que Lameshur.

El valor asignado al factor C tiene un efecto primordial en la diferencia en las tasas de erosión de ambos sitios. En el siguiente capítulo se presenta un análisis de la sedimentación en las bahías receptoras de las cuencas estudiadas.

III. VIII Sedimentación Costera

Se utilizaron los datos de 11 trampas de sedimentación submarinas en las bahías Coral Bay y Lameshur para cuantificar la sedimentación costera y relacionarla con las tasas de erosión estimadas sobre las cuencas hidrográficas. En la figura 26 se presenta la localización geográfica de las trampas submarinas y la delimitación de las bahías utilizadas para el cálculo del balance de erosión - depositación.

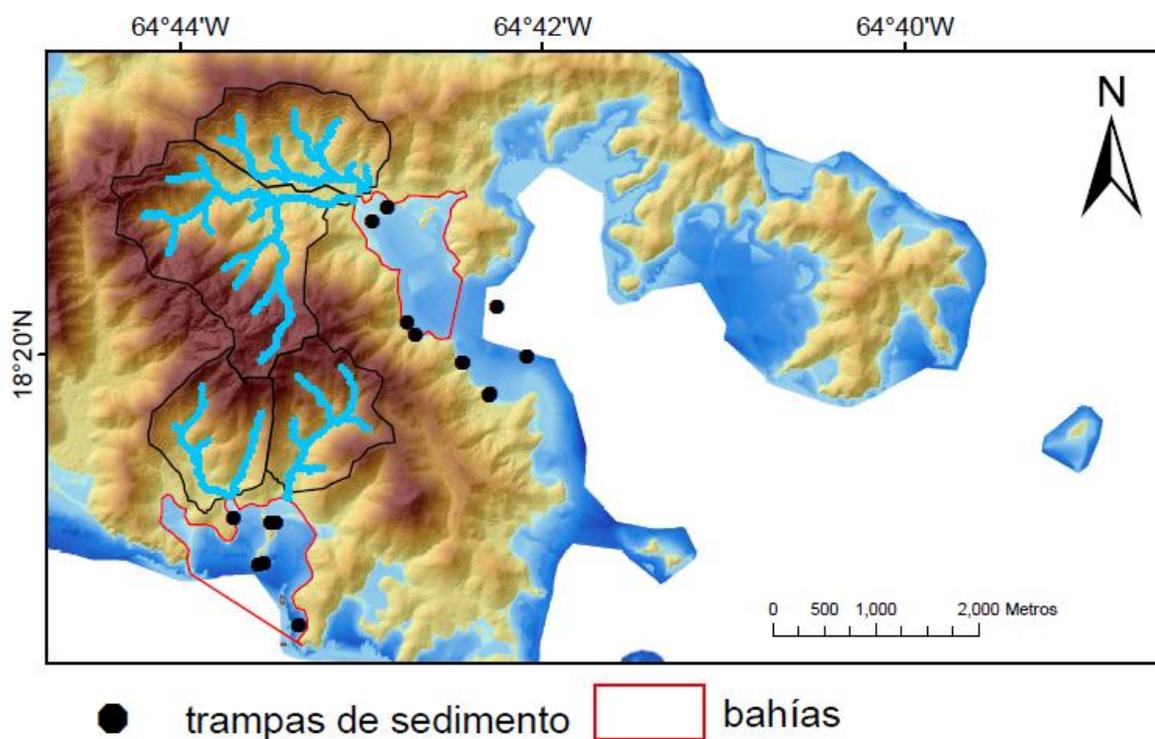


Figura 26. Localización de las trampas de sedimento y delimitación de las bahías receptoras de las cuencas de drenaje.

Las trampas de sedimentos fueron recuperadas cada mes, por lo que se cuenta con datos mensuales de sedimentación, reportados como miligramos por centímetro cuadrado por día, normalizados por área y tiempo. En las figuras 27, 28, 29 y 30 se presentan gráficos de barras de dos estaciones representativas de cada bahía con información mensual de agosto a diciembre del 2010.

Coral Bay

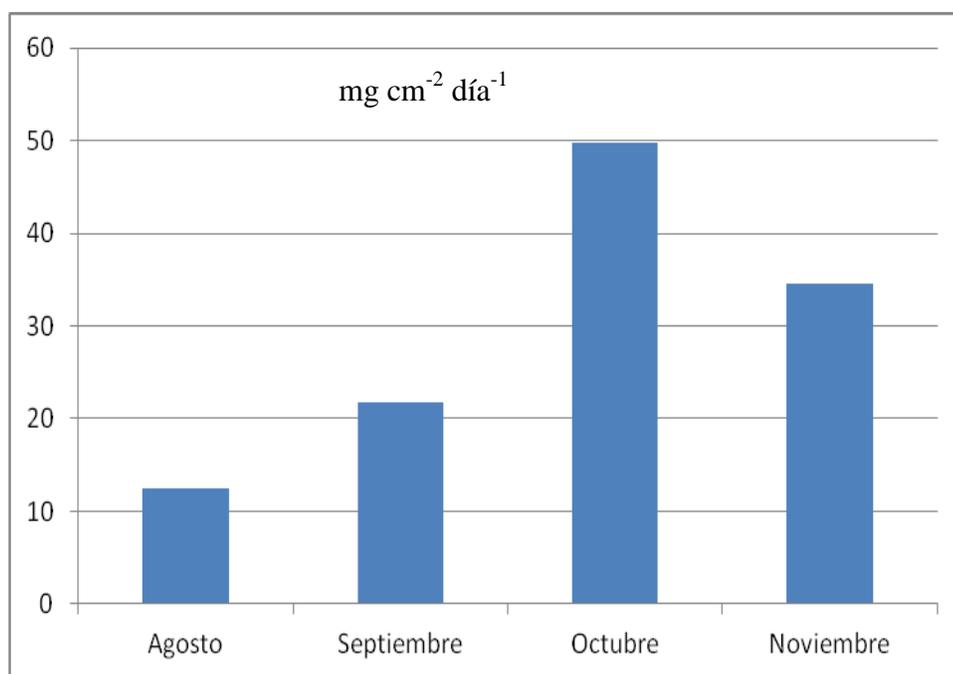


Figura 27. Tasa acumulada mensual de sedimentación en Coral Bay (Norte).

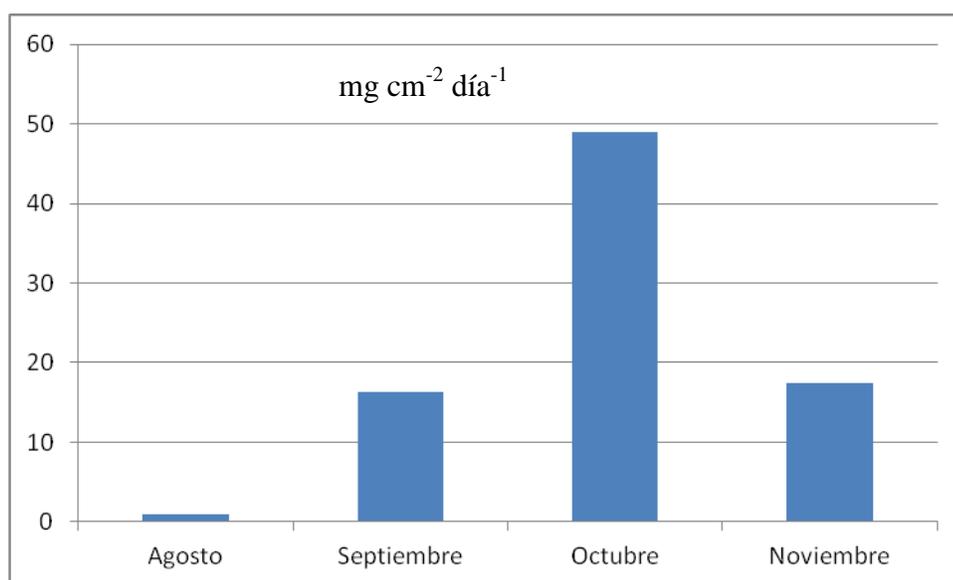


Figura 28. Tasa acumulada mensual de sedimentación en Coral Bay (Sur).

Lameshur

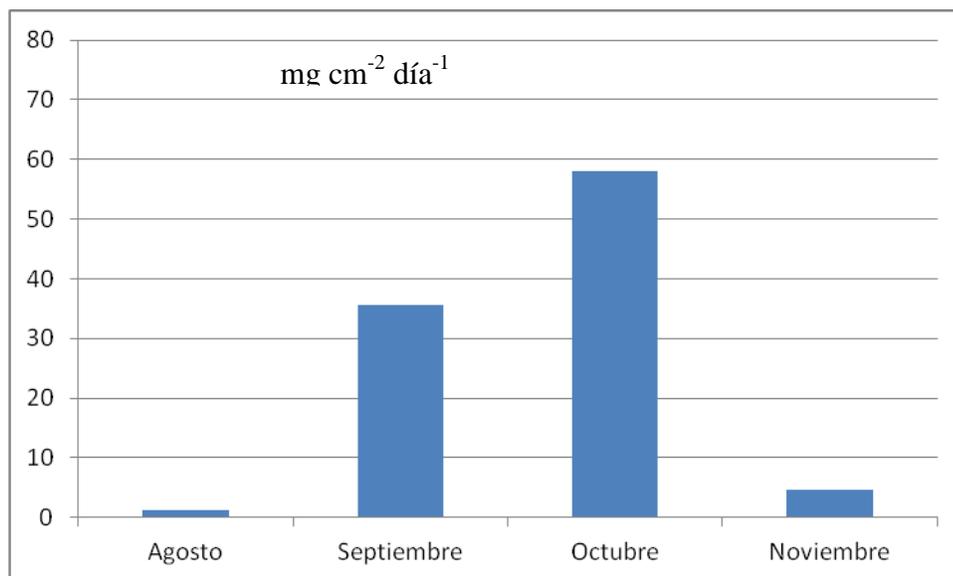


Figura 29. Tasa acumulada mensual de sedimentación en Great Lameshur.

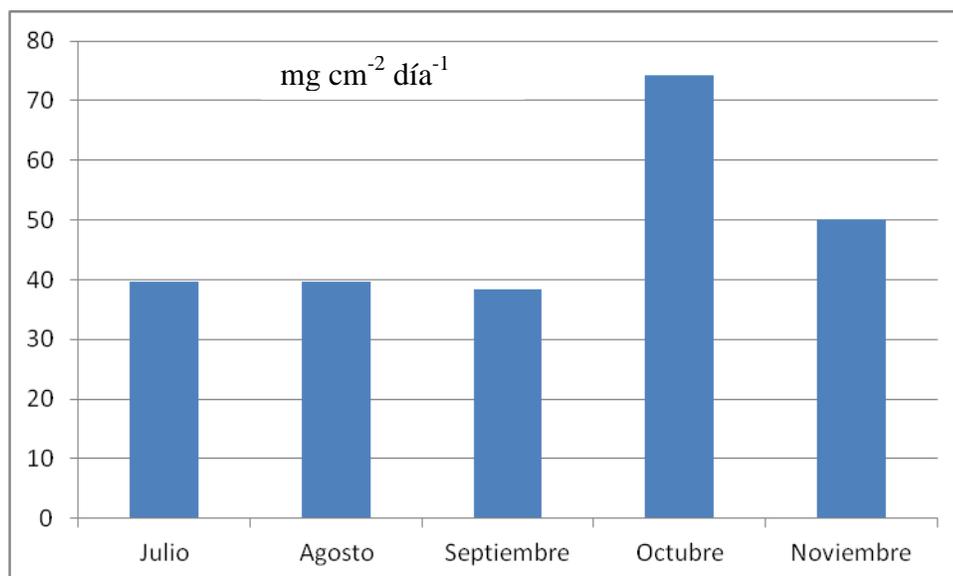


Figura 30. Tasa acumulada mensual de sedimentación en Little Lameshur.

En todas las graficas de sedimentación acumulada mensual se observa un incremento en la sedimentación del mes de octubre, fecha en la que ocurrió el huracán Otto (5 al 8 de octubre del 2010) en comparación con los registros de meses anteriores. En general, todas las estaciones de monitoreo (trampas de sedimentación) presentaron el mismo patrón de sedimentación temporal en las bahías, sin embargo mostraron una gran diferencia espacial en magnitud de sedimentación, las estaciones de monitoreo de Coral Bay acumularon más sedimento, y en base a estos registros se cuantificara el balance de erosión – sedimentación.

III.IX Balance de erosión – sedimentación

Para validar las tasas de erosión (MUSLE) estimadas en las cuencas hidrográficas producidas por el huracán Otto, se analizaron los datos de sedimentación costera en las trampas de sedimentación marina para calcular un balance de erosión – sedimentación en las cuencas estudiadas. Las tasas de sedimentación fueron promediadas y posteriormente normalizadas en espacio y tiempo por el área de cada bahía, y por los tres días que duro el huracán Otto. La cuenca Coral Bay comprende un área de 6.5 km², mientras que su bahía cubre un área de 0.69 km². Las cuencas (Great y Little) Lameshur cubren un área de 4.5 km² y su bahía un área de 0.96 km² (figura 26). La tabla XVIII presenta el balance de erosión – sedimentación durante el Huracán Otto:

Tabla XVIII. Balance de erosión – sedimentación producido por el Huracán Otto

Coral Bay			Lameshur		
Erosion	Sedimentación	%	Erosion	Sedimentación	%
1365 ton	3150 ton	230	302 ton	1389 ton	460

En base a estos resultados, se calculo un balance de 300% sobre-estimada la sedimentación costera respecto a la erosión en las cuencas hidrográficas.

IV Discusión

La integración de los datos LIDAR permitió construir un modelo digital de elevación con resolución de 5 metros, proporcionando más precisión de los resultados en comparación con otros trabajos realizados anteriormente en Saint John, como es el caso de Radke (1997) y Mkreery (2007). Además, los valores del factor K en formato raster publicados por NOAA (2011) innovan la aplicación del modelo RUSLE-MUSLE en la isla, dado que Radke (1997) y Mkreery (2007) utilizaron un valor uniforme del factor K para cada cuenca. Este factor es de suma importancia debido a que representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado en función de sus características texturales, frecuentemente es estimado con cierta incertidumbre porque al utilizar un valor promedio por polígono se limita espacialmente la ecuación universal de pérdida de suelo.

El análisis estadístico temporal en las cuencas de Lameshur presento diferencias significativas en la concentración de Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K). Mientras que el sodio y el silicio no mostraron diferencias significativas en los dos eventos de tormenta (julio y octubre 2010) analizados. Esta diferencia se podría deber a la diferencia en la precipitación de cada tormenta en particular (180 y 300mm, respectivamente) y el efecto que tiene la dilución de la concentración de estos elementos. Se esperaría que a mayor precipitación se presentara una mayor dilución, reflejándose en la concentración de elementos disueltos en el agua de escorrentía.

Por otra parte, el sodio y el silicio no están siendo reactivos limitantes en las reacciones químicas de la interacción agua- roca, ya que el sodio es el elemento mayor en la geoquímica del basamento y el silicio presenta muy poca actividad en estas reacciones.

En las cuencas norte y sur de Coral Bay el análisis temporal no presento diferencias significativas en la concentración de ninguno de los elementos

disueltos en las muestras de agua de escorrentía entre las dos tormentas analizadas. La concentración de los cationes en los dos eventos de tormenta presentó un comportamiento similar, a excepción del calcio y el magnesio que presentaron diferencias en el patrón de concentración en orden descendente. El sílice no presentó diferencias significativas ni variaciones espacio-temporales debido a su potencial bajo de reacción con las aguas naturales, además de estar presente en la geoquímica del basamento de ambos sitios.

El análisis espacial presentó diferencias significativas en la concentración de calcio entre las cuencas Coral Bay y Lameshur, mientras que para las concentraciones de los demás elementos no se encontraron diferencias significativas. Para una tormenta en particular, el huracán Otto, solamente el calcio se comporta diferente en estas dos cuencas hidrográficas, resultando significativamente mayor en Coral Bay. Esta diferencia podría sugerir un efecto del desarrollo urbano y los caminos no pavimentados en el intemperismo químico, ya que la calcita es el mineral más susceptible a procesos de disolución y el incremento en los iones de calcio pueden ser una señal de que este proceso pueda estar siendo acelerado, ya que en la cuenca Coral Bay, las rocas y sedimentos están más expuestos a la atmósfera y al efecto erosivo del agua de lluvia. Otra fuente importante de calcio en las zonas urbanizadas puede provenir de los materiales del desarrollo urbano, como son el concreto de estructuras, asbesto, pinturas, etc., que pudieran estar disolviendo calcio al contacto con el agua de escorrentía. En cambio los demás elementos mayores se comportaron de manera similar en todas las muestras de agua de escorrentía analizadas correspondientes al huracán Otto entre Coral Bay y Lameshur.

Al analizar el total de los datos, el resultado del análisis estadístico (t student) mostró diferencias significativas en todos los elementos a excepción del silicio, en las cuencas Coral Bay y Lameshur. Esta excepción puede deberse a que además de estar presente en proporciones similares en la geoquímica del basamento, el

silicio presenta poca actividad química en el rango de pH que fluctúan las aguas naturales. A diferencia de los demás elementos, los cuales se caracterizan por ser más movibles en las reacciones químicas de la interacción agua-roca, como son la hidratación, la hidrólisis, y la carboxilación principalmente.

El sodio fue el elementos de mayor concentración en todas las muestras de agua analizadas, lo cual se puede deber a la geoquímica del basamento que se caracteriza por ser mas sódica que potásica, especialmente las rocas keratofiras, pudiendo ser una respuesta a la composición disuelta de las muestras de agua.

La ecuación de balance de masa resultó que el mineral más probable a precipitar en forma de arcillas es la Illita y el mineral más probable a estar en disolución es la calcita consistentemente, productos de alteración de los feldespatos y que están presentes en la geoquímica del basamento de ambos sitios.

El análisis textural reveló que aproximadamente el 80% del suelo está constituido por limos, lo que representa suelos con alta susceptibilidad a la erosión. La energía necesaria para poner en suspensión y transportar el sedimento es mayor para arcillas y arenas. En las arenas porque es un tamaño mayor de grano y es más difícil moverla. En cambio las arcillas aunque son una fracción más fina que los limos, estas partículas tienen una fuerza de cohesión entre ellas que aglomera los granos generando un falso tamaño, lo cual es necesaria una mayor energía para ponerlas en suspensión y transportarlas. El contenido de materia orgánica oscilo entre 3-6%, valores considerados como bajos, la compleja topografía en las cuecas estudiadas no permiten mucha acumulación lateral de materia orgánica.

Las muestras analizadas en el microscopio electrónico de barrido SEM mostraron generalmente las mismas intensidades relativas en los elementos químicos que componen el sedimento, los cuales fueron consistentemente en orden de proporción el Sílice, Aluminio y Magnesio, elementos típicos de las arcillas. Las

imágenes muestran una mayor cantidad de caras frescas en sedimentos provenientes de la cuenca de Coral Bay respecto a las muestras de Lameshur. Lo cual pudiera sugerir que el desarrollo humano sobre la cuenca de Coral Bay tenga un efecto sobre el intemperismo mecánico, debido a que al remover la vegetación existe más interacción agua-roca y el material sedimentario está más expuesto al intemperismo.

Por otra parte, el análisis de difracción de rayos X en Coral Bay mostró una mayor concentración relativa de Illita, producto de alteración química de los feldespatos en ambientes de intemperismo hídrico y alteración hidrotermal. El intemperismo hídrico podría ser atribuido al desarrollo humano. Sin embargo es importante señalar que las alteraciones hidrotermales en la localidad conocida como “Bordeaux Mountain” están siendo intemperizadas y drenadas hacia la cuenca Coral Bay, por lo que esta diferencia en la concentración relativa de Illita entre las dos cuencas pueda ser debido al drenaje de la escorrentía superficial de esta cuenca hidrográfica.

Se ha documentado que la sedimentación costera es la principal causa de estrés y deterioro en los arrecifes de coral de Saint John (Rogers, 1990; Gray et al 2008). Los datos de sedimentación mostraron un decremento en sedimentos terrígenos y materia orgánica respecto a la distancia con la línea de costa, mientras que los sedimentos carbonatados incrementaron respecto a la distancia de la costa. Este comportamiento se puede deber a que los sedimentos terrígenos tienden a depositarse cerca de la costa, de acuerdo a su densidad específica los sedimentos más gruesos son los primeros en depositarse causando un impacto ecológico en la vida marina de Saint John, en especial a los arrecifes coralinos, mientras que los sedimentos más finos se mantienen en suspensión más tiempo sobre la columna de agua, las corrientes marinas pueden transportarlos fuera de la costa, y eventualmente ser depositados en el piso oceánico.

Las tasas de erosión (media anual y huracán Otto) presentaron diferencias espaciales entre las dos localidades, la cuenca Coral Bay se erosiona más por unidad de área. Las tasas de sedimentación en las trampas submarinas apoyaron las tasas de erosión estimadas para el huracán Otto presentando mayor magnitud en la tasa de sedimentación del mes de octubre en comparación a la sedimentación registrada en los meses de julio a noviembre del 2010.

Durante el huracán Otto se calculó una sedimentación promedio de 3150 toneladas en la bahía de Coral Bay, mientras que para su cuenca de drenaje se estimó una erosión total de 1365 toneladas. Una razón de erosión – sedimentación 2.3 veces mayor en la sedimentación registrada en las trampas submarinas. En la bahía de Lameshur se calculó una sedimentación de 1389 toneladas, mientras que para su cuenca de drenaje se estimaron solamente 302 toneladas, una razón de erosión – sedimentación 4.6 veces mayor en la sedimentación registrada en las trampas submarinas. Estas diferencias en la razón erosión – sedimentación entre los dos sitios puede ser debida a que las mayores tasas de erosión en las cuencas fueron depositadas en un área menor. En la cuenca de Coral Bay se estimó una mayor erosión potencial por kilometro cuadrado y el área de la bahía receptora es más pequeña que la bahía de Lameshur. Sin embargo se calculó un promedio general del balance erosión – sedimentación resultando 3 veces mayor la sedimentación costera respecto a la erosión en las cuencas hidrográficas en las cuencas y bahías de Coral Bay y Lameshur.

La sobre- estimación del balance erosión - sedimentación puede ser debida a que el modelo MUSLE calcula la erosión potencial por pixel y no predice la depositación ni trayectoria de los sedimentos, la sedimentación en las bahías no es uniforme existe un decremento en la sedimentación respecto a la distancia con la costa. Además la diferencia en las dimensiones entre las bahías de Coral Bay y Lameshur, así como la diferencia entre las tasas de erosión de las cuencas probablemente esté ejerciendo algún efecto en este balance. La sedimentación en

las trampas submarinas pudiera estar siendo influenciada además por el aporte ocasionado por la re suspensión de sedimentos marinos provocada por oleaje y corrientes marinas. Los resultados Gray et al 2008 y Kolupski (2011) apoyan esta idea, en su análisis de la composición sedimentaria en Coral Bay y Lameshur reportan una importante componente de sedimentos carbonatados, los cuales su principal fuente es marina.

Para una mejor aproximación a los análisis realizados en este trabajo se recomienda utilizar trampas de sedimento submarinas especialmente para tormentas, de tal manera que se pueda tener una mejor resolución en el monitoreo de la sedimentación. La instalación de un flujómetro y un sensor para medir el nivel del cauce para poder calcular la descarga hidráulica, en suspensión y disuelta en un evento de tormenta en particular; además sería útil conocer la descarga para calibrar el modelo de erosión MUSLE y estimar con mayor precisión las tasas de erosión. Por último, la instalación de un muestreador automático de agua de escorrentía para analizar la variación de elementos disueltos y en suspensión durante una tormenta.

V Conclusión

Las tasas de erosión se vieron reflejadas en la concentración de cationes disueltos de las muestras de agua de escorrentía.

Aparentemente el intemperismo químico y mecánico es mayor en Coral Bay en comparación a Lameshur, lo que sugiere que el desarrollo humano puede tener un efecto sobre este proceso.

Las tasas de erosión (media anual y huracán Otto) presentaron diferencias espaciales entre las dos localidades, la cuenca Coral Bay se erosiona mucho más. El valor asignado al factor C juega un papel primordial en las tasas de erosión de las cuencas hidrográficas.

Es notable la importante contribución de la escorrentía causada por el huracán Otto en el registro mensual de sedimentación. El modelo MUSLE refleja también un notable incremento en erosión comparado con la tasa anual debido a la precipitación en este evento.

El balance erosión – sedimentación estima en promedio una razón 3 veces mayor la sedimentación costera respecto a la erosión en las cuencas hidrográficas, considerándose una buena aproximación.

Bibliografía

Acevedo R., Morelock J. and Olivieri. (1989). Modification of coral reef zonation by terrigenous sediment stress. *Palaios* 4: 92-100.

Aparicio Ceja, Martha Eloísa. Caracterización mineralógica y química de la alteración de baja temperatura de rocas volcánicas del neógeno en la provincia volcánica de Puertecitos, noroeste de Baja California. Tesis de Maestro. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 1999.

Anderson DM (1994) Analysis and modeling of erosion hazards and sediment delivery on St. John, U.S. Virgin Islands. Tesis de Maestría en Ciencias. Colorado State University.

Bayliss, P., Erd, R.C., Mrose, M.E., Sabina, A.P., and Smith, D.K. (1986) Mineral powder diffraction file, data book. JCPDS - International Centre, Swarthmore, Pennsylvania.

Bothner et al (2006) Quantity, composition, and source of sediment collected in sediment traps along the fringing coral reef off Molokai, Hawaii. *Marine Pollution Bulletin* 52 (2006) 1034–1047

Brassington R (1998) Field Hydrogeology, 2nd Edition. Ed Wiley. London, England. pp. 248

Campos Aranda, D.F. (1992) Procesos del ciclo hidrológico. Segunda reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí México.

Cosner, O.J., (1972). Water in St. John, U.S. Virgin Islands, U.S. Geological Survey Open-File Report 72-78, 46 p.

Donnelly, et al (1968) Caribbean Geological Investigations. The Geological Society of America, memoir 98.

Erskine WD, Mahmoudzadeh A, Myers C., (2002) Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. *Catena* 49:271–287.

Fabricius K (2005) Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin* 50: 125-146

Fetter C. W. (2001) Applied hydrogeology, 3rd Edition. Ed MacMillan. NY. 681 pp.

Garcia-Luque et al (2003) The behaviour of heavy metals from the Guadalquivir estuary after the Aznalcollar mining spill: Field and laboratory surveys. *Environmental Monitoring Assessment*. 83: 71-88.

Gray et al (2008) Comparison of Sedimentation in Bays and Reefs below Developed versus Undeveloped Watersheds on St. John, US Virgin Islands. 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008 Session number 20.

Hubbard DK, Stump JD, Carter B (1987) Sedimentation and reef development in Hawksnest, Fish and Reef Bays, St. John, U.S. Virgin Islands. Virgin Islands Resource Management Cooperative. Biosphere Reserve Res Rep No 21

Kharaka, Y.; Gunter, W.; Aggarwal, P.; Perkins, E.; Debraal, J. (1989): *Solmineq88: A Computer Program for Geochemical Modelling of Water-Rock Interactions*. U.S. Geological Survey, Menlo Park, California, USA. 420 pp

Kinnell P., (2005) Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrological Process* 19:851–854.

Kirpich, Z. P. (1940) Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10 (6), 362. The original source for the Kirpich equation.

Kolupski M (2011) Sedimentation in coastal bays with coral reefs: Impacts of watershed development, Saint John, USVI. Tesis de Maestría en Ciencias Marinas. University of San Diego.

Lastools (2011). Encontrado en <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>

Lugo-López, M. A.; Sotomayor-Ramírez, D. (1999) K values of soils of U.S. Virgin Islands. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico 2000 Vol. 84 No. 3/4 pp. 185-187.

MacDonald, L.H., D.M. Anderson, and W.E. Dietrich, (1997) Paradise Threatened: Land Use and Erosion on St. John, US Virgin Islands. Environmental Management Vol. 21, No. 6, pp. 851–863

McCreery (2007). "The effect of Anthropogenic Development on Sediment Loading to Bays on St. John, U.S. Virgin Islands, Tesis de Maestria en Ingenieria. Massachusetts Institute of Technology.

Nemeth RS, Nowlis JS (2001) Monitoring the effects of land development on the near-shore reef environment of St. Thomas, USVI. Bulletin of marine science, 69(2): 759-775.

Neitsch, S.L. Arnold, J.G. Kiniry, J.R. Srinivasan, R. Williams J.R., (2005) Soil and Water Assessment Tools, (<http://swatmodel.tamu.edu/documentation>).

NOAA (2011). Valores del factor K RUSLE, Encontrado en el sitio web (http://ccma.nos.noaa.gov/ecosystems/coralreef/summit_sea/summit_sea2.aspx)

Radke, J.D., (1997). Detecting Potential Erosion Threats to the Coastal Zone: St. John, USVI. International Journal of Marine Geodesy, Vol. 20, pp 235-254.

Ramos Scharron CE, (2004). Measuring and predicting erosion and sediment yields on St. John, U.S. Virgin Islands. Dept. of Geosciences, Colorado State University.

Ramos Scharron CE, Mac Donald LH (2005) Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands. Earth Surface Process and Landforms 30: 1283-1304

Ramos Scharron, C.E., MacDonald, L.H., (2006) Runoff and sediment yields from an unpaved road segment. Hydrological Processes 20.

Ramos Pérez (1989) Influence of Bedrock Geochemistry on the Heavy Metal Content of Stream Water, Marine Water, Marine Sediments and Organisms in St. John, USVI. Caribbean Journal of Science, Vol. 25, No. 3-4, 218-227

Rankin, et al (2002). Geology of St. John, U.S. Virgin Islands. U.S. Geological Survey Professional Paper 1631.

Renard, K. G., and J. R. Freimund., (1994) Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of Hydrology 157:287–306.

Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder, coordinators., (1996) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Handbook Number 703. USDA, Washington, D.C., USA.

Rendón Márquez, G. (1995) Técnicas petrográficas para el estudio de rocas y sedimentos en el laboratorio de petrología del CICESE. Informe técnico. Comunicaciones académicas, serie geología, CICESE. 33 pp.

Rizvi H (2008) Geomorphology and Hydrogeology, a handbook. Ed. CBS Publishers and distributors. 371pp.

Rogers C (1990) Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES. Vol. 62: 185-202. 1990.

Ruhm, et al (1998) "The Mass Spectrometry and Ion Chromatography", Science Total Environment, 223, 131-156.

Sadeghi SHR, Singh JK, Das G., (2004) Efficacy of annual soil erosion models for storm-wise sediment prediction: a case study. In Agric Eng J 13:1–1

Smith, S. V., S. H. Bullock, A. Hinojosa-Corona, E. Franco Vizcaíno, M. Escoto Rodríguez, T. G. Kretzschmar, L. M. Farfán, and J. M. Salazar Cesar., (2007) Soil Erosion and Significance for Carbon Fluxes in a Mountainous Mediterranean-Climate Watershed. Ecological Applications 17:1379–1387.

Snider, D. (1972). National engineering handbook; section 4: Hydrology; chapter 16: Hydrographs Natural Resources Conservation Service.

Southeast Regional Climate Center. (2005). Historical climate summaries for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands: Cruz bay, Virgin Islands. Tomados de <http://cirrus.dnr.state.sc.us/cgi-bin/sercc/cliMAIN.pl?vi1980>

Stallard R.F., (1995) Tectonic, environmental, and human aspects of weathering and erosion: A global review using a steady-state perspective. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 23: 11-39.

Tarbuck EJ, Lutgens FK (1999) Una introducción a la geología física. 8va Ed. Prentice Hall. 540p.

Torres, R., Chiappone, M., Geraldés, F., Rodríguez, Y., and Vega, M., (2001) Sedimentation as an important environmental influence on Dominican Republic Reefs: Bulletin of Marine Science, v. 69, no. 2, p. 805-818.

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service), 1972. National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, Section 4, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

USGS (2011) Datos de elevación LIDAR. Encontrados disponibles en (http://ngom.usgs.gov/dsp/mapping/lidar_topographic_mapping.php)

Weber et al (2006) Sedimentation stress in a scleractinian coral exposed to terrestrial and marine sediments with contrasting physical, organic and geochemical properties. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 336 (2006) 18–32

Williams, J. R., (1975) Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull. 11, 965–974.

Williams JR, Berndt HD., (1972) Sediment yield computed with universal equation. J Hydrol Div SCE 98(12): 2087-2098.

Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold., (1985) Simulator for water resources in rural basins. Journal of Hydraulic Engineering 111(6): 970-986.

Wischmeier, W. H. and Smith D. D., (1978) Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. USDA Handbook no. 537, 58p.

Woodbury, R. O. y Weaver, P. L. (1987) The Vegetation of St. John and Hassell Island, U.S. Virgin Islands, US National Park Service, Research and Resources Management Report SER-83, 103 pp.

Wu S, Li J, Huang G., (2005) An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. Environ Model Assess 10:33–42. G.

Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., and Anderson, W. P., (1987) AGNPS, Agricultural Nonpoint Source Pollution Model; A Large Watershed Analysis Tool, Conservation Research Report 35, Agricultural Research Service, U.S.