

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO MODELO SHIA\_LANDSLIDE COMO  
FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE  
ESTABILIDADE DE ENCOSTAS AFETADAS POR  
DESLIZAMENTOS DEFLAGRADOS POR CHUVAS**

**CAROLINA LÓPEZ RENDÓN**

**ORIENTADOR: HERNÁN E. MARTÍNEZ CARVAJAL**  
**CO-ORIENTADOR: EDIER V. ARISTIZÁBAL GIRALDO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-275/16**

**BRASÍLIA /DF, SETEMBRO DE 2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO MODELO SHIA\_LANDSLIDE COMO  
FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE  
ESTABILIDADE DE ENCOSTAS AFETADAS POR  
DESLIZAMENTOS DEFLAGRADOS POR CHUVAS**

**CAROLINA LÓPEZ RENDÓN**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**HERNÁN E. MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc (UNB)  
(ORIENTADOR)**

---

**JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, PhD (UNB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MARIA TÂMARA DE MORAIS G. SILVA, DSc (IFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, setembro de 2016.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LÓPEZ RENDÓN, CAROLINA

Estudo do modelo SHIA\_LandSlide como ferramenta de avaliação probabilística de estabilidade de encostas afetadas por deslizamentos deflagrados por chuvas. [Distrito Federal] 2016

XCIX, 99 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Escorregamentos

2. Ameaça

3. Probabilidade

4. Encostas

I. ENC/FT/

UnB II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPEZ RENDON, C. (2016). Estudo do modelo SHIA\_LandSlide como ferramenta de avaliação probabilística de estabilidade de encostas afetadas por deslizamentos deflagrados por chuvas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-275/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carolina López Rendón

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo do modelo SHIA\_LandSlide como ferramenta de avaliação probabilística de estabilidade de encostas afetadas por deslizamentos deflagrados por chuvas.

GRAU / ANO: Mestre / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Carolina López Rendón  
SCLN 407 bloco A apt. 205  
CEP: 70855-510 Brasília/DF- Brasil

*A mis padres con todo mi amor.*

*A mi padre Juan de Dios López, por enseñarme a perseverar para alcanzar mis sueños y  
a mi madre Emilse Rendón, por inculcarme el amor y el respeto necesarios cada día de mi  
vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiro ao povo Brasileiro, por me acolher e fazer me sentir no meu lar, à Universidade de Brasília e o programa de Pós-Graduação em geotecnia pela oportunidade de alcançar mais um marco na minha carreira, ao professor Hernán Martínez pela sua orientação tanto na dissertação como nas diferentes disciplinas desde há nove anos quando foi meu professor pela primeira vez. Ao corpo docente do programa pelos conhecimentos compartilhados nesses dois anos, ao professor Edier por me ajudar e por ter sempre o tempo para resolver as minhas dúvidas, ao Cristian Herrera por me ajudar tanto no momento que mais precisei e finalmente e muito importante ao CNPq e a Capes pelo apoio financeiro.

Também quero agradecer aos meus colegas de turma Johana, Felipe, Estefanía, Maria Paula, Alex, Tania, Danilo e Yuri, porque embora o mestrado seja meu, sem eles e sua ajuda eu não teria conseguido, agradeço pelos dias e noites de estudo, pelos sábados, domingos e por todos os feriados comendo pizza na sala de créditos estudando elasticidade e plasticidade.

A meus pais e minha família, pelo amor incondicional e o apoio nos momentos difíceis, porque sempre acreditaram em mim, porque são eles o motivo da minha luta diária, amo vocês.

Agradeço também as minhas amigas e colegas de vida que o Brasil deixa para mim, a Johana e a Elizabeth que foram um apoio fundamental nesse processo e as quais quero com todo meu coração. Aos meus meninos dos quais vou ter muita saudade Eduardo, Felipe e Julián, vão ser a escusa para sempre voltar. Ao Alex por todas as piadas e as aulas de francês de graça. À Ledy por me ajudar nesse processo final que foi bem difícil, muito obrigada.

Às pessoas que me acolheram quando cheguei no Brasil sem saber o que fazer, Carolina e Maria Paz também para a Estefanía por toda sua ajuda, muito obrigada.

Em geral são muitas pessoas com as quais vou ficar grata eternamente, pelos concelhos, pelo tempo compartilhado, pelas risadas, pelas cervejas por ter sido parte dessa experiência maravilhosa aos colegas da pós-graduação que já foram embora e os que ainda estão, aos amigos brasileiros, aos amigos colombianos e a todas as pessoas que deixaram alguma impressão em mim.

## RESUMO

O trabalho consistiu na avaliação da ameaça por escorregamentos de terra a nível de bacia usando uma ferramenta que combina um modelo hidrológico completo com um modelo geotécnico probabilístico onde o objetivo final é incorporar essa ferramenta com um radar meteorológico até chegar num sistema de alerta temprana. Para o cálculo da ameaça desde a abordagem probabilística foi empregada a metodologia de confiabilidade ( $\beta^*$ ) embora a função objetivo não foi o fator de segurança, mas sim a altura crítica da água sub-superficial (lençol freático) proveniente da condição crítica da função de fator de segurança ( $FS=1$ ). A análise estatística foi acoplada num modelo hidrológico-geotécnico apresentado por Aristizábal (2013) chamado SHIA\_LandSlide, que envolve um sistema de tanques desenvolvido por Velez (2000), que simulam o ciclo hidrológico desde a caída da chuva até a vazão final do rio, junto com um modelo simples de talude infinito.

A bacia escolhida para a análise foi a do rio “*La Arenosa*” localizada em San Carlos, um povoado perto da cidade de Medellín na Colômbia, onde foi calibrado o modelo determinístico (SHIA\_LandSlide). Isso com o intuito de conhecer a relação no comportamento do modelo probabilístico (SHIA\_LandSlide Probabilístico) com o modelo determinístico (SHIA\_LandSlide).

Depois da análise encontrou-se que em comparação com outros modelos semelhantes a porcentagem de acerto (*Hit Rate*) foi muito boa, com um 82%, 5% maior que o modelo SHIA\_LandSlide, mas na porcentagem de falso alarme o SHIA\_LandSlide Probabilístico apresentou um acréscimo de 20% que é um valor importante, mas levando em consideração que o modelo incorpora as incertezas do solo e os valores muito próximos à falha, o acréscimo do falso alarme já era esperado.

Mas além dos anteriores índices, o modelo apresenta uma terceira faixa de valores que representam as células que depois do evento de chuva ficaram numa condição de estabilidade limite, onde a célula vai ser susceptível a qualquer mudança nas condições do solo, do entorno e também a solicitações externas como são chuvas posteriores, terremotos ou a intervenção antrópica.

## ABSTRACT

This work contains a landslide hazard assessment in a drainage basin level. The assessment was done using a tool that combines a complete hydrological model with a probabilistic geotechnical model. The main objective was to include the tool within a weather radar in order to get an early warning system. Accounting for a probabilistic approach, a reliability methodology ( $\beta^*$ ) was implemented to estimate the landslide hazard. The critical height of the sub-surface water (water table) associated to the critical condition of a safety factor function (S.F. = 1.0) was the objective function, instead of the safety factor itself. The statistical analysis was coupled with a hydrological-geotechnical model called SHIA\_LandSlide, developed by Aristizábal (2013). This model involves a system of tanks developed by Velez (2000) (that simulates the hydrological cycle from precipitation to the final flow in the river) with a simple infinite slope model.

The basin drainage of the *La Arenosa* River, located in San Carlos (a town near Medellin), Colombia, was chosen for the analysis since the deterministic SHIA\_LandSlide model was calibrated to such a basin. The predictions of the model considered in this dissertation, which uses a probabilistic approach, and the predictions of the aforementioned deterministic model were compared. The results indicate that, when compared to similar models, the model of this work approximates very well with the deterministic model, showing a very good Hit Rate (82%) 5% more than similar models with an increase in the false alarm (around 20%) that is high, but with a probabilistic analyses its common to elevate the false alarm rate because all of uncertainties.

## Conteúdo

1-	INTRODUÇÃO .....	1
1.1-	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA .....	1
1.2-	OBJETIVOS DA PESQUISA E ESCOPO .....	2
2-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1-	MOVIMENTOS EM MASSA .....	4
2.2-	OS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	5
2.2.1-	Modelos precipitação-escoamento .....	6
2.2.2-	Esquema de tanques .....	8
2.3-	ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS .....	8
2.3.1-	Modelo do Talude Infinito .....	9
2.4-	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE .....	12
2.5-	MODELOS FÍSICOS .....	14
2.5.1-	Modelos de Avaliação de risco e previsão de escorregamentos deflagrados por chuvas	14
2.6-	MODELO SHIA.....	18
2.7-	DISTRIBUIÇÃO DE CHUVAS BASEADO NO MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY .....	20
3-	SHIA LANDSLIDE PROBABILISTICO .....	23
3.1-	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA ABERTA- SHIA .....	23
3.1.1-	Armazenagem estática (T1) .....	24
3.1.2-	Armazenagem superficial (T2).....	26
3.1.3-	Armazenagem gravitacional (T3).....	28
3.1.4-	Aquífero (T4) .....	30
3.1.5-	Canal (t5).....	30
3.1.6-	Transferência vertical e horizontal da água.....	33
3.2-	MODELO GEOTÉCNICO.....	36
3.2.1-	Análise de confiabilidade .....	38

3.3-	DESCRIPÇÃO DO CÓDIGO .....	40
3.3.1-	Sub-rotinas .....	40
3.3.1-	Interface (janela) principal .....	41
3.4-	AVALIAÇÃO GERAL DO MODELO COM A METODOLOGIA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC).....	43
4-	METODOLOGIA .....	44
4.1-	TORRENTA NA BACIA LA ARENOSA SETEMBRO 21 DE 1990.....	45
4.2-	MÉTODOLÓGIA.....	46
5-	ANÁLISES E RESULTADOS .....	48
5.1-	MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT) .....	48
5.1.1-	Modelo digital de elevação (MDE) .....	48
5.1.2-	Mapa de declividade.....	49
5.1.3-	Mapa de direção de fluxo .....	50
5.1.4-	Mapa de acumulação .....	51
5.2-	PROPRIEDADES DO SOLO .....	52
5.2.1-	Unidades cartográficas dos solos .....	53
5.2.2-	Cobertura.....	55
5.2.3-	Parâmetros geotécnicos .....	57
5.3-	PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E HIDROLÓGICAS .....	58
5.3.1-	Armazenagem estática máxima ( $S_{1max}$ ).....	59
5.3.2-	Armazenagem gravitacional máxima ( $S_{3max}$ ).....	59
5.3.3-	Condutividade hidráulica saturada ( $k_s$ ).....	60
5.3.4-	Condutividade hidráulica saturada do sub-solo ( $k_p$ ).....	60
5.3.5-	Evapotranspiração (Evp) .....	61
5.3.6-	Histórico de chuvas e vazão .....	61
5.4-	VARIAVEIS ESTATÍSTICAS .....	65
5.5-	PARÂMETROS GEOMORFOLÓGICOS E DE CORREÇÃO PARA O MODELO	

5.5.1-	Parâmetros de correção .....	67
5.5.2-	Condições iniciais .....	68
5.6-	PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO GERAL DO MODELO .....	68
5.6.1-	Calibração hidrológica (Aristizábal, 2013) .....	69
5.6.2-	Avaliação do modelo hidrológico .....	73
5.6.3-	Calibração geotécnica .....	75
5.6.4-	Modelo probabilístico .....	81
5.7-	MAPA DE SENSIBILIDADE .....	85
5.8-	MAPA DE AMEAÇA .....	86
5.9-	AVALIAÇÃO GERAL DO MODELO COM A METODOLOGIA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC).....	87
5.10-	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	89
5.10.1-	Análise de sensibilidade ante mudanças nos valores meios .....	89
5.10.2-	Análise de sensibilidade ante mudanças no desvio padrão .....	90
6-	CONCLUSÕES E RECOMENDACÕES.....	91
7-	BIBLIOGRAFIA.....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo geotécnico conceitual proposto. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	10
Figura 2.2 Categorias das incertezas nas propriedades dos solos. (Modificado de Christian & Baecher, 2005). .....	12
Figura 2.3 Confiabilidade associada a diferentes distribuições de probabilidade (Whitman, 1984).....	14
Figura 2.4(a) Localização espacial das estações .....	20
Figura 2.5 Plano de Interpolação.....	21
Figura 3.1 Tanque de armazenagem estática (T1), Tanque de armazenagem superficial (T2), armazenagem gravitacional (T3), aquífero (T4), canal (T5), chuva (R1), excedente (R2), infiltração (R3), Percolação (R4), Escoamento subterrâneo (R5), escoamento superficial (E2), escoamento sub-superficial (E3), f fluxo base (E4), vazão no canal (E5), fluxo para os tanques (D1:4) e evapotranspiração (EVP).(Aristizábal, 2013) .....	24
Figura 3.2 Conteúdo de água no solo e água disponível. Profundidade de raiz ( $Z_r$ ), espessura do solo ( $Z_s$ ), ponto de murcha permanente (wpm), capacidade de campo (wfc), saturação (ws). .....	25
Figura 3.3 Esquema de interconexão entre os tanques usados no SHIA_LANDSLIDE (Modificado de Aristizábal, 2013). .....	35
Figura 3.4 Divisão esquemática das quadriculas celulares de fluxo na bacia (Modificada de Aristizábal, 2013).....	35
Figura 3.5 Susceptibilidade aos deslizamentos de terra em função do ângulo de declividade e à espessura do solo. $\beta_0$ é o máximo ângulo no qual a encosta é estável, $\phi$ é o ângulo de atrito, $Z_{smin}$ é a espessura do solo imune e $Z_{smax}$ é a máxima espessura de solo estável (modificado, Aristizábal, 2013). .....	37
Figura 3.6 Função de distribuição de probabilidade para o cálculo da confiabilidade .....	39
Figura 3.7 Janela Principal do código do modelo .....	42
Figura 3.8. Matriz da análise ROC.....	43
Figura 4.1 Localização do município de San Carlos no estado de Antioquia na Colômbia. ...	44
Figura 4.2 Modelo SHIA_Landslide Probabilístico (Modificado de Aristizábal, 2013).....	47
Figura 5.1 Modelo digital de elevação (MDE) da bacia La Arenosa (Modificado de Aristizábal, 2013).....	49
Figura 5.2 Mapa de declividade da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	50

Figura 5.3 Mapa de direção do fluxo da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013)	51
Figura 5.4 Mapa de acumulação da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013) ...	52
Figura 5.5 Mapa de solos da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	53
Figura 5.6. Mapa de cobertura da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	56
Figura 5.7 Mapa de capacidade máxima de armazenagem estática. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	58
Figura 5.8 Mapa de capacidade máxima de armazenagem estática. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	59
Figura 5.9 Mapa de capacidade máxima de armazenagem gravitacional. (Modificado de Aristizábal, 2013).....	60
Figura 5.10 Potencial de Evapotranspiração calculada. (Modificado de Aristizábal, 2013) ...	62
Figura 5.11 Localização das estações Meteorológicas. (Modificado de Aristizábal, 2013)....	63
Figura 5.12. Chuva horária da estação Calderas entre agosto de 2007 e dezembro de 2012..	63
Figura 5.13 Chuva horária da estação La Arenosa entre agosto de 2007 e dezembro de 2012	64
Figura 5.14 Vazão horária simulada para o rio La Arensa entre agosto de 2007 e dezembro de 2012.....	65
Figura 5.15 Janela principal no programa SHIA_LandSlide Probabilístico .....	66
Figura 5.16 Dados estatísticos de entrada no modelo. ....	66
Figura 5.17 Registro de chuvas na estação Calderas no período de março e maio de 2011 ....	70
Figura 5.18 Registro de chuvas na estação La Arenosa no período de março e maio de 2011	70
Figura 5.19 Resultados usando a abordagem não linear no período de calibração do modelo comparado com a vazão na bacia La Arenosa. ....	71
Figura 5.20 Resultados usando a abordagem linear no período de calibração do modelo comparado com a vazão na bacia La Arensa. ....	71
Figura 5.21 Lençol freático calculado na versão não linear para uma célula tipo encosta (área acumulada de 800m <sup>2</sup> ).....	72
Figura 5.22 Lençol freático calculado na versão linear para uma célula tipo encosta (área acumulada de 800m <sup>2</sup> ) .....	72
Figura 5.23 Registro de chuvas de julho até setembro de 1990 na estação La Arenosa.....	75
Figura 5.24 Vazão simulado com o modelo não linear.....	76
Figura 5.25 Vazão simulado com o modelo linear.....	76
Figura 5.26 Nível do lençol freático simulado com o modelo não linear. ....	77
Figura 5.27 Nível do lençol freático simulado com o modelo linear. ....	77

Figura 5.28 Mapa de Susceptibilidade tormenta setembro de 1990 .....	78
Figura 5.29 Mapa de Ameaça para tormenta setembro de 1990 no modelo não linear .....	79
Figura 5.30 Mapa de Ameaça para tormenta setembro de 1990 no modelo linear .....	80
Figura 5.31 Análise temporal do desempenho do modelo considerando somente as células corretamente classificadas na tormenta de 21 de setembro de 1990.....	81
Figura 5.32. Inventário de deslizamentos. (Modificado de Velásquez & Mejía, 1991) .....	83
Figura 5.33. Histograma de frequência dos valores de confiabilidade para as células do inventário.....	84
Figura 5.34. Histograma de frequência dos valores de confiabilidade para as células potencialmente instáveis .....	84
Figura 5.35. Figura 5.36. Mapa de Confiabilidade Bacia La Arenosa.....	85
Figura 5.37. Representação do espaço ROC .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Resumo da classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978).....	4
Tabela 2.2 coeficientes de variação de diferentes propriedades do solo (Assis <i>et al.</i> , 2004) ...	13
Tabela 2.3 Modelos Físicos comumente usados (Modificado de Aristizábal, 2013) .....	18
Tabela 3.1 Parâmetros geomorfológicos para onda cinemática para a bacia <i>La Arenosa</i> (Tomado de Velez, 2000).....	33
Tabela 5.1 Profundidade e tamanho de partícula do perfil de solo na Associação Yarumal ...	54
Tabela 5.2 Profundidade e tamanho de partícula do perfil de solo na Associação Poblano ..	55
Tabela 5.3 Profundidade de raiz a partir da cobertura do solo.....	56
Tabela 5.5 Parâmetros hidrogeotécnicos empregados. (Tomado de Aristizábal, 2013). .....	61
Tabela 5.6 Fatores de correção usados no modelo.....	67
Tabela 5.7 Condições iniciais (Fonte: Aristizábal, 2013) .....	68
Tabela 5.8 Períodos de Calibração e validação escolhidas. (Aristizábal, 2013).....	69
Tabela 5.9 Resultado Matrix 1 correspondente ao mapa de susceptibilidade.....	77
Tabela 5.10 Resultado Matrix 2 correspondentes ao mapa de ameaça para o modelo linear e não linear.....	79
Tabela 5.11 análise ROC para a bacia <i>La Arenosa</i> na tormenta de 21 de setembro de 1990 empregando o SHIA_Landslide Probabilístico. ....	87
Tabela 5.12. Índices estatísticos para a medição do desempenho do modelo.....	88
Tabela 5.13. Avaliação ROC em diferentes modelos .....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$\alpha$	<i>Coeficiente de descarga do reservorio linear</i>
$\alpha 1$	<i>Constante na escala regional</i>
$\alpha 2$	<i>Constante na escala regional</i>
$\beta$	<i>Confiabilidade clássica baseada no fator de segurança</i>
$\beta$	<i>Ângulo de declividade</i>
$\beta^*$	<i>Confiabilidade baseada na altura crítica</i>
$\beta 0$	<i>Máximo valor de ângulo de inclinação</i>
$\gamma_{sat}$	<i>Peso Específico do Solo Saturado</i>
$\gamma_w$	<i>Peso Específico do solo úmido</i>
$\varepsilon$	<i>Constante na escala regional</i>
$\theta$	<i>Constante na escala regional</i>
$A$	<i>Área de drenagem</i>
$\xi$	<i>Parâmetros associados ao tipo de superfície</i>
$\sigma$	<i>Desvio Padrão</i>
$\sigma[Z]$	<i>Desvio padrão da Z</i>
$\sigma n$	<i>Tensão normal</i>
$\tau$	<i>Tensão de cisalhamento</i>
$\tau f$	<i>Resistência ao cisalhamento da argila</i>
$\varphi$	<i>Ângulo de Atrito</i>
$\varphi$	<i>Constante na escala regional</i>
$A$	<i>Secção transversal do fluxo</i>
$A t$	<i>Secção transversal</i>
$b$	<i>Parâmetro que depende do tipo de solo.</i>
$c$	<i>Coesão</i>
$c'$	<i>Coesão efetiva</i>
$c 1$	<i>Constante na escala regional</i>
$c d$	<i>Constante na escala regional</i>
<b>CENICAFE</b>	<i>Centro Nacional de Investigação de Café</i>
<b>CHASM</b>	<i>Combined Hydrological And Stability Model</i>
$c n$	<i>Constante na escala regional</i>
<b>CORNARE</b>	<i>Corporación Autónoma Regional Rionegro-Nare</i>
$Cos$	<i>Cosseno</i>
$D 1$	<i>Fluxo ao Tanque 1</i>
$D 2$	<i>Fluxo ao Tanque 2</i>
$D 3$	<i>Fluxo ao Tanque 3</i>
$D 4$	<i>Fluxo ao Tanque 4</i>
$D 8$	<i>Algoritmo para assignar direções ao mapa de direção de fluxo</i>
<b>DEM</b>	<i>Modelo digital de elevações</i>
<b>dSLAM</b>	<i>Distributed Shallow LAndslide Model</i>
$d t$	<i>Discretização temporal</i>
$d x$	<i>Tamanho da célula</i>
$E$	<i>Esperaça ou Valor meio</i>
$E[Z]$	<i>Valor médio ou esperança da Z</i>

<i>E1</i>	<i>Saída do Tanque 1 equivalente à Evapotranspiração</i>
<i>e1</i>	<i>Parâmetros associados ao tipo de superfície</i>
<i>E2</i>	<i>Escorrentia superficial</i>
<i>E3</i>	<i>Escoamento sub-superficial</i>
<i>Et al.</i>	<i>Et alii (e autor)</i>
<i>EVP</i>	<i>Potencial de evapotranspiração</i>
<i>FOSM</i>	<i>First Order Second Moment</i>
<i>FS</i>	<i>Fator de segurança</i>
<i>GEOtop</i>	<i>Modelo Hidrológico</i>
<i>GEOtop-FS</i>	<i>Modelo Hidrológico acoplado com modelo de talude infinito</i>
<i>GKW</i>	<i>Geomorphological Kinematic Wave</i>
<i>Há</i>	<i>Hectares</i>
<i>HIDROSIG</i>	<i>Sistema de Informação Geográfica para cálculos Hidrológicos e Climatológicos</i>
<i>IDSSM</i>	<i>Integrated Dynamic Slope Stability Model</i>
<i>IGAC</i>	<i>Instituto Geográfico Agustín Codazzi</i>
<i>INMET</i>	<i>Instituto Nacional de Meteorología</i>
<i>INPE</i>	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Especiais</i>
<i>ISAGEN</i>	<i>Empresa de geração de Energia na Colômbia</i>
<i>It</i>	<i>Total de fluxo de entrada derivado das encostas</i>
<i>k1</i>	<i>Constante na escala regional</i>
<i>K2</i>	<i>Constante para calcular <math>v4</math> dependente de constantes na escala reg.</i>
<i>km</i>	<i>Quilômetros</i>
<i>kp</i>	<i>Permeabilidade do solo</i>
<i>kpp</i>	<i>Fluxo de saída das águas subterrâneas</i>
<i>Ks</i>	<i>Condutividade hidráulica saturada da camada superior do solo</i>
<i>LISA</i>	<i>Level I Stability Analysis</i>
<i>m</i>	<i>Metros</i>
<i>MDE</i>	<i>Modelo digital de elevações</i>
<i>MDT</i>	<i>Modelo digital do terreno</i>
<i>MGB- IPH</i>	<i>Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas</i>
<i>min</i>	<i>Valor mínimo ao escolher</i>
<i>mm</i>	<i>Milímetros</i>
<i>MNT</i>	<i>Modelo Numérico do Terreno</i>
<i>MRI</i>	<i>Maximum Rainfall Intensity</i>
<i>msnm</i>	<i>Metros sobre o nível do mar</i>
<i>n</i>	<i>Coefficiente de Manning</i>
<i>NS</i>	<i>Nash-Sutcliffe efficiency coefficient</i>
<i>ONU</i>	<i>Organização das Nações Unidas</i>
<i>P</i>	<i>Precipitação</i>
<i>POc1</i>	<i>Associação Poblano</i>
<i>PSF</i>	<i>Função de distribuição de probabilidade</i>
<i>Qb</i>	<i>Capacidade máxima do rio</i>
<i>Qobs</i>	<i>Vazão observada ou medida</i>
<i>Qsim</i>	<i>Vazão modelada no tempo t.</i>

<i>R1</i>	<i>Chuva em cada célula</i>
<i>R2</i>	<i>Escoamento Superficial</i>
<i>R3</i>	<i>Infiltração</i>
<i>R4</i>	<i>Percolação</i>
<i>R5</i>	<i>Vazão do Rio</i>
<i>RMSE</i>	<i>Root Mean Square Error (erro quadrático médio)</i>
<i>ROC</i>	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
<i>Rx</i>	<i>Determinante da Matriz e valor de chuva</i>
<i>S</i>	<i>Volume de água no canal final</i>
<i>S1</i>	<i>Volume de Água no Tanque 1 no tempo atual</i>
<i>S1*</i>	<i>Volume de Água no Tanque 1 num passo previo</i>
<i>S1max</i>	<i>Capacidade de armazenagem no Tanque 1</i>
<i>S2</i>	<i>Volume de Água no Tanque 2 no tempo atual</i>
<i>S2*</i>	<i>Volume de Água no Tanque 2 num passo prévio</i>
<i>S3max</i>	<i>Capacidade de armazenagem no Tanque 2</i>
<i>S4</i>	<i>Volume de Água no Tanque 4 no tempo atual</i>
<i>Sec</i>	<i>Secante</i>
<i>SHALSTAB</i>	<i>Modelo Hidrológico geotécnico que emprega TOPOG</i>
<i>SHIA</i>	<i>Sistema Hidrológico Aberto</i>
<i>SHIA</i>	<i>Simulação Hidrológica Aberta</i>
<i>SIG</i>	<i>Sistema de Informação Geográfica</i>
<i>Sin</i>	<i>Seno</i>
<i>SINMAP</i>	<i>Stability Index MAPping</i>
<i>t</i>	<i>Tempo total</i>
<i>T1</i>	<i>Armazenagem estático</i>
<i>T2</i>	<i>Armazenagem Superficial</i>
<i>T3</i>	<i>Armazenagem Gravitacional</i>
<i>T4</i>	<i>Aquífero</i>
<i>T5</i>	<i>Canal</i>
<i>Tan</i>	<i>Tangente</i>
<i>TETIS</i>	<i>Modelo Hidrológico Distribuído de Tanques</i>
<i>TOPMODEL</i>	<i>TOPography-based hydrological MODEL</i>
<i>TOPOG</i>	<i>Modelo Hidrológico baseado nos elementos da topografia</i>
<i>TRIGRS</i>	<i>Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis</i>
<i>u</i>	<i>Porosidade</i>
<i>URH</i>	<i>Unidades de Resposta Hidrológica</i>
<i>US \$</i>	<i>Dólares Americanos</i>
<i>USDA</i>	<i>Departamento de Agricultura dos Estados Unidos</i>
<i>v</i>	<i>Velocidade</i>
<i>v2</i>	<i>Velocidade superficial na encosta</i>
<i>v3</i>	<i>Velocidade do fluxo sub-superficial</i>
<i>v4</i>	<i>Velocidade da Água no Aquífero</i>
<i>vcal</i>	<i>Velocidade obtida</i>
<i>vconv</i>	<i>Velocidade convergente</i>

<i>vinicial</i>	<i>Velocidade inicial</i>
<i>Vt</i>	<i>Velocidade da Água</i>
<i>W</i>	<i>Peso</i>
<i>wb</i>	<i>Constante na escala regional</i>
<i>Wcc</i>	<i>Capacidade de Campo</i>
<i>wfc</i>	<i>Teor de umidade na condição de capacidade de campo</i>
<i>Wpm</i>	<i>Ponto de Murcha</i>
<i>Ws</i>	<i>Ponto de Saturação</i>
<i>wt</i>	<i>Perímetro molhado</i>
<i>X</i>	<i>Coordenada x do plano na triangulação das chuvas</i>
<i>Xx</i>	<i>Coordenada x do plano na triangulação das chuvas num tempo x</i>
<i>Y</i>	<i>Coordenada y do plano na triangulação das chuvas</i>
<i>y</i>	<i>Altura da água</i>
<i>YAe1-YAf2</i>	<i>Associação Yarumal</i>
<i>Yx</i>	<i>Coordenada y do plano na triangulação das chuvas num tempo y</i>
<i>Z</i>	<i>Coordenada z do plano na triangulação das chuvas</i>
<i>Z3</i>	<i>Excedência da água no Tanque 3</i>
<i>Zmin</i>	<i>Espessura mínima</i>
<i>Zr</i>	<i>Altura de Raiz</i>
<i>Zs</i>	<i>Espessura do solo intemperizado</i>
<i>Zw</i>	<i>Altura da água no T3 (lençol freático)</i>
<i>Zwcrit</i>	<i>Altura crítica da água no T3 (lençol freático)</i>
<i>Zx</i>	<i>Coordenada z do plano na triangulação das chuvas num tempo z</i>

# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1- MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Deslizamentos de terra junto com outros fenômenos naturais são a causa de grandes desastres em escala global a cada ano no mundo inteiro e a frequência da sua ocorrência parece estar em ascensão. Uma das principais razões para o aumento observado em deslizamentos de terra é o acréscimo da susceptibilidade da superfície do solo como resultado da super-exploração dos recursos naturais, a desflorestação e maior vulnerabilidade da população exposta, como resultado da crescente urbanização e uso do solo descontrolada. Além disso, áreas tradicionalmente desabitadas como montanhas são cada vez mais utilizadas para fins recreativos e de transporte, empurrando as fronteiras ainda mais em terreno perigoso (Nadim *et al.*, 2006).

Uma grande parte dos deslizamentos é provocada por terremotos, vulcões e precipitação intensa, por isso, os países mais afetados são os tropicais onde as chuvas estão presentes o ano todo, além de outros fenômenos como furacões, etc. Muitos países da América do Sul, ilhas do Caribe e do Pacífico e países do Sudeste Asiático em desenvolvimento são repetidamente expostos a eventos deflagrantes de deslizamentos de terra (Harp *et al.*, 2009)

Os efeitos causados por esses fenômenos geram uma necessidade de conhecer mais sobre eles, é por isso que são estudados com regularidade. Castellanos & González, (1996) disseram que a os eventos naturais, tais como alagamentos, deslizamentos etc., são causados por motivos meteorológicos num 96%; O 56% desses casos é causado por períodos de chuva prolongados, 37% por chuvas intensas de pouca duração e uma minoria pelos furacões.

No Brasil, deslizamentos de terra ocorrem com regularidade ao longo da costa sudeste do país, a maioria associada a tempestades intensas de verão, especialmente nas encostas de montes íngremes envolvidos no solo ao redor da cidade do Rio de Janeiro, onde as favelas proliferaram durante as últimas décadas (Fernandes *et al.*, 2004). Segundo Souza (2004), a população se estabelece em várias regiões próximas às encostas durante o processo de crescimento das grandes cidades, de maneira que essa ocupação desordenada promove a modificação dos aspectos físicos relacionados ao ambiente natural. Novas configurações dos terrenos íngremes são impostas em decorrência da alteração deste meio físico, tornando estas áreas susceptíveis à ocorrência de acidentes geotécnicos durante chuvas intensas. Garcia (2004) estabelece que, caso os problemas em zonas susceptíveis sejam identificados desde o começo, poderia se evitar

90% das perdas. Entre os piores desastres Brasileiros encontra-se os deslizamentos e inundações na região do estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de Janeiro de 2011, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE), em dois dias a estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrou 166 mm de chuva no município de Nova Friburgo, mais de 70% do valor médio histórico para o mês (Azevedo, 2011).

Segundo a ONU, é necessário fortalecer a capacidade técnica e científica para elaborar e aplicar metodologias, estudos e modelos que permitam a avaliação dos fatores de vulnerabilidade diante das ameaças de origem geológica, meteorológica e hidrológica. Ainda nessa linha de ação, uma das prioridades definidas é a identificação, avaliação e monitoramento de sistemas de alerta focados na vida das pessoas (Turra & Queiroz, 2005)

O modelo SHIA\_LandSlide é focado a modelar aquelas chuvas de muita intensidade e pouca duração que deflagram escorregamentos superficiais e que geram perdas económicas e humanas no mundo todo, pretende-se chegar até conformar um sistema de alerta, que com a ajuda de um radar meteorológico possa prever os locais mais susceptíveis. O primeiro intuito foi feito por Aristizábal (2013) com uma análise determinística, esse trabalho pretende dar uma abordagem probabilística para considerar algumas das incertezas presentes na geotecnia, embora existem incertezas impossíveis de conhecer como é a componente antrópica.

Agora com o SHIA\_LandSlide Probabilístico, pretende-se estudar o efeito das incertezas próprias do solo como são as trocas nas propriedades mecânicas do solo (coesão e ângulo de atrito), o peso unitário e a espessura do solo residual para assim conhecer o efeito dessas variações nas análises de estabilidade em escala regional.

## **1.2- OBJETIVOS DA PESQUISA E ESCOPO**

Aplicar e validar o modelo SHIA\_LandSlide como ferramenta na previsão de escorregamentos superficiais e verificar a sua capacidade de previsão para uma condição definida de chuva mediante uma abordagem probabilística.

Para alcançar o objetivo geral, temos os seguintes objetivos específicos.

- Validar o modelo geotécnico probabilístico do SHIA\_LandSlide com o modelo determinístico
- Avaliar os modelos probabilísticos propostos para a incorporação no modelo

- Fazer uma comparação da capacidade de acerto do modelo com modelos propostos na literatura.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- MOVIMENTOS EM MASSA

A definição de movimento em massa proposta por Cruden, (1991) o define como o movimento de um material composto de rocha, solo ou detritos ao longo de uma encosta. De acordo com o autor, há uma gama de eventos que podem ser classificados como movimentos de massa, Azevedo, (2015). Varnes, (1978) propôs uma classificação aceita internacionalmente onde o movimento é classificado segundo o material e o tipo de movimento apresentada na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Resumo da classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978)

Tipo de Movimento	Tipo de Material		
	Rocha	Solos	
		Predominantemente Grosso	Predominantemente Fino
Quedas	Queda de Blocos	Queda de detritos	Queda de Solo
Tombamentos	De Rocha	De Detritos	De Solo
Deslizamentos (Escorregamentos)	Rotacionais de Rocha	Rotacionais de Rocha e Solo	Rotacionais de Solo
	Translacionais de Rocha	Translacionais de Rocha e Solo	Translacionais de Solo
Expansões laterais	De Rocha	De Detritos	De Solo
Fluxos (Escoamentos)	Rastejo de rochas (Creep)	Rastejos e Corridas	
Complexos	Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

Nesta pesquisa serão estudados os escorregamentos translacionais e eventualmente vai se falar de deslizamentos rotacionais de solo que são os que estão intimamente relacionados com a chuva seja esta intensa e curta ou prolongada e regular.

Os movimentos em massa resultam da paulatina mudança imposta por processos naturais como o intemperismo, por atividades antrópicas e pela variação das propriedades mecânicas dos materiais que compõem o talude (Soeters & Van Westen, 1996).

Embora existem muitos tipos de movimentos em massa deflagrados por chuvas nomeados em parágrafos anteriores, entre os mais conhecidos estão os movimentos rotacionais, que são causados por chuvas pouco intensas mas de uma duração prolongada, também estão os deslizamentos superficiais que caracterizam-se por se apresentar em perfis com espessuras variando entre 0,3 e 2,0 m (Anderson & Sitar, 1995) estes movimentos são gerados durante

eventos de chuva de curta duração e alta intensidade, quando ocorre um aumento rápido de poro pressões ou quando é anulada a componente de coesão aparente do solo (Crosta, 1998). É importante saber que não é a chuva só quem causa os movimentos em solos não saturados é em geral a água é o agente que deflagra os deslizamentos e além das chuvas o lançamento de águas servidas nos taludes, ruptura de tubulações entre outros são agentes deflagradores que são quase impossíveis de quantificar.

Segundo Montoya, (2013), no Brasil a principal causa dos escorregamentos é a água, que pode atuar como agente preparatório e deflagrante dos escorregamentos, estes ocorrem em solos saturados e não saturados (Camapun de Carvalho *et al.*, 2012). Em ambas condições a água comanda o processo de instabilização. A redução da coesão aparente (sucção), a saturação do solo (excesso de poro pressão) o avanço da frente úmido e o lençol freático dependem da interação do solo com as condições climáticas.

Com o intuito de apresentar um modelo integral de predição de escorregamentos deflagrados por chuvas que estivesse conformado por um modelo hidrológico completo e que tivesse uma análise geotécnica igualmente completa, Aristizábal, (2013) apresentou o SHIA\_LandSlide, baseado no modelo hidrológico de predição de inundações desenvolvida por Vélez, (2001), e uma análise de talude infinito válido para escorregamentos superficiais deflagrados por chuvas.

O Presente trabalho foi feito como intuito de melhorar a componente geotécnica do modelo com a implementação de uma análise probabilística no módulo geotécnico, já que como é sabido no cálculo do fator de segurança têm-se muitas incertezas que são próprias do solo.

## **2.2- OS MODELOS HIDROLÓGICOS**

Os modelos hidrológicos visam representar a parte do processo hidrológico na terra, transformando as precipitações na bacia, na vazão dos diferentes canais naturais.

No início do período de teorização da hidrologia (década de 30), a análise foi dividida em cada um dos processos para serem estudados isoladamente, precipitação, evapotranspiração, fluxo superficial, fluxo sub-superficial, fluxo subterrâneo e vazão de rios, canais e lagos. A partir da invenção e disseminação de computadores digitais, foi possível integrar todos os componentes do ciclo hidrológico e simular a bacia hidrográfica como um todo, mas esses dados não eram muito confiáveis, porque as bacias eram consideradas homogêneas e só tinham valores meios para cada um dos parâmetros hidrológicos o qual é uma mentira para bacias maiores. Com a chegada dos primeiros modelos simplificados chuva-vazão as bacias foram subdivididas

considerando bacias de tamanhos menores com características homogêneas, mas essa também não foi uma solução, porque esta situação também não era realista, pois o comportamento no balanço vertical (chuva, interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação e umidade do solo) depende do tipo, uso do solo e geologia, enquanto os processos de escoamento (horizontais) dependem da drenagem da área, que é baseado nas condições do relevo. Numa bacia, estes sistemas não são uniformes. Portanto, já no final década de 90, a partir de avanços nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, as informações foram-se apresentando espacialmente distribuídas (e.g. imagens de satélite, mapas de cobertura vegetal e tipos de solos, modelos numéricos do terreno) e técnicas para sua análise começaram a ficar disponíveis, então foram apresentados os modelos distribuídos mais modernos onde são separados e discretizados todos os processos; onde o escoamento e os outros processos são representados por módulos quadrados definidos de acordo com o relevo superficial em toda a bacia, classificada de acordo com o solo, seu uso e geologia, denominado de Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Onde cada URH vai ter um balanço de águas que juntos gerarão o balanço de água de toda a bacia.

Esta linhagem de modelos distribuídos tem crescido em função da facilidade de obter mais informações por geoprocessamento e ferramentas que permitem tratar as bacias com programas computacionais que facilitam a utilização e distribuição dos mesmos para o consumidor final. Nesta classe está o modelo MGB-IPH mais utilizado no Brasil (aplicado em pelo menos 70% da área do país).(Paiva, 2009)

### **2.2.1- Modelos precipitação-escoamento**

Com o surgimento dos primeiros modelos precipitação-escoamento digitalizados, desenvolvidos na década dos anos sessenta, começou-se a contemplar a ideia de ter em conta a variabilidade espacial de algumas características da bacia do rio. Alguns destes modelos tentavam considerar a variabilidade de alguns aspectos, mas só o fez de uma forma muito grosseira ( por exemplo, função modelo de Stanford para bacias de infiltração - Crawford & Linsley, 1966). Anos mais tarde, a variabilidade espacial ganhou muita importância na modelagem das bacias hidrográficas, tendo favorecido assim o desenvolvimento de modelos distribuídos.(Vélez, 2001).

Apresentam-se os diferentes tipos modelos precipitação-escoamento desenvolvidos no tempo descritos por Vélez, 2001.

- **Modelagem convencional (ou agregada) adaptada como modelação distribuída.**

A metodologia convencional para a modelagem foi desenvolvida para eventos de obtenção da vazão em inundações a partir dos dados de precipitação de uma tempestade, sempre considerando magnitudes importantes de eventos isolados (tempestades e inundações).

Os modelos conceituais agregados são referidos a aqueles modelos que tem interesse na resposta hidrológica da bacia ou da sub-bacia como um todo e se apoiam na representação conceitual da mesma. Geralmente os modelos conceituais agregados estão compostos por dois submodelos complementares: O submodelo de produção de fluxo e o submodelo de transferência do mesmo.

- **Incorporação da estrutura espacial da bacia à rede de drenagem na modelagem**

Têm-se alguns modelos conceituais que embora não tenham sido planteados explicitamente como modelos distribuídos na sua concepção original, tratam de considerar a estrutura da bacia e a rede de drenagem.

Com essas características temos uma grande variedade de modelos e teorias que incluem modelos que levam em consideração a forma da bacia ou da rede de drenagem para configurar o hidrograma unitário, até modelos que subdividem a bacia em muitos elementos para considerar as propriedades dos mesmos e o comportamento de alguns componentes da resposta hidrológica, como o caso do TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)

- **Modelagem distribuída**

Os modelos distribuídos são divididos em modelos conceituais-distribuídos, ou semi-distribuídos que consideram uma representação conceitual da bacia, a maioria dos modelos representam um conjunto de elementos como a capacidade de armazenar e transportar à água, dividindo a bacia em elementos muito pequenos, e para cada um deles calculasse um fluxo que se produz para cada período de tempo.

Finalmente os modelos distribuídos de embasamento físico, são modelos desenvolvidos por vários autores para como eles chamam “representar a física” da fase terrestre do ciclo hidrológico e dão conta do fluxo da água desde seu ingresso à superfície do solo até sua saída da bacia. Assim, para cada um dos elementos em que a bacia é dividida, intenta-se representar o fluxo da água mediante equações de conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e conservação de energia e algumas relações empíricas obtidas de medições diretas

sejam de laboratório o de campo. Essas equações são acopladas para definir a quantidade de água que cada elemento vai transferir para sua vizinhança (horizontal ou verticalmente) num intervalo de tempo.

### **2.2.2- Esquema de tanques**

A maioria dos modelos de simulação continua consideram um ou vários tanques para representar o armazenamento de água no solo. Um dos tanques representa o armazenamento estático do solo, e baseado no déficit do tanque é estimado a parte da chuva que se infiltra a esse armazenamento capilar. (Dawdy & O'Donnell, 1965). Nesses modelos o armazenamento capilar é atualizado com a chuva que ingressa e com a evapotranspiração durante as secas.

As interações entre os tanques são determinadas pelas relações funcionais estabelecidas pelo autor, assim, cada modelo precipitação-escoamento inclui um procedimento para a representação do armazenamento da água no solo.

## **2.3- ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS**

Na engenharia geotécnica existem duas abordagens para a estabilidade de taludes, a abordagem determinística e a probabilística.

Deterministicamente, a estabilidade de um talude ou de uma obra de engenharia qualquer é dada por um valor de fator de segurança, dito fator pode ser calculado por várias metodologias com parâmetros definidos para cada tipo de solo, mas homogeneizar o solo é uma análise grosseira devido ao caráter heterogêneo do mesmo e por suas variâncias na escala tanto espacial quanto temporal. Assim é importante considerar a maior quantidade de incertezas possível, para fazer uma análise probabilística, onde se obtenha um fator de segurança associado a uma probabilidade de ocorrência.

Segundo Montoya, (2013), vários métodos para o cálculo da estabilidade de taludes aparecem na literatura, Bishop (1955), Morgenster & Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973) entre outros. Mas existe pouca pesquisa ao respeito do zoneamento de estabilidade de taludes, devido às dificuldades no processamento de dados espaciais tais como declividade, elevação etc. É por isso que vários autores como Rahardjo *et al.*, (1995), Fourier *et al.*, (1999), Cho & Lee, (2002), Cho & Lee, (2002), utilizam na previsão de escorregamentos de taludes o modelo simplificado do talude infinito (Figura 2.1), que inclui variáveis do solo que são estáticas no tempo (Coesão,

ângulo de atrito, peso específico, declividade do talude e a altura do mesmo), e adota a envoltória de falha proposta por Fredlund *et al.*, (1978) para solos não saturados.

### 2.3.1- Modelo do Talude Infinito

O termo de talude infinito representa um declive uniforme numa extensão suficientemente comprida para que um elemento típico possa representar a encosta toda, assim que as irregularidades tanto no pé quanto na crista possam ser desprezadas. Igualmente as propriedades do solo e a poropressão em qualquer faixa são assumidas constantes.

A análise de estabilidade unidimensional de talude infinito é a abordagem mais comum para modelar a estabilidade de encostas dentro de bacia em escala sub-regional e regional. A análise assume que a superfície de deslizamento é paralela à superfície do solo e coincidente com o substrato impermeável. (Aristizábal, 2013). O solo vai estar sujeito a duas forças opostas, primeiro o componente do peso próprio que vai atuar como agente deslocado ao longo da encosta e o segundo é a resistência ao cisalhamento do solo. A relação entre as duas é chamada fator de segurança que é definido como:

$$FS = \frac{\text{Forças} \cdot \text{resistentes}}{\text{Forças} \cdot \text{atuantes}} \quad (2.1)$$

A continuação é apresentado o esquema do modelo simplificado de talude infinito na Figura 2.1 onde são obtidas as forças resistentes e atuantes descrevidas acima.

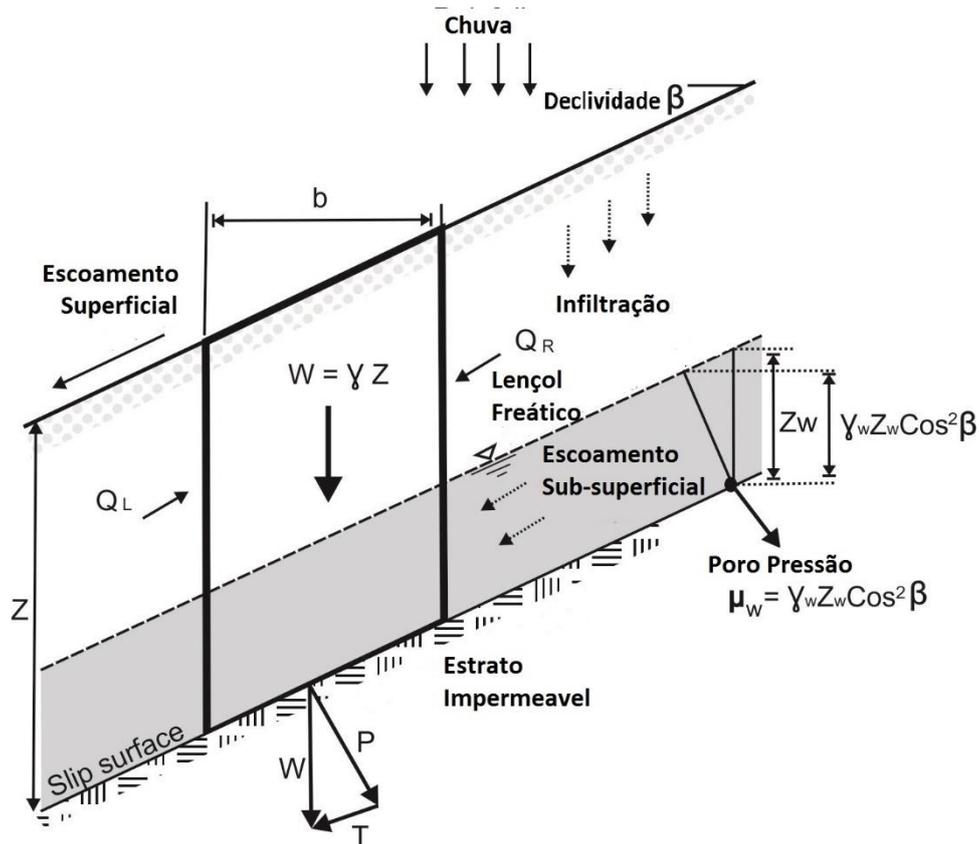


Figura 2.1 Modelo geotécnico conceitual proposto. (Modificado de Aristizábal, 2013)

As forças laterais para qualquer fatia vertical são iguais e opostas, e as condições de tensão são as mesmas em qualquer ponto da superfície da falha.

Tipicamente, quanto maior for a poro pressão, menor será a resistência ao cisalhamento; adicionalmente, o aumento do conteúdo de água no solo também aumenta o seu peso específico.

Figura 2.1

O equilíbrio da seção longitudinal do solo em sentido vertical a partir das forças verticais na base da fatia pode ser igual ao peso ( $W$ ). Isto pode ser resolvido com as componentes normal  $P$  e tangencial  $T$  respectivamente.

$$W = \gamma b Z \quad (2.2)$$

$$P = \gamma b Z \cos \beta \quad (2.3)$$

$$T = \gamma b Z \sin \beta \quad (2.4)$$

Onde  $\gamma$  é o peso específico do solo,  $b$  é o comprimento da fatia,  $Z$  a espessura do solo intemperizado e  $\beta$  é o ângulo de declividade.

O comprimento da superfície de deslizamento é  $b \sec \alpha$  e as tensões normais e de cisalhamento média produzido por  $P$  e  $T$  são:

$$\sigma_n = \gamma Z \cos^2 \beta \quad (2.5)$$

$$\tau = \gamma Z \sin \beta \cos \beta \quad (2.6)$$

Onde  $\sigma_n$  é tensão normal e  $\tau$  é a tensão cisalhante.

A resistência ao cisalhamento do solo ao longo do plano potencial de falha é dada pelo critério de ruptura Mohr-Coulomb e a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), não deve exceder a resistência ao cisalhamento ( $\tau_f$ ) do solo.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.7)$$

O fator de segurança na encosta pode ser definido em termos de tensões efetivas como  $\frac{\tau_f}{\tau'}$ , assim:

$$FS = \frac{c' + (\gamma Z \cos^2 \beta - u) \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad (2.8)$$

Onde  $c'$  é a coesão efetiva,  $u$  é a poro pressão e  $\phi$  é o ângulo de atrito do material.

Quando a encosta é submetida a um aumento da poro pressão devido à infiltração ou lençol freático empoleirado em ascensão, o esforço total e forças de cisalhamento permanecem essencialmente constantes, mas tensões efetivas diminuem. O princípio do esforço efetivo estabelece que o esforço total aplicado para o solo é suportado pela soma do esforço efetivo entre as partículas e a poro pressão neutra (Graham, 1984)

De acordo com Graham (1984) nas encostas naturais com fluxo subterrâneo constante paralelo à inclinação, e o lençol freático acima da superfície de deslizamento  $Z_w$ , a poro pressão é  $u = \gamma_w Z_w \cos^2 \beta$  e conseqüentemente,

$$FS = \frac{c' + (\gamma Z - \gamma_w Z_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad (2.9)$$

## 2.4- ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A confiabilidade é definida como a possibilidade que tem um sistema para executar as funções para as quais foi concebido ou em outras palavras a relação entre os carregamentos que um sistema pode sofrer e capacidade do mesmo para suporta-las, em geotecnia tanto umas quanto as outras são incertas o que faz o resultado ser incerto.

Conhecemos as incertezas como a falta de conhecimento a priori de um resultado ou do efeito de uma condição, em geotecnia as incertezas envolvidas na estimativa das propriedades do solo são bem conhecidas pelos engenheiros, aspectos simples como as condições de contorno incluindo a geometria, carregamentos, os níveis das águas subterrâneas, infiltração etc. Essas incertezas são associadas a erros que podem ser aleatórios (randômicos) ou sistemáticos. Na Figura 2.2 apresenta-se os tipos de incertezas associadas ao solo.

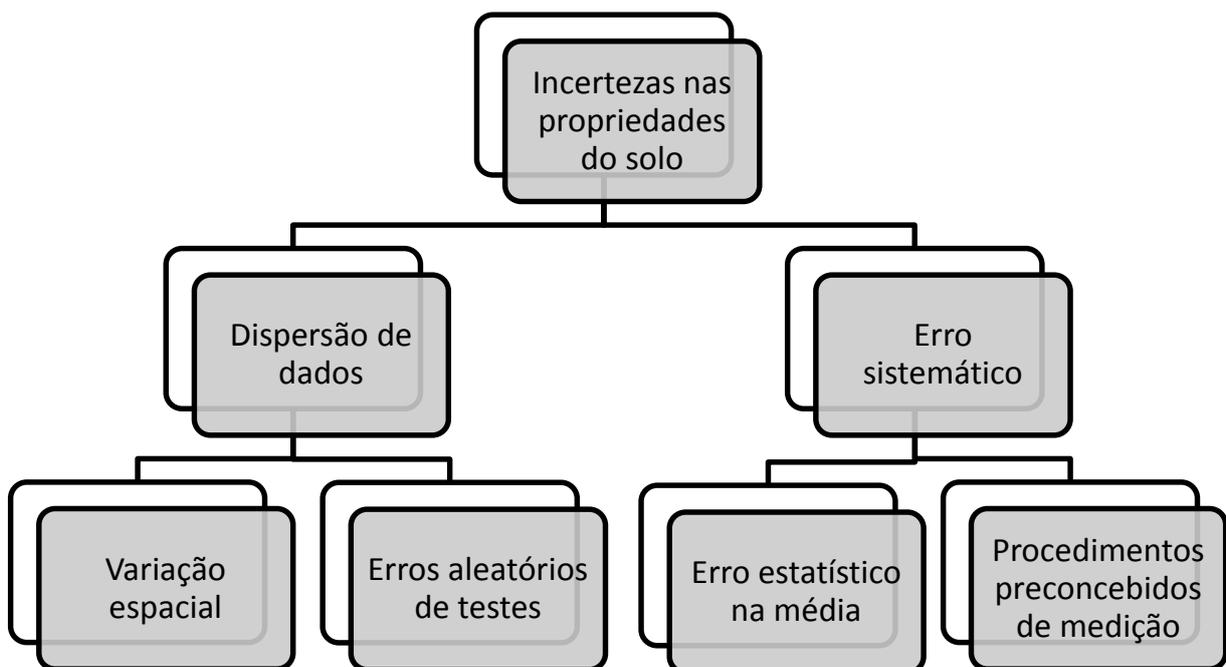


Figura 2.2 Categorias das incertezas nas propriedades dos solos. (Modificado de Christian & Baecher, 2005).

Essa variabilidade descrita anteriormente tem sido estudada por muito tempo e por muitos autores que os estudaram e determinaram valores de desvio padrão e coeficientes de variação para muitos tipos de solo de diferentes origens (Solos “*in situ*” ou transportados). Valores típicos de coeficientes de variação para algumas propriedades são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 coeficientes de variação de diferentes propriedades do solo (Assis *et al.*, 2004)

<b>Parâmetro</b>	<b>Faixa de Coeficiente de Variação</b>	<b>Valor Escolhido</b>
<b>Peso Específico</b>	02-08	03
<b>Coesão</b>	20-80	40
<b>Ângulo de atrito</b>	04-20	10
<b>Coesão não-drenada</b>	20-50	30

No entanto, na hora de fazer um projeto é importante avaliar a probabilidade que a solicitação exceda a demanda quando as duas têm incertezas associadas e é essa análise é chamada confiabilidade ( $\beta$ ) que é também associada à probabilidade de ruptura. (Whitman, 2000)

$$\beta = 1 - \text{probabilidade de ruptura} \quad (2.10)$$

A confiabilidade fornece um meio para avaliar os efeitos combinados das incertezas e distinguir quando essas incertezas são particularmente altas ou baixas. Apesar do fato de fornecer um valor potencial, a teoria da confiabilidade não é muito usada na cotidianidade da engenharia. Primeiro, a maioria dos engenheiros não estão familiarizados com ela e segundo, é comum pensar que para usar a teoria de confiabilidade é preciso dispor de maior quantidade de informação, tempo e esforço das que estão disponíveis comumente (Duncan, 2000).

Duncan (2000) ressalta o equívoco de pensar que adotando a teoria de confiabilidade, tem que se abandonar a análise de fator de segurança, pelo contrário é sugerido que sejam usados juntos como medidas complementares em qualquer projeto, é certo que implementar a análise de confiabilidade gera um esforço a mais, mas vai ser recompensado com o melhoramento dos resultados. O índice de confiabilidade associado ao fator de segurança (FS) é dado pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma(FS)} \quad (2.11)$$

A equação de fator de segurança Eq.2.2 é considerada a função objetivo, e para conhecer seu valor esperado, simplesmente calcula-se com os valores meios de cada uma de suas variáveis independentes ( $c, \phi, \gamma$ ), e seu desvio padrão é calculado com a ajuda do método FOSM (First

Order Second Moment) e assim com uma distribuição de probabilidade normal tem-se gráficos do tipo:

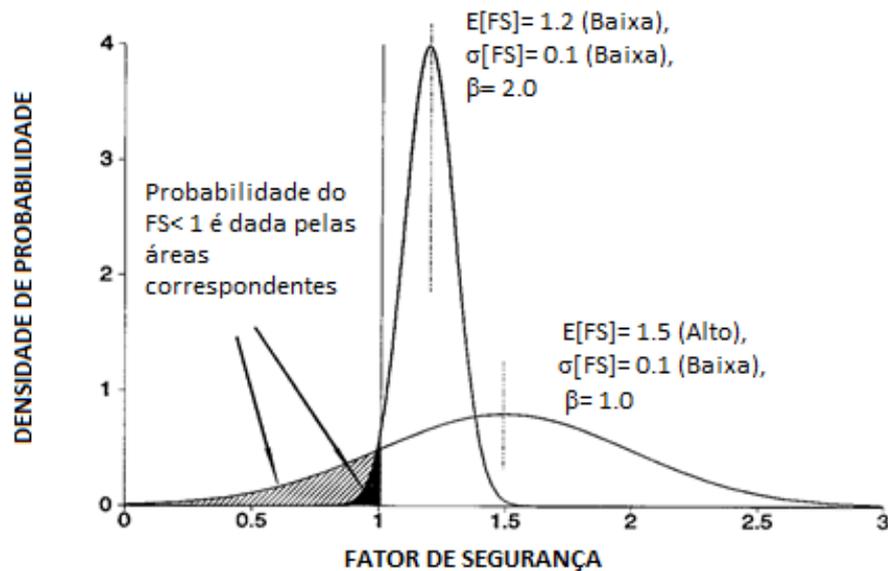


Figura 2.3 Confiabilidade associada a diferentes distribuições de probabilidade (Whitman, 1984)

O método FOSM é um truncamento da função da expansão da série de Taylor. As entradas e saídas desse método são expressas por desvios padrão e valores esperados com o intuito de encontrar a função de distribuição de probabilidade que se acoplar à função. (Assis *et al.*, 2004)

## 2.5- MODELOS FÍSICOS

### 2.5.1- Modelos de Avaliação de risco e predição de escorregamentos deflagrados por chuvas

As metodologias de avaliação de risco e ameaças são divididas basicamente em três (Varnes, 1984):

- Métodos Heurísticos: baseados no conhecimento “a priori” de todas as causas e os fatores de instabilidade na área de pesquisa.
- Métodos Estatísticos: baseados na relação funcional entre os fatores de instabilidade e a distribuição no passado e no presente dos escorregamentos.
- Métodos de baseamento físicos: baseados no entendimento da física das leis principais que controlam a instabilidade e a aplicação do modelo matemático que é expressado num fator de segurança

De acordo com Aristizábal, (2013), os modelos físicos geralmente explicam a ocorrência do deslizamento misturando uma análise geotécnica que é expressa em termos de um limiar de poro-pressão com uma análise hidrológica que toma uma determinada chuva e a distribui para representar a quantidade e a direção da água no solo para saber quando vai gerar essa poro-pressão limiar para deflagrar o escorregamento.

Os modelos geotécnicos de escorregamentos deflagrados por chuvas têm diversas abordagens e diferentes métodos para serem calculados, na maioria dos casos temos uma declividade constante, um comprimento infinito e é assumida que a superfície de falha ou ruptura é paralela a nomeada declividade, e que o comprimento da falha é muito maior do que a espessura da massa deslocada (Borga *et al.*, 2002), e um fator de segurança calculado em termos de esforço efetivo que é a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e o esforço cortante da massa de solo que vai-se movimentar. (Brunsden & Prior, 1984).

Embora a maioria dos modelos estejam baseados na análise de talude infinito, estes diferem na forma como a poro-pressão é calculada. Têm-se modelos físicos como o SINMAP(Pack *et al.*, 1998); SHALSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994); LISA (Hammond *et al.*, 1992), que assumem um estado estático, com fluxo saturado paralelo à encosta que segue a lei de Darcy para a estimação distribuição espacial da poro-pressão, com exceção do modelo LISA que requer a profundidade do lençol freático.

Um dos modelos físicos mais reconhecidos é o proposto por Montgomery & Dietrich, (1994), chamado SHALSTAB, o modelo emprega o modelo hidrológico TOPOG (O'Loughlin, 1986) para a estimação da posição do lençol freático ou a altura da porção saturada do perfil, que assume que o controle da distribuição espacial dos escorregamentos de terra é dada pela topografia que define o ângulo de declividade e as áreas de convergência dos escorregamentos. É definido um índice para a análise da saturação do solo que é usado para a predição do lençol freático em termos do fluxo de água no solo e a intensidade da chuva. A análise de estabilidade feita usa o critério de Mohr-Coulomb, que em termos de simplicidade zera a coesão.

Alguns pesquisadores têm mostrado que os escorregamentos de terra rasos são controlados rigidamente pela superfície topográfica, que afeta a convergência do fluxo sub-superficial, acrescentando a saturação do solo e reduzindo a resistência ao cisalhamento do mesmo. (Guimaraes *et al.*,(2003); Pellenq *et al.*, (2003); Rosso *et al.*, (2006);Fernandes *et al.*, 2004).

O método do SINMAP é um modelo com a capacidade para a predição do potencial de estabilidade que é numericamente similar ao SHALTAB, os dois usam a mesma equação de fator de segurança e a lei de Darcy para o fluxo saturado, a diferença é que o SHALTAB ignora a coesão e o SINMAP não. (Morrissey *et al.*, 2004)

O LISA (*Level I Stability Analysis*) foi desenvolvido pelo departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), para solos com uma topografia e uma geologia similar. LISA tem uma análise probabilística baseado no conceito de fator de segurança, considerando o peso das árvores e a profundidade do solo saturado. Os valores para cada parâmetro na equação são definidos por uma função de distribuição de probabilidade (PSF) e os resultados são apresentados num histograma, fornecendo a distribuição do fator de segurança calculado, usando o método de Monte Carlo.

Um dos primeiros métodos conhecidos foi o *distributed Shallow Landslide Model* (dSLAM), desenvolvido por Wu & Sidle, (1995), e posteriormente modificado como *Integrated Dynamic Slope Stability Model* (IDSSM) por Dhakal & Sidle, (2004) O dSLAM é um modelo físico dinâmico e distribuído de estabilidade, que usa uma análise de estabilidade de talude infinito combinado com uma superfície paralela e uma superfície saturada com uma abordagem de modelação de onda cinemática (Takasao & Shiiba, 1988) e um modelo dinâmico contínuo de resistência de raiz da vegetação do local. O modelo assume que a capacidade de infiltração do solo é sempre maior que a intensidade da chuva, assim só pode ocorrer fluxo subsuperficial e escoamento superficial não Hortoniano. O modelo utiliza hietogramas de chuvas horarias que simulam os eventos individuais ou longas sequências de precipitações aleatórias para simulações ao longo prazo.

Simoni *et al.*, (2010), proporem um modelo de simulação de chuva induzida deflagradora de escorregamentos superficiais ou rasos chamado GEOtop-FS. O modelo combina uma análise de talude infinito com um modelo hidrológico distribuído, GEOtop (Bertoldi & Rigon, 2004) que é um modelo em diferenças finitas espacialmente distribuído. O GEOtop simula o escoamento superficial da água e a distribuição da umidade ou o avance da frente úmida, resolvendo numericamente a equação de Richard num baseamento físico 3D. O GEOtop simula o conteúdo de umidade e a evolução da poro-pressão resultado da infiltração e modelos de escoamento sub-superficial de fluxo saturado e não saturado, escoamento superficial, vazão no canal e fluxos turbulentos transversais à superfície do solo. As células da bacia são divididas em células de encosta e células tipo canal. O escoamento superficial nas encostas é representado

como uma sucessão de movimentos uniformizados e o fluxo sub-superficial são baseados na lei de Darcy. Nos dois casos a conectividade das células é definida pelo esquema D8, com oito direções de drenagem. A movimentação nos canais é baseada na solução parabólica das equações de *Saint Venant*. O fator de segurança é calculado com uma aproximação probabilística com o intuito de conhecer a probabilidade de ruptura, os parâmetros do solo são assignados distributivamente em vez de valores determinísticos individuais.

CHASM, (*Combined Hydrological An dStability Model*) Modelo combinado de hidrologia e estabilidade, é um modelo físico de dois dimensões que combina solo-hidrologia-Estabilidade de talude que permite a simulação das mudanças na poro-pressão como resposta aos eventos individuais de chuva (Anderson & Lloyd, (1991);Wilkinson, *et al.* (2000)). O procedimento adotado pelo modelo para o sistema hidrológico é um sistema de diferenças finitas explícito. A encosta é dividida em células regulais. O modelo hidrológico simula o fluxo ao longo e a través da encosta discreteada pela movimentação da água nas células adjacentes. O fluxo vertical a traves de cada coluna dentro da zona não saturada é calculado com a equação de Richard e para fluxo saturado é utilizada a lei de Darcy. A técnica de avaliação da estabilidade empregada no modelo é o método circular de Bishop (Bishop, 1955). Em cada passo de tempo da simulação as poro pressões negativas quanto positivas são incorporadas diretamente na determinação do esforço efetivo da equação para resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb. Na porção não saturada é utilizado o critério de Fredlund *et al.*, (1978).

Baum *et al.*, (2008) desenvolveram um programa em Fortran chamado TRIGRS baseado num modelo de fluxo unidimensional transiente vertical (Infiltração) com um modelo simples de estabilidade de encostas, de acordo com os critérios de Iverson, (2000), assumindo condições saturadas ou muito próximas à saturação. O modelo é muito sensível as condições iniciais, especialmente com a componente de armazenagem estática e a posição inicial no lençol freático. O modelo tem sido usado e modificado ao longo do tempo.

A maior desvantagem dos modelos de talude infinito é que não tem em conta o esforço produzido pelo fluxo superficial e a topografia em diferentes direções perpendiculares à encosta. Alguns estudos têm mostrado que os desvios desde o fluxo paralelo às encostas, especialmente em solos significativamente profundos afetam a resistência ao cisalhamento dos solos (Borga *et al.*, 2002). Crosta & Dal Negro, (2003) encontraram que além da infiltração a convergência da água sub-superficial na direção longitudinal é também importante e esses

efeitos são piores nas áreas côncavas, onde os fluxos laterais são concentrados. Na Tabela 2.3 são apresentados os principais modelos físicos desenvolvidos ao longo dos anos.

**Tabela 2.3 Modelos Físicos comumente usados (Modificado de Aristizábal, 2013)**

<b>MODELO</b>	<b>HIDROLOGICO</b>	<b>GEOTÉCNICO (ESTABILIDADE)</b>	<b>DIM.</b>
SHASLTAB	Estado estático- TOPOG(O’Loughlin, 1986)	Modelo de talude infinito em condições saturadas	3D
dSLAM	Onda cinemática das águas subterrâneas	Modelo de talude infinito em condições saturadas	3D
CHASM	Esquema de diferenças finitas usando as equações de Richards para fluxo vertical & as equações de Darcy para fluxo lateral.	Método de Bishop simplificado circular em condições não saturadas	2D
Pradel&Raad	Infiltração vertical transiente- Green &Ampt	Modelo de talude infinito em condições não saturadas	1D
GEOtop-FS	Esquema de diferenças finitas usando-as equações de Richards para fluxo vertical e as equações de Darcy para fluxo lateral. GEOtop (Bertoldi & Rigon, 2004)	Modelo de talude infinito em condições saturadas	3D
TRIGRS	Infiltração vertical transiente- (Iverson, 2000)& Esquema do roteamento simples do escoamento de fluxo.	Modelo de talude infinito em condições saturadas	3D

## **2.6- MODELO SHIA**

O modelo chamado Simulação Hidrológica Aberta e Distribuída (em espanhol “*Simulación Hidrológica Abierta*” - SHIA) foi desenvolvido por Vélez (2001) com o intuito de realizar o balanço hidrológico em bacias de escala regional e sub-regional usando uma combinação de métodos analíticos (formulação de balanço hidrológico clássico) distribuídos espacialmente para serem usados em plataformas SIG de fácil interação com o usuário. O sistema está formado

por duas componentes fundamentais: a primeira fornece o balanço entrada/saída de água mediante simulação (analítica) dos processos hidrológicos dominantes na bacia; a segunda componente, chamada de roteamento, está encarregada de simular o fluxo da água através da rede de drenagem da bacia obtida diretamente do MNT (Modelo Numérico do Terreno) utilizando relações semi-empíricas. Inicialmente, a superfície do terreno, o subsolo e os fluxos de base (posição inicial do lençol freático) são discretizados por uma malha 3D de tanques ligados que drenam ou recebem água de células adjacentes (a jusante ou montante) segundo instruções de fluxo (roteamento) até que atinja a rede de canais (mediante fluxo superficial ou subterrâneo).

O modelo foi ajustado às necessidades e especificações para deslizamentos deflagrados por chuvas em ambientes tropicais. Uma revisão detalhada do modelo SHIA será feita no Capítulo 3, onde se explica o funcionamento do mesmo. Uma descrição mais detalhada do fundamento teórico do modelo hidrológico pode ser encontrada em Vélez, (2001); Vélez *et al.*, (2004); Francés *et al.*, (2007).

Como resumo geral, SHIA\_Landslide é um modelo que calcula as mudanças de poro pressão positivas e alterações concomitantes no fator de segurança como resposta à infiltração das chuvas usando um módulo hidrológico acoplado com um modelo geotécnico de talude infinito.

O modelo é composto por um módulo hidrológico que analisa a infiltração da chuva em condições saturadas e um módulo geotécnico que parte de um método de equilíbrio limite para avaliar a estabilidade de uma encosta. O modelo requer de uma chuva de entrada que ocasiona o aumento do nível do lençol freático e conseqüentemente o acréscimo da poro pressão levando a encosta a condições de instabilidade.

O modelo concentra a atenção do processo hidrológico no controle topográfico, nos processos de escoamento na encosta, no efeito da infiltração da água na resistência do solo e a estabilidade de taludes.

O módulo hidrológico, calcula a altura do lençol freático que é um dato de entrada para a análise de estabilidade e posteriormente a análise de confiabilidade que pretendesse adicionar com o presente trabalho (Ver figura Figura 4.2), como intuito de chegar até aplicar o modelo numa bacia semi-urbanizada e posteriormente poder implementar num sistema de alerta para qualquer cidade.

## 2.7- DISTRIBUIÇÃO DE CHUVAS BASEADO NO MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY

É um método desenvolvido por Velásquez *et al.*, (2011) com o intuito de apresentar a distribuição espacial da chuva que as vezes é muito difícil de medir diretamente pela falta de equipamento especializado tais como radares; essa distribuição da chuva é muito importante porque é um dos dados de entrada para os modelos hidrológicos distribuídos.

Apesar de não ter um equipamento capaz de medir a distribuição da chuva em toda a bacia, em muitos locais, podem-se encontrar estações pluviométricas com uma ótima resolução temporal (até 10 min), assim, pode-se inferir a variabilidade temporal da tormenta e pode-se partir de um ponto para a estimação da variabilidade espacial. O método estudado foi desenvolvido para regiões tropicais com topografias muito complexas, como a de San Carlos, onde, as chuvas têm pouca duração, o que representa uma grande variabilidade, e devido a essa variabilidade tanto espacial quanto temporal é preciso contar com um método de interpolação muito rápido.

Para a definição dos planos através dos quais a interpolação é feita, tem-se usado a triangulação de Delaunay, que garante a triangulação de modo que sejam unidos os pontos mais próximos. O algoritmo usado é o algoritmo de incremento proposto por Watson (1980). Este algoritmo foi escolhido porque permite a remoção e inserção de pontos na triangulação sem ter que alterar todo o cálculo da rede, sendo computacionalmente rápido. Além disso, a programação é relativamente fácil em comparação com outros algoritmos. A partir das estações apresentadas na Figura 2.4 (a), é obtido a triangulação apresentado na Figura 2.5 (b).

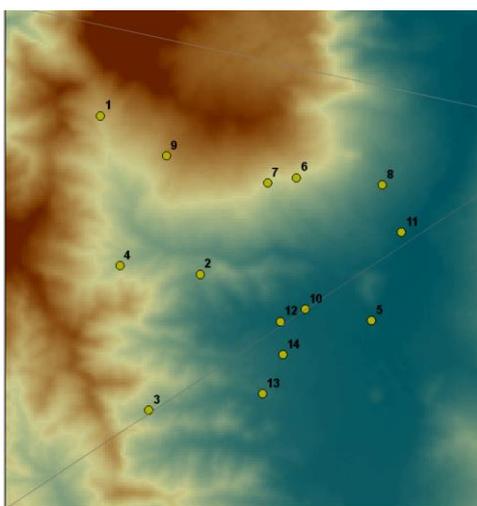


Figura 2.4(a) Localização espacial das estações

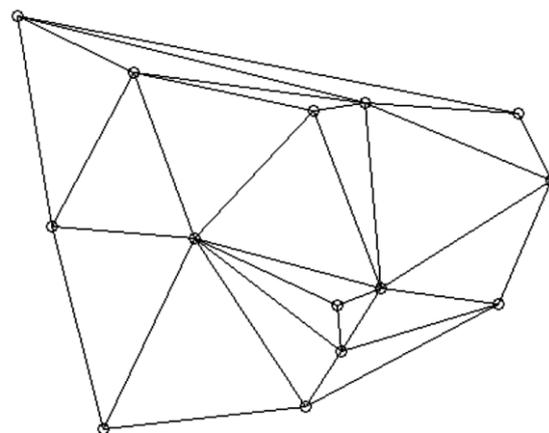
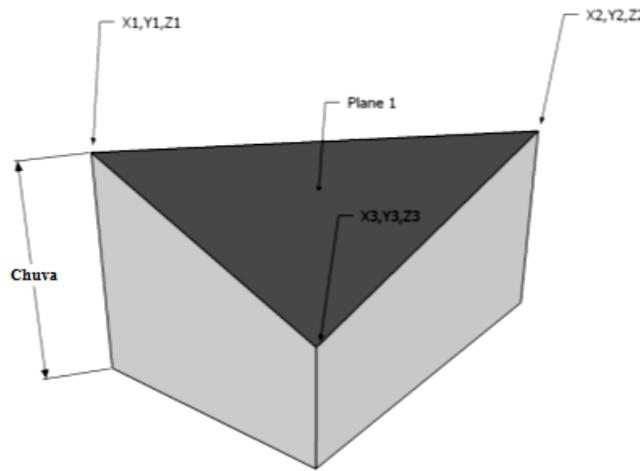


Figura 2.5 (b) Triangulação

Como pode se observar na Figura 2.5 (b), cada triângulo cobre uma pequena porção da área total, o cálculo da precipitação também é feito com base no triângulo que ela abrange. Para cada intervalo de tempo, presume-se que a precipitação é distribuída segundo a equação do plano tridimensional, onde as coordenadas de cada estação (vértice), que compõe o triângulo são as coordenadas X e Y da estação, e o valor da precipitação num instante de tempo é representado por Z. (Figura 2.5).



**Figura 2.5 Plano de Interpolação**

Uma vez que cada intervalo de tempo é conhecido para cada plano de coordenadas X, Y e Z, o valor da precipitação que é procurado pode ser dado pelo cálculo do determinante da seguinte matriz:

$$\begin{pmatrix} X_2 - X_1 & X_3 - X_1 & X_x - X_1 \\ Y_2 - Y_1 & Y_3 - Y_1 & Y_x - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 & Z_3 - Z_1 & Z_x - Z_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.12)$$

Na Eq.2.7 pode-se observar que  $X_x$  e  $Y_x$  são as coordenadas do local em que se quer obter o valor da precipitação e, portanto, eles são conhecidos, deixando como único desconhecido o valor  $Z_x$ , uma vez que todos os outros valores correspondem às coordenadas das estações de chuva e o valor da chuva no intervalo de tempo (t). O valor de  $Z_x$  é obtido como a projeção das coordenadas  $X_x$  e  $Y_x$  no plano, e em uma forma que  $Z_x = R_x$ ,  $R_x$  Sendo o valor da precipitação (O determinante).

O processo descrito acima é aplicado sobre cada um dos locais onde se pretende determinar a precipitação em cada intervalo de tempo, por conseguinte, o determinante apresentado na Eq. (2.7) sofre poucas alterações em cada intervalo de tempo.

### **3- SHIA LANDSLIDE PROBABILISTICO**

#### **3.1- SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA ABERTA- SHIA**

No capítulo 2.6, foi apresentado e explicado, o funcionamento da componente Hidrológica, assim o modelo exige do usuário a definição de um perfil de intemperismo (assume-se que nestas regiões tropicais montanhosas existe sempre um perfil de solo residual) no qual, cada horizonte do perfil está caracterizado por diferentes valores de condutividades hidráulicas saturadas até atingir, em profundidade, a base de rocha considerada para fins práticos como impermeável (o modelo ainda apresenta a limitação de não conseguir considerar a permeabilidade secundária em maciços de rocha intensamente fraturados).

A interpolação espacial dos dados de precipitação é baseada no método de triangulação de Delaunay proposto por Velásquez et al, (2011) descrito acima, em que as estações pluviométricas são usadas como os vértices dos triângulos que representam um plano tridimensional da precipitação. O centro de cada célula da grelha constitui o ponto computacional. Cada célula da grelha corresponde a um sistema de cinco tanques interconectados que se comunicam com os respectivos tanques nas células adjacentes. Os tanques representam o fluxo de água e armazenamento como uma unidade de resposta hidrológica, incluindo os seguintes processos hidrológicos: interceptação, retenção, infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial, percolação, escoamento sub-superficial, e a base de retorno nos canais de escoamento do sistema de drenagem como se pode observar na Figura 3.1.

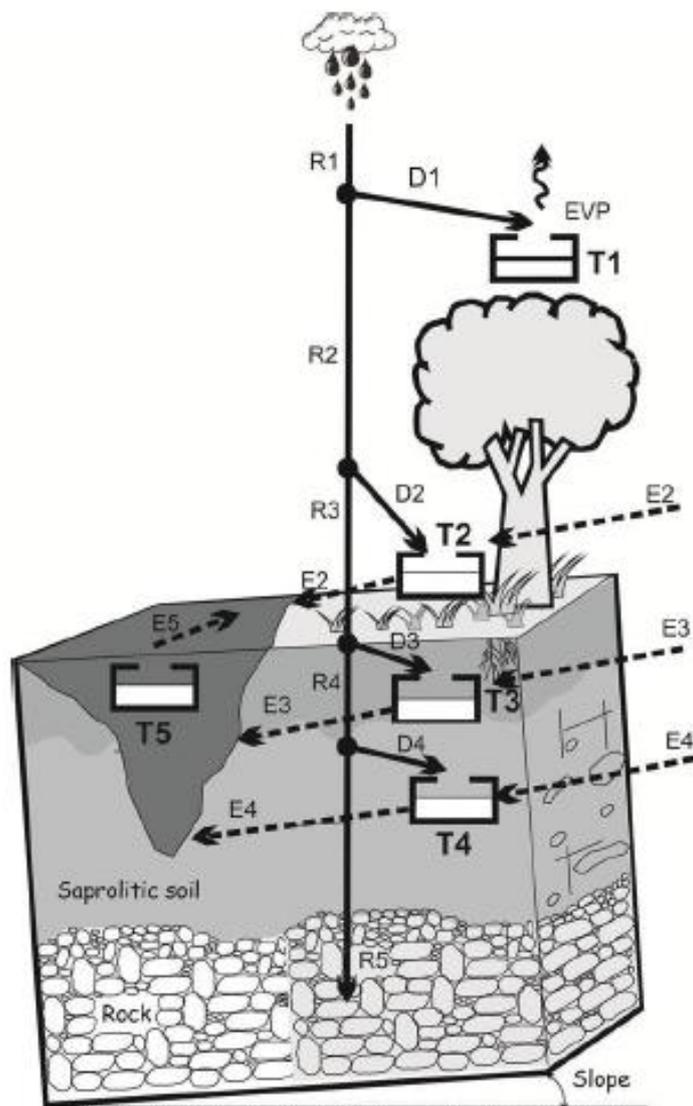


Figura 3.1 Tanque de armazenagem estática (T1), Tanque de armazenagem superficial (T2), armazenagem gravitacional (T3), aquífero (T4), canal (T5), chuva (R1), excedente (R2), infiltração (R3), Percolação (R4), Escoamento subterrâneo (R5), escoamento superficial (E2), escoamento sub-superficial (E3), f fluxo base (E4), vazão no canal (E5), fluxo para os tanques (D1:4) e evapotranspiração (EVP). (Aristizábal, 2013)

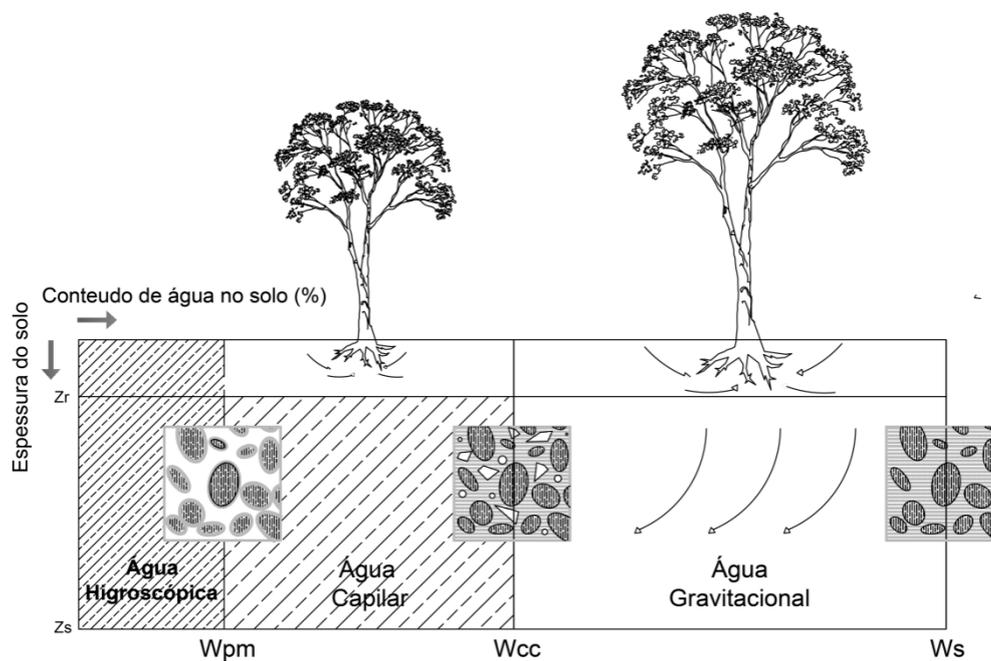
### 3.1.1- Armazenagem estática (T1)

O primeiro tanque é chamado de armazenagem estática (T1), e representa a interceptação e a detenção da água em poças e a água de capilaridade armazenada na parte superior do solo. Armazenamento estático representa a água retida por forças capilares na zona de enraizamento do solo, o que é uma função da diferença entre a capacidade do campo e da profundidade da raiz eficaz o ponto de murcha. O tanque modela à água que entra no sistema sem participar do escoamento superficial, de acordo com as condições de saturação assumidas, a chuva (R1) é armazenada inicialmente no tanque de armazenagem estática, até a capacidade máxima seja

atingida. A quantidade mínima de água presentes no tanque num intervalo de tempo depende da sua capacidade máxima ( $S_{1max}$ ), tipo de solo e conteúdo de umidade.

$$D_1 = \min \left\{ R_1 \left[ 1 - \left( \frac{S_1^*}{S_{1max}} \right) \right], S_{1max} - S_1^* \right\} \quad (3.1)$$

Onde  $S_1^*$  é o volume de água no T1 no passo de tempo prévio. Quando o volume de água no T1 se acrescenta, a capacidade do tanque diminui. O  $S_{1max}$  é igual a soma das capacidades das plantas de armazenarem água no solo. Esse valor pode ser maior de acordo com a capacidade de armazenagem da capa vegetal como apresentado na Figura 3.2.



**Figura 3.2** Conteúdo de água no solo e água disponível. Profundidade de raiz ( $Z_r$ ), espessura do solo ( $Z_s$ ), ponto de murcha permanente ( $wpm$ ), capacidade de campo ( $wcc$ ), saturação ( $ws$ ).

Onde ponto de murcha permanente ( $Wpm$ ) corresponde ao teor de umidade no qual a planta não consegue mais retirar água do solo, a capacidade de campo ( $Wcc$ ) é a capacidade máxima do solo em reter água, acima da qual ocorrem perdas por percolação de água no perfil ou por escoamento superficial. (Efeito da gravidade) e o ponto de saturação ( $Ws$ ) corresponde ao ponto em que os macro e micro poros do solo estão cheios de água.

Assim, o  $S_{1max}$  é definido como:

$$S_{1max} = (W_{cc} - W_{pm}) \cdot Z_r \quad (3.2)$$

A água excedente ( $R_2$ ) da armazenagem estática que vai para o tanque dois é:

$$R_2 = R_1 - D_1 \quad (3.3)$$

Onde  $D_1$  corresponde a água que foi para o T1.

O volume de água no T1 atualizado para cada intervalo de tempo tendo em consideração a capacidade  $S_{1\max}$  é:

$$S_1 = \text{Min}(S_1^* + R_1 - R_2, S_{1\max}) \quad (3.4)$$

A única saída deste armazenamento é a evapotranspiração ( $E_1$ ), foi incluída no modelo como uma função da água disponível ( $S_{1\max}$ ), e como potencial de evapotranspiração ( $E_{vp}$ ), que é definido por um parâmetro de acordo com a elevação do local.

$$E_1 = \text{Min} \left\{ E_{vp} * \left( \frac{S_1}{S_{1\max}} \right)^{0,6}, S_1 \right\} \quad (3.5)$$

### 3.1.2- Armazenagem superficial (T2)

O segundo tanque é chamado de armazenagem superficial, e representa a água na superfície da encosta que flui superficialmente e que não se infiltrou. Depois do enchimento do T1, a capacidade de infiltração pode-se aproximar pela condutividade hidráulica da camada superior de solo. Então a quantidade de água que conseguisse infiltrar no solo é:

$$R_3 = \text{Min}(R_2, K_s) \quad (3.6)$$

Onde  $R_3$  representa a infiltração da água no solo,  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada da camada superior do solo, e adicional tem-se  $S_{3disp}$  que representa o volume de água do T3. Isso significa que a infiltração é controlada pela condutividade hidráulica saturada e a capacidade do solo residual de receber mais água, que depende da estrutura dos macro-poros.

A quantidade de água que atinge o T2 num intervalo de tempo ( $D_2$ ) é:

$$D_2 = R_2 - R_3 \quad (3.7)$$

O volume de água atualizado no T2 ( $S_2$ ), para cada intervalo de tempo representa-se assim:

$$S_2 = S_2^* + D_2 + Z_3 \quad (3.8)$$

Onde o  $S_2^*$  é o volume de água no T2 depois de no intervalo imediatamente anterior, e o  $Z_3$  é a água excedente do T3 quando atinge a sua capacidade.

O fluxo excedente de cada célula pode ter duas abordagens: linear, como uma velocidade constante para um reservatório ou non-linear usando propostas de vários autores.

Para uma velocidade constante, o fluxo excedente ( $E_2$ ) é dado por uma equação linear:

$$E_2 = \alpha \cdot S_2 = \left( 1 - \frac{dx}{v_2 dt + dx} \right) \cdot S_2 \quad (3.9)$$

Onde o nível da água do T2 é representado por  $S_2$  e o coeficiente de descarga do reservorio linear ( $\alpha$ ) é função do tamanho da célula ( $dx$ ), da discretização temporal ( $dt$ ) e da velocidade superficial na encosta ( $v_2$ ).

Para a abordagem não linear, autores recomendam usar a equação de Manning para fluxos uniformes, na qual o declive da linha de energia é similar ao declive da encosta (Vélez, 2001). Assim, a equação para velocidade do fluxo excedente é função da secção transversal do fluxo ( $A$ ), do ângulo de declive ( $\beta$ ) e do coeficiente de Manning ( $n$ ):

$$v_2 = \frac{\xi A^{(2/3)e_1} \beta^{1/2}}{n} \quad (3.10)$$

Onde,  $\xi$  e  $e_1$  são parâmetros associados ao tipo de superfície, para fluxo sobre o terreno natural, Parsons *et al.*, (1994) recomenda valores de 0.038 e 0.315, respectivamente.

A área da secção transversal ( $A$ ) varia de acordo com a velocidade do fluxo.

$$A = \frac{S_2}{dx + v dt} \quad (3.11)$$

De aí, supondo um valor de velocidade inicial ( $v_{inicial}$ ), a área é calculada e a velocidade é obtida ( $v_{cal}$ ). Esse processo é repetido 3 vezes para cada intervalo de tempo procurando por um valor de velocidade convergente ( $v_{conv}$ ).

$$v_{conv.} = \frac{2v_{cal.} + v_{inicial}}{3} \quad (3.12)$$

Finalmente, o fluxo de saída deste tanque 2 ( $E_2$ ) para a célula a jusante de acordo com a velocidade de fluxo superficial é:

$$E_2 = Av_{conv.} \frac{dt}{dx} \quad (3.13)$$

O volume de água atualizado no T2 levando em consideração as saídas de fluxo no intervalo de tempo:

$$S_2 = S_2^* - E_2 \quad (3.14)$$

### 3.1.3- Armazenagem gravitacional (T3)

Representa a armazenagem gravitacional no solo residual, conceitualmente localizada entre os pontos de capacidade de campo e de saturação Figura 3.2. Este tanque modela a coluna de água devida ao fluxo sub-superficial paralelo à superfície da encosta. Este tanque corresponde ao solo residual, onde a condutividade hidráulica é considerada pelo modelo, como saturada e verticalmente constante. Uma pequena parte de toda a água vai perco-a na direção do saprólito, de acordo com a permeabilidade deste ( $k_p$ ), e assim alimentar o fluxo sub-superficial.

De acordo com a Figura 3.2 a capacidade máxima do T3 é a porosidade drenável

$$S_{3max} = (W_s - W_{cc}) Z_s \quad (3.15)$$

Onde,  $W_s$  é o ponto de saturação, o  $W_{cc}$  é a capacidade de campo e  $Z_s$  é a espessura do solo intemperizado.

O volume de água que perco-a ao saprólito ( $R_4$ ) é:

$$R_4 = \text{Min}(R_3, k_p) \quad (3.16)$$

Onde  $k_p$  é a permeabilidade do solo residual.

O volume de água que vai para o T3 num intervalo de tempo é:

$$D_3 = R_3 - R_4 \quad (3.17)$$

O volume de água no T3 é atualizado para cada intervalo de tempo da seguinte maneira:

$$S_3 = \min(S_3^* + D_3, S_{3\max}) \quad (3.18)$$

Onde  $S_3$  é a quantidade de água no tanque 3,  $D_3$  é quantidade de água que vai para o tanque 3 e  $S_{3\max}$  é a capacidade máxima do tanque.

Se a capacidade do T3 é atingida, o excedente ( $Z_3$ ) vai para o escoamento superficial de acordo com a seguinte expressão.

$$Z_3 = \max \{0, S_3 + D_3 - S_{3\max}\} \quad (3.19)$$

A fim de estimar o escoamento sub-superficial ( $E_3$ ), pode-se dar uma abordagem linear ou não linear, no caso linear pode-se aplicar a Eq.3.9, onde se dá uma velocidade constante para a condutividade hidráulica horizontal para a parte mais superficial do solo, que é definido principalmente por a estrutura dos macro poros. (Francés *et al.*, 2007)

Para uma abordagem não linear, a velocidade do fluxo sub-superficial é estimada de acordo com Kubota & Sivapalan, (1995) como um escoamento sub-superficial lateral dos terrenos cobertos pela floresta.

$$v_3 = \frac{k_s \sin \beta}{(b+1)(S_{3\max})^b} (S_3)^b \quad (3.20)$$

No qual  $k_s$  é a condutividade hidráulica saturada,  $\beta$  é o ângulo de declividade e  $b$  é um parâmetro que depende do tipo de solo. Kubota & Sivapalan, (1995) recomendam  $b=2$  para uma montanha coberta pela floresta, que representa a não homogeneidade da condutividade hidráulica ao longo do perfil de intemperismo.  $S_3$  é um volume e deve calcular-se em termos da área da secção transversal ( $A$ ) do fluxo e tamanho da célula ( $dx$ ) da seguinte maneira:

$$S_3 = A dx \quad (3.21)$$

A área da secção transversal ( $A$ ), a velocidade média e o volume de água que sai do T3 para a célula a jusante de acordo com a velocidade do escoamento sub-superficial são estimadas de forma similar no T2, usando as Eq. 3.11, 3.12 e 3.13.

Finalmente, o volume de água no T3 é atualizado levando em consideração o fluxo de saída durante o intervalo de tempo:

$$S_3 = S_3 - E_3 \quad (3.22)$$

#### 3.1.4- Aquífero (T4)

Corresponde ao aquífero, onde o fluxo vertical representa a saída das águas subterrâneas, e o fluxo horizontal é o fluxo base. Este tanque modela o fluxo e armazenamento no aquífero. O modelo leva em consideração que parte da água que entra no aquífero não está incorporada no fluxo base da bacia, embora na maioria das bacias esse valor é muito pequeno e pode ser excluído do modelo.

O volume de saída das águas subterrâneas ( $R_5$ ) é:

$$R_5 = \text{Min}(R_4, k_{pp}) \quad (3.23)$$

No qual  $k_{pp}$  representa o fluxo de saída das águas subterrâneas, que podem-se considerar águas perdidas. O volume de água que vai para o T4 ( $D_4$ ) num intervalo de tempo é:

$$D_4 = R_4 - R_5 \quad (3.24)$$

O volume de água no tanque 4 ( $S_4$ ) atualizado depois de um intervalo de tempo é

$$S_4 = S_4^* + D_4 \quad (3.25)$$

A saída desse tanque para a célula a jusante ( $E_4$ ) é estimada usando a Eq. 3.9 em termos de nível de água com o coeficiente de descarga que pode ser relacionado com a condutividade hidráulica saturada do aquífero. Além, o volume de água no T4 é atualizado levando em consideração as saídas durante o intervalo de tempo:

$$S_4 = S_4 - E_4 \quad (3.26)$$

#### 3.1.5- Canal (t5)

Representa o canal de fluxo da célula, através do qual cada célula é ligada com outra célula a jusante de acordo com a rede de drenagem. Este tanque modela o fluxo de água na bacia hidrológica. Apenas as células com canais efêmeros e perenes estão contidas no T5; células de encosta não possuem tanques tipo T5.

Igual aos tanques prévios, a velocidade da corrente pode ser estimada com uma abordagem linear ou não linear. Para uma velocidade constante, numa análise linear usando a Eq. 3.9 no qual a velocidade é dada pela experiência e observações de campo.

Para a abordagem não linear, o caminho ao longo da rede de canais é levado a cabo a uma velocidade não estacionária usando a Geomorphological Kinematic Wave (GKW em Inglês) Onda cinemática geomorfológica proposta pelo Vélez, (2001). A GKW é uma simplificação das equações de Saint Venant, onde a inercia e os termos de inercia e pressão são desprezados. Assumindo canais prismáticos com uma seção constante ao longo do rio a equação discreta e continua pode-se expressar em termos de duas variáveis desconhecidas, a velocidade da água ( $V_t$ ) e o corte transversal ( $A_t$ ) como:

$$A_t \Delta x + V_t A_t \Delta t = I_t + S_{t-1} \quad (3.27)$$

No qual S representa o volume de água no canal final e  $I_t$  é o total de fluxo de entrada derivado das encostas (fluxo superficial, fluxo sub-superficial e fluxo base) ou fluxo de canais de rio acima. A GKW simplificação assume que a pente da linha de energia é igual a declividade do leito do canal ( $\beta$ ). Assim, a velocidade e o corte transversal do fluxo podem-se obter pela equação de Manning. De acordo com a equação de Manning, a velocidade é expressa em termos do perímetro molhado ( $w_t$ ) que é função do corte transversal ( $A_t$ ).

$$v_4 = \frac{1}{n} \left( \frac{A_t}{W_t} \right)^{2/3} \beta^{1/2} \quad (3.28)$$

A velocidade é controlada pelas características do canal hidráulico (geometria e declividade) em cada seção e cada delta de tempo. A declividade de cada célula ( $\beta$ ) é facilmente computada pelo modelo DEM., No entanto, na prática é economicamente inviável medir a geometria do canal para cada célula. O GKW usa a correlação de Leopold & Maddock Jnr, (1953), que usando equações potenciais relaciona a geometria do corte transversal com a velocidade da corrente.

$$Q_b = k_1 \Lambda^\varphi \quad (3.29)$$

$$w_b = c_1 Q_b^{\alpha_1} \quad (3.30)$$

$$w_i = c_2 Q_b^{\alpha_1} \quad (3.31)$$

No qual  $Q_b$  é a capacidade máxima do rio,  $\Lambda$  é a área de drenagem e os coeficientes e expoentes  $k_1, c_1, \varphi, \alpha_1, \alpha_2$  são constantes na escala regional.

Para o cálculo da rugosidade, o GKW propõe uma equação em termos da declividade ( $\beta$ ), a área de acumulação ( $\Lambda$ ) e a altura da água ( $y$ ):

$$n = c_n c_d^\varepsilon y^{\varepsilon\theta} \beta^{\varepsilon\theta} \quad (3.32)$$

Onde os coeficientes  $c_n, c_d$  e os expoentes  $\varepsilon, \theta$  são constantes na escala regional.

Nesse ponto, a velocidade da água no canal é função da geometria do canal e a geomorfologia do terreno, (Francés *et al.*, 2012).

$$V_4 = \left[ \frac{A^{(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)(1-\alpha_2)} \beta^{(\frac{1}{2}-\varepsilon\theta)}}{c_n c_d^\varepsilon \left( c_1 k_1^{(\alpha_1-\alpha_2)} \Lambda^{\varphi(\alpha_1-\alpha_2)} \right)^{(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)}} \right]^{\frac{1}{1+\alpha_2(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)}} \quad (3.33)$$

Essa equação é simplificada da seguinte maneira

$$V_4 = K_2 A^{w_1} \Lambda^{w_2} \beta^{w_3} \quad (3.34)$$

Onde

$$K_2 = c_n c_d^\varepsilon \left( c_1^{(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)} k_1^{(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)(\alpha_1-\alpha_2)} \right)^{-w} \quad (3.35)$$

$$w = \frac{1}{1+\alpha_2(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)} \quad (3.36)$$

$$w_1 = w(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)(1-\alpha_2) \quad (3.37)$$

$$w_2 = -w\varphi(\frac{2}{3}-\varepsilon\theta)(\alpha_1-\alpha_2) \quad (3.38)$$

$$w_3 = w(\frac{1}{2}-\varepsilon\theta) \quad (3.39)$$

O resultado é que a onda cinemática geomorfológica GKW precisa de nove expoentes e coeficientes independentes, que podem ser obtidos com um estudo geomorfológico regional numa zona hidrológicamente homogênea. Contudo, estudos empíricos têm sido feitos por diversos autores que propõem diferentes valores de acordo com as condições locais. (e.g. Vélez, 2001; Francés *et al.*, 2007).

De maneira semelhante aos outros tanques, a velocidade é determinada com os algoritmos antes mencionados, porque é uma função da água armazenada no tanque usando as Eq. 3.11, 3.12 e 3.13.

A Tabela 3.1 apresentam-se as faixas para cada uma das constantes e expoentes propostas pelo Vélez, (2001) e Francés *et al.*, (2007).

**Tabela 3.1 Parâmetros geomorfológicos para onda cinemática para a bacia *La Arenosa* (Tomado de Velez, 2000).**

<b>Parâmetro de propagação</b>	<b>Raio de ação</b>
$k_1$	0.5-0.75
$\varphi$	0.65-0.8
$c_1$	0.5-5.75
$\alpha_1$	0.34-0.55
$\alpha_2$	0.05-0.2
$c_d$	0.5-50
$\theta$	0.5-2.75
$c_n$	0.025-0.07
$\varepsilon$	0.125-0.18

### **3.1.6- Transferência vertical e horizontal da água.**

As ligações verticais entre tanques descrevem a precipitação, evapotranspiração, infiltração e processos de percolação; ao mesmo tempo o modelo considera a transferência horizontal entre células adjacentes, por meio de um submodelo para inferir a direção do fluxo com ajuda da topografia da bacia. As conexões horizontais descrevem o fluxo superficial, sub-superficial e fluxo base.

A integração dos tanques depende do tipo de célula. Existem três tipos de células de análise:

- Célula tipo encosta
- Célula tipo canal efêmero.
- Célula tipo canal perenes (Figura 3.3 e Figura 3.4)

O tipo de célula é assignado pelo modelo de acordo com a área de acumulação da mesma (a acumulação limiar). Esses limiares são definidos considerando as observações em trabalho de campo e estudos locais. Tem dois limiares que são definidos no início da simulação como parâmetros de entrada do modelo, a área mínima de acumulação para se considerar uma célula ou canal efêmero, entre o fluxo superficial e o fluxo sub-superficial, e a área mínima para formar um canal ou célula perene entre o fluxo sub-superficial e o fluxo base ou vazão. O limiar para o fluxo base é estimado a partir do ponto de fluxo permanente na rede de canais. De acordo com esses valores de limiares, o modelo define o tipo de célula para toda a bacia hidrográfica. Para células tipo encosta, o fluxo horizontal de água entre os tanques converte-se no mesmo nível, ou seja, o tanque T2 passa a água para o tanque T2 na célula a jusante e assim por diante para os demais tanques disponíveis para receberem. Só o tanque T1 não transfere para os tanques similares já que a única saída desse tanque é a evapotranspiração. Para células tipo canal efêmero o fluxo horizontal ocorre só entre tanques T4, o fluxo de saída dos tanques T2 e T3 vão para o T5 e finalmente, para células do tipo canal perene o fluxo ocorre de T5 para T5. Uma célula tipo encosta pode drenar a qualquer tipo de célula, uma célula tipo canal efêmero pode drenar para semelhante ou para uma do tipo perene e as perenes só podem drenar para similares (Ver Figura 3.3 e Figura 3.4).

O modelo mostra que, quando um escorregamento de terra ocorre em uma célula tipo encosta, ela se transforma em uma célula do tipo efêmera levando em consideração que a geoforma impressa pelo escorregamento produz um canal efêmero que concentra o fluxo ao longo da nova geoforma. Finalmente o modelo faz um balanço de massas entre entradas e saídas para a bacia completa, mediante a atualização permanente do volume acumulado em cada um dos tanques para cada passo de tempo estabelecido.

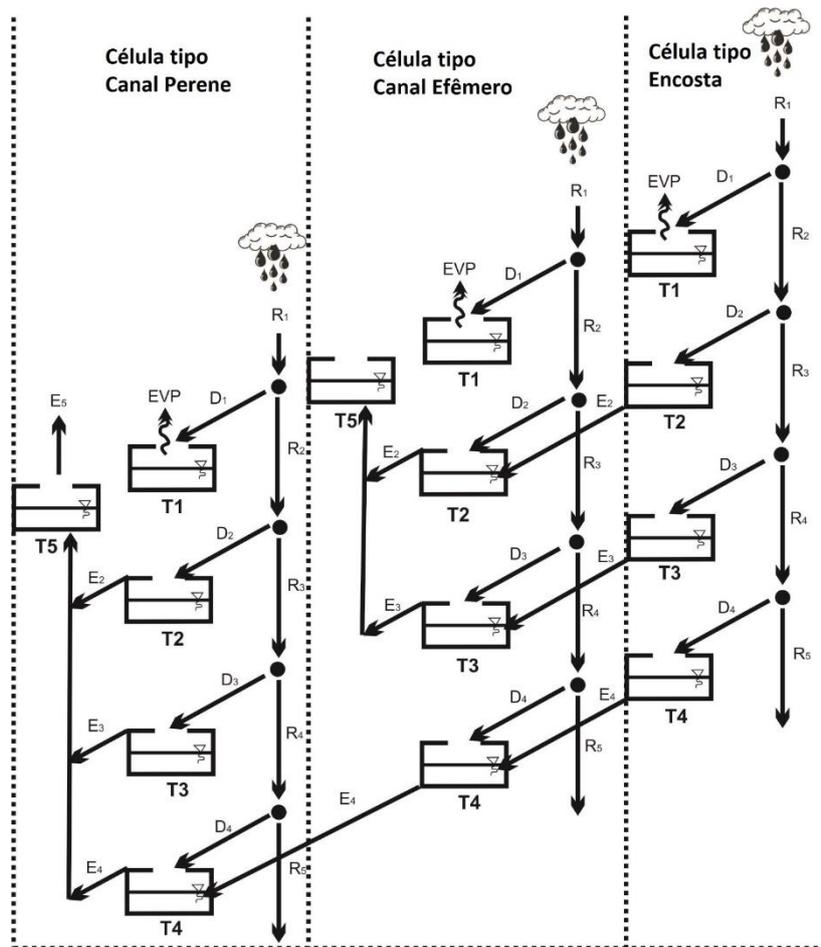


Figura 3.3 Esquema de interconexão entre os tanques usados no SHIA\_LANDSLIDE (Modificado de Aristizábal, 2013).

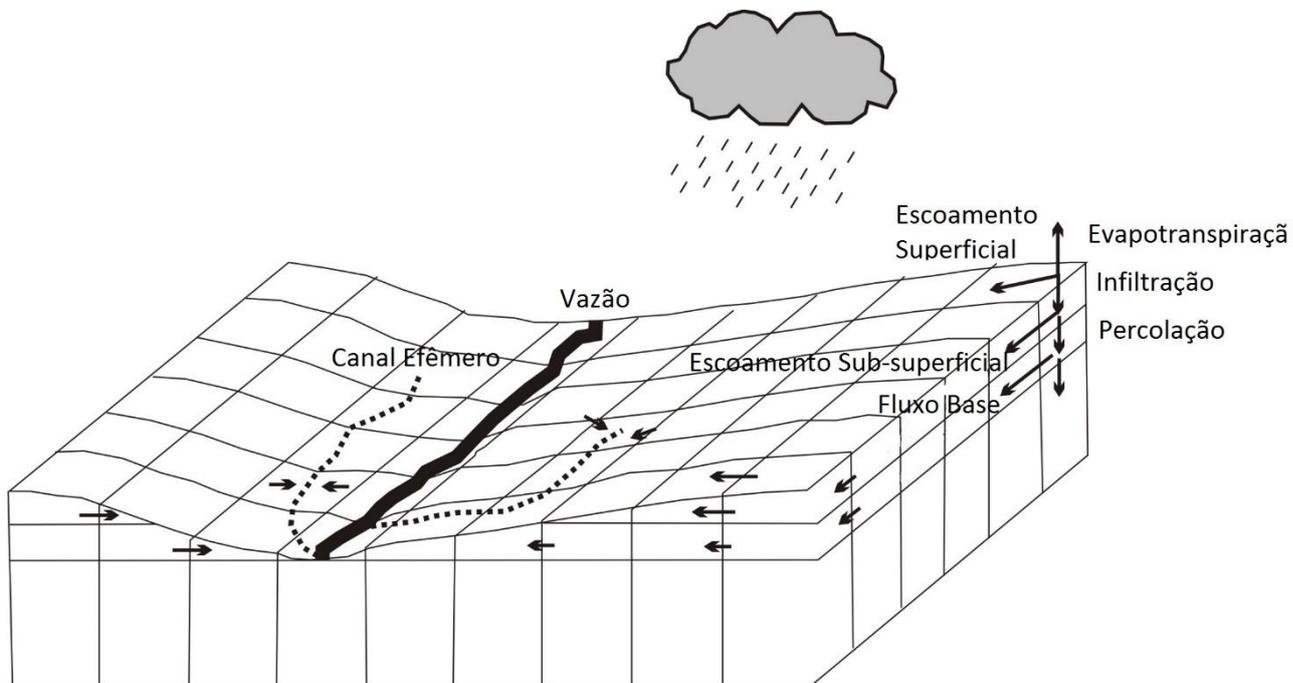


Figura 3.4 Divisão esquemática das quadriculas celulares de fluxo na bacia (Modificada de Aristizábal, 2013)

### 3.2- MODELO GEOTÉCNICO

Em situações em que encostas apresentam uma camada superficial de solo com pequena espessura, sobre uma camada mais rígida de solo residual jovem ou de embasamento rochoso, a superfície crítica de ruptura é paralela ao talude, conforme o ilustrado na Figura 2.1 e o talude é considerado infinito (GeoRio, 2000). Em encostas recobertas por solos tropicais, a superfície potencial de ruptura normalmente está localizada próxima do nível de contato entre o solo residual relativamente permeável e o saprólito relativamente impermeável, se o solo residual tem espessura pequena em comparação com o comprimento da encosta, a hipótese de estabilidade do talude infinito pode ser assumida na análise. (Aristizábal, 2013).

Considerando a equação 2.8, a condição de equilíbrio limite para o talude ocorre quando o fator de segurança é a unidade, então:

$$c' + (\gamma Z - \gamma_w Z_w) \cos^2 \beta \tan \phi = \gamma Z \sin \beta \cos \beta \quad (3.40)$$

A solução desta equação para  $Z_w$ , fornece a altura de saturação crítica para o desencadeamento de um deslizamento:

$$Z_{w_{crit}} = \frac{\gamma}{\gamma_w} Z \left( 1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\gamma_w \cos^2 \beta \tan \phi} \quad (3.41)$$

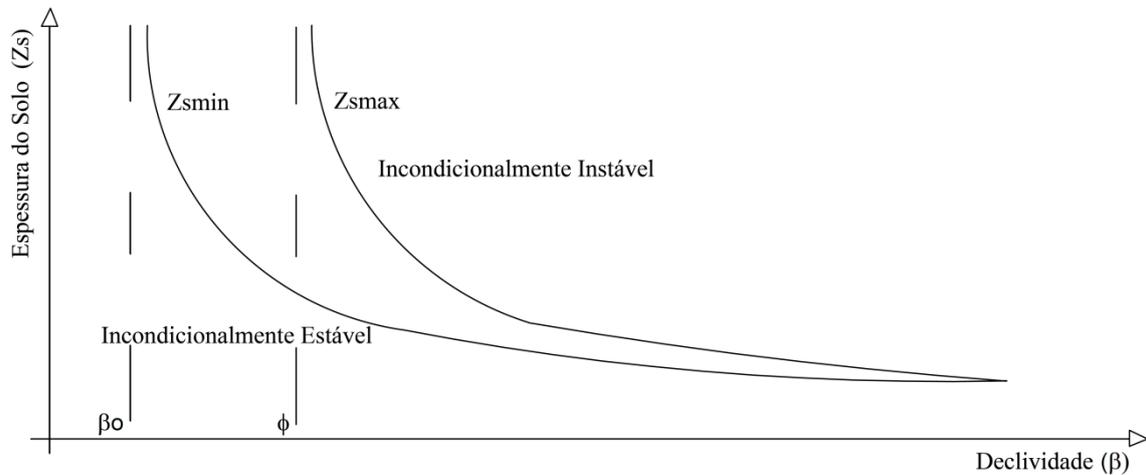
Para avaliar a estabilidade de taludes para cada pixel em cada passo de tempo, é necessário obter a altura do lençol freático e comparar com o valor da altura crítica da água ( $Z_{w_{crit}}$ ). O componente hidrológico do modelo fornece à quantidade de água no tanque de armazenagem gravitacional, este valor tem que ser transformado levando em consideração o conteúdo de água no solo. Deste modo, a altura do lençol freático é:

$$Z_w = \frac{S_3}{(w_s - w_{fc})} \quad (3.42)$$

Onde:  $S_3$  é a altura de água no tanque T3 de armazenagem gravitacional,  $w_s$  é o teor de umidade do solo na condição saturada, e  $w_{fc}$  é o teor de umidade na condição de capacidade de campo.

Contudo, para aumentar a eficiência computacional do modelo, e para evitar cálculos desnecessários antecipadamente tem que se definir a espessura mínima e máxima do solo intemperado ou residual para definir as células que vão ser incondicionalmente estáveis e

igualmente as incondicionalmente instáveis no importando o conteúdo de água no tanque 3, na Figura 3.5 apresentam-se os limites onde a encosta é incondicionalmente estável e instável.



**Figura 3.5 Susceptibilidade aos deslizamentos de terra em função do ângulo de declividade e à espessura do solo.  $\beta_0$  é o máximo ângulo no qual a encosta é estável,  $\phi$  é o ângulo de atrito,  $Z_{smin}$  é a espessura do solo imune e  $Z_{smax}$  é a máxima espessura de solo estável (modificado, Aristizábal, 2013).**

A espessura mínima é obtida resolvendo a equação (3.49) com  $Z_w = Z$ , que fornece a profundidade de imunidade:

$$Z_{min} = \frac{c'}{\gamma_w \cos^2 \beta \tan \phi + \gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi)} \quad (3.43)$$

Porque a profundidade saturada é necessariamente menor que a espessura do solo residual ( $Z_w \leq Z$ ), quando  $Z < Z_{min}$  o depósito é sempre estável, independente da chuva. (Iida, 1999)

E para um determinado valor de  $Z_{max}$ , a profundidade saturada necessária para deflagrar um escorregamento é zero e o solo vai ser sempre instável, independente do evento de chuva. (Iida, 1999). Para uma espessura de solo maior do que  $Z_{max}$  o solo é sempre instável.  $Z_{max}$  é determinada resolvendo a Eq. 3.49 com  $Z_w = 0$

$$Z_{max} = \frac{c'}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi)} \quad (3.44)$$

Adicionalmente é preciso encontrar o máximo valor de ângulo de inclinação ( $\beta_0$ ), onde a encosta é sempre estável, e só se a altura saturada é maior que a profundidade do solo deflagra-se um escorregamento,  $\beta_0$  é definido quando  $c'=0$  e  $Z_w=Z$  na equação (49). Quando  $\beta < \beta_0$  a encosta é sempre estável.

$$\beta_0 = \text{Tan}^{-1} \left[ \text{Tan} \phi \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \right] \quad (3.45)$$

### 3.2.1- Análise de confiabilidade

Os termos envolvidos no cálculo do fator de segurança têm certo grau de incerteza que dependem de muitos fatores que começam no mais básico; o solo não é homogêneo, depois temos algumas outras incertezas como são a amostragem e os próprios ensaios. Então o cálculo do fator de segurança tem mesmo uma incerteza que é o produto de muitas outras incertezas e assim conhecer a confiabilidade desse fator de segurança é tão importante quanto o próprio cálculo dele. Além disso, os valores aceitáveis de fator de segurança não são mais que valores propostos por muitos autores na sua experiência para diferentes tipos de obras e projetos civis independente do grau de incerteza nos dados e na hora do cálculo do mesmo. Então o cálculo da confiabilidade fornece um meio para avaliar o efeito da combinação das incertezas e fornece uma capacidade para estabelecer se as mesmas são altas ou baixas (Duncan, 2000).

O método do índice de confiabilidade é uma aplicação direta do método de FOSM (*First Order, Second Moment*), que é comumente utilizado na geotecnia. O método FOSM é um truncamento da função da expansão da série de Taylor. As entradas e saídas desse método são expressas por desvios padrões e valores esperados com o intuito de encontrar a função de distribuição de probabilidade que se acoplar à função. (Assis *et al.*, 2004)

O método FOSM descreve a primeira ordem aproximando-se da média, a variância e o desvio padrão da função que em nosso caso é a altura crítica de água no T3  $Z_{w_{crit}}$ , com base nos primeiros termos da série de Taylor, relacionando à expansão da função Eq. 3.50.

Onde o valor médio ou esperança da função  $E(Z)$  é calculado a partir dos valores médios das variáveis independentes ( $c, \phi, \gamma_h, Z_s$ ) Eq. 3,55, e o desvio padrão  $\sigma[Z_{w_{crit}}]$  é calculado a partir variação das variáveis independentes e das derivadas da função dependente com relação a cada uma das variáveis independentes. As derivadas nem sempre são operações que podam- ser resolvidas facilmente, por tanto se faz uso da aproximação numérica. (Harr, 1985).

$$E[Z_{w_{crit}}] = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_i) \quad (3.46)$$

$$V[Z_{wcrit}] = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad (3.47)$$

Assume-se então a função da altura crítica da altura da água no T3 ( $Z_{wcrit}$ ), tem uma distribuição de probabilidade normal para depois seguir os seis passos propostos por Christian & Asce, (2005):

- Identificar todas as variáveis das quais depende a função objetivo, neste caso como são a coesão, o ângulo de atrito, o peso específico do solo e a espessura do solo intemperizado ( $Z_s$ ).
- Estimar os valores médios de cada um dos parâmetros para assim calcular o valor esperado para a função objetivo, esses valores são tomados da literatura e de estudos disponíveis do local de estudo.
- Calcular o desvio padrão para cada uma das variáveis independentes que dependem em geral de cada solo e cada parâmetro específico, esses valores serão tomados da literatura.
- Realizar uma análise de sensibilidade com o cálculo das derivadas parciais em relação com cada uma das variáveis em estudo ou com a sua aproximação numérica.
- Calcular o valor da  $V[Z_{wcrit}]$  como a Eq. 3.56

Uma vez que a média e a variância são calculadas, e seguindo uma distribuição de probabilidade Gaussiana (Normal), torna-se uma questão simples, calcular o índice de confiabilidade  $\beta^*$  como é mostrado na Figura 3.6.

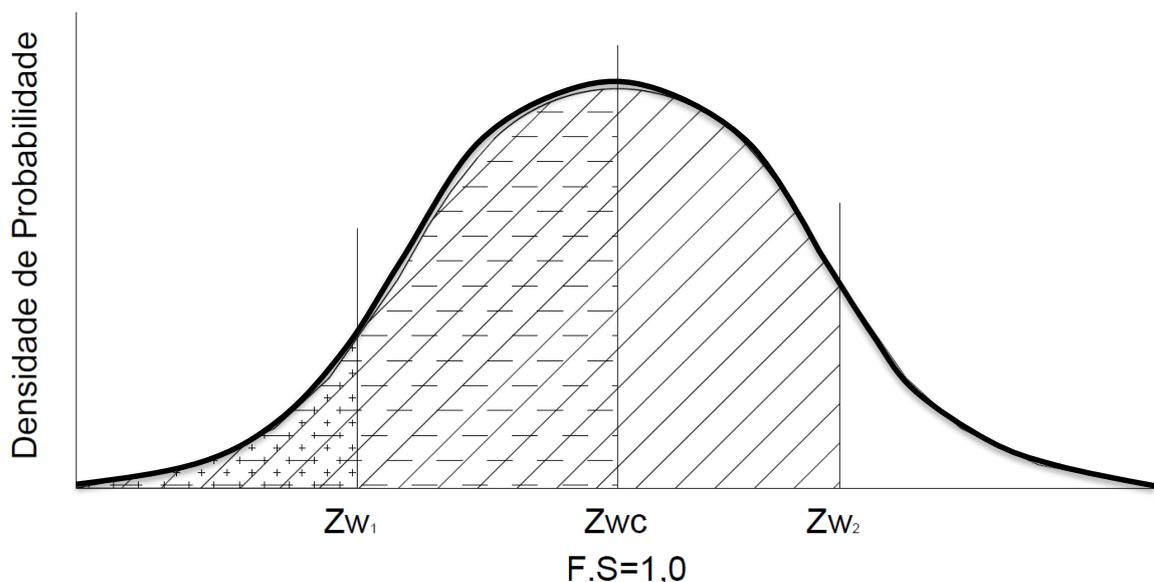


Figura 3.6 Função de distribuição de probabilidade para o cálculo da confiabilidade

Onde a confiabilidade para  $Z_{w1}$  é positiva, para o  $Z_{w2}$  é negativa y para  $Z_w = Z_{wcrit}$  é zero.

$$\beta^* = \frac{P(Z_{wcrit}) - P_{acum}(Z_w)}{P_{Acum}(Z_{mx}) - P_{Acum}(Z_{min})} \quad (3.48)$$

Levando em consideração que a média é o valor crítico da altura da água, e que a água não pode superar a altura crítica sem chegar à falha,- tem-se que:

$$\beta^* = \frac{0,5 - P_{acum}(Z_w)}{0,5} \quad (3.58)$$

### 3.3- DESCRIÇÃO DO CÓDIGO

SHIA\_LandSlide Probabilístico é um programa desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN para analisar mudanças na poro pressão positiva do solo, que levam a mudanças no fator de segurança durante a infiltração da água por ação de um período de chuvas, usando um modelo físico conceitual baseado num modelo hidrológico distribuído junto com um modelo geotécnico para fornecer uma avaliação da condição encosta-falha.

Existem diferentes linguagens de programação para desenvolver modelos como este. No entanto, devido ao fato que o modelo corresponde um módulo hidrológico distribuído e detalhado combinando com uma abordagem geotécnica para a escala da bacia, foi necessário usar uma linguagem e um compilador muito potentes. E por essa razão FORTRAN foi o escolhido.

#### 3.3.1- Sub-rotinas

O programa principal está composto por 6 sub-rotinas: Input data (Dados de entrada), Basin (Bacia), Rainfall (Chuva), Matrix (Matriz), Model (Modelo) e Statistics (Estatística) que foi a desenvolvida nesta pesquisa.

Adicionalmente tem-se a sub-rotina SHIA\_LandSlide, que é a que chama todas as sub-rotinas uma por uma, e a sub-rotina module para a declaração de variáveis.

A sub-rotina Basin, determina a posição da célula de acordo com o mapa de direções. O algoritmo para definir a direção do fluxo é conhecido como D8 (8 direções de fluxo), que assigna fluxo de cada célula para somente uma das possíveis 8 direções vizinhas, incluindo adjacentes ou diagonais, na direção descendente onde a declividade seja mais íngreme. No modelo as células podem receber de multiplex vizinhos, mas somente pode entregar para um. Esta sub-rotina, começa no ponto se saída da bacia que é considerado o ponto mais baixo,

estabelecendo assim, o número e posição de cada célula que drena outra e formando um vetor que vai do fundo ao topo da bacia.

A sub-rotina Matrix, é encarregada de formar uma matriz multi-paramétrica da bacia com todos os parâmetros que correspondem a cada célula. O propósito principal dessa rotina, é preparar os dados para facilitar os cálculos da sub-rotina Model.

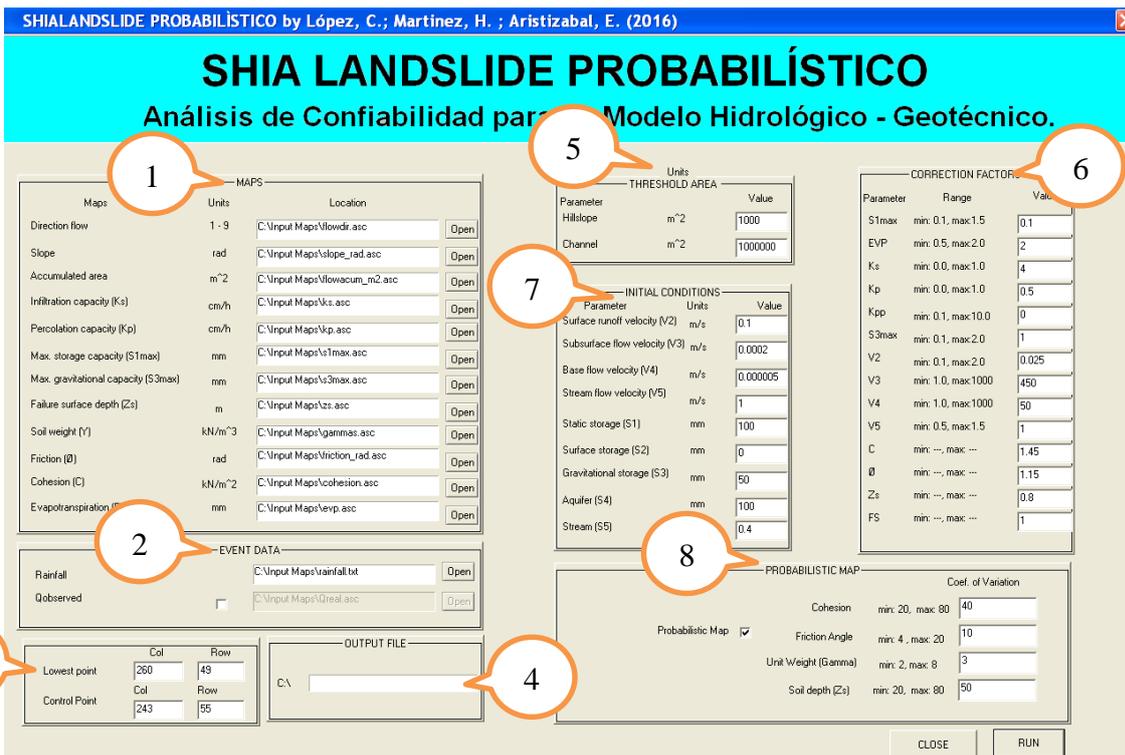
A sub-rotina Model, prepara a matriz de susceptibilidade que classifica as células em: Células Incondicionalmente estáveis, incondicionalmente instáveis e potencialmente instáveis. Nesta sub-rotina, a altura crítica do lençol freático é calculada com a Eq. 3.50 e é incluída na matriz multiparamétrica, e se repete para cada passo de tempo, para avaliar a estabilidade das células potencialmente instáveis só.

Na componente hidrológica, o fluxo sub-superficial é calculado de acordo com a direção de drenagem imposta pela topografia, dependendo da GWK. As mudanças na altura do lençol freático significam uma mudança na poro pressão, que é estimada no módulo geotécnico.

Na componente geotécnica, para cada passo de tempo, o programa avalia a estabilidade das células potencialmente instáveis, comparando a altura de água  $Z_w$ , com a altura crítica anteriormente calculada. Para as células que não apresentaram falha, o modelo calcula um fator de segurança que vai ser acompanhado com uma confiabilidade desse fator de segurança.

### **3.3.1- Interface (janela) principal**

A janela principal é um arquivo executável onde é requerida toda a informação de entrada que o modelo precisa para começar a corrida. A janela foi concebida como uma ferramenta para o usuário interagir mais facilmente com o modelo, mas se o usuário precisara, ele pode mexer no código diretamente. Assim que o arquivo executável for ativado, vai se encontrar a seguinte janela apresentada na Figura 3.7.



**Figura 3.7 Janela Principal do código do modelo**

Cada um dos números apresentados acima, representam uma janela de entrada de dados que deve ser levada em conta pelo usuário, algumas fazem parte do processo de calibração, e essa devem permanecer iguais, mais outras como os mapas de entrada ou os arquivos de chuva podem ser modificados de acordo com o caso que pretende-se estudar.

A continuação são apresentadas as janelas

1. Maps: é a janela onde se carregam os mapas de entrada ou input.
2. Event Data: é a janela onde se carregam as chuvas e as vazões medidas
3. É a janela onde se estabelecem o ponto mais baixo da bacia ou o ponto de saída, e o ponto de controle que é o local da bacia onde se tem a medida da vazão.
4. Output file: é a janela onde pode-se dar o nome ao arquivo de saída
5. Threshold Área: é a janela onde definido o tamanho mínimo de cada um dos tipos de célula (Encosta, efêmero ou perene)
6. Correction Factors: é a janela onde se trocam os fatores de correção no momento da calibração, após essa etapa, os valores não mudam mais.
7. Initial Conditions: é onde são definidas as condições iniciais da bacia, igual que os fatores de correção após a calibração é feita, os valores não mudam.

8. Probabilistic Map: É a janela onde pode-se ativar ou não o módulo probabilístico, além de ser o local onde se definem as variáveis probabilísticas.

### 3.4- AVALIAÇÃO GERAL DO MODELO COM A METODOLOGIA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC)

A metodologia ROC tem sido utilizada muito recentemente na avaliação comparativa dos modelos de deslizamentos. Esta é uma técnica para visualização, organização e classificação, baseada no desempenho do modelo; a principal vantagem da teoria é a facilidade para a detecção da compensação que tem a porcentagem de acerto com a porcentagem de falso alarme, é empregado em muitas outras áreas como testes de diagnósticos médicos, dados de mineração e para a comparação de algoritmos (Fawcett, 2006).

Análise ROC para avaliação do desempenho de modelos de deslizamento de terra é baseada no fato que cada célula da malha poderia ser mapeada usando classes atuais chamados de positivos e negativos, de acordo as bases de dados de inventário de escorregamentos reais disponíveis e as classes chamados de verdadeiros e falsos, produzidos pelo modelo.

Há quatro possíveis resultados mostrados na Figura 3.8, se a célula é positiva, ou seja, representa um escorregamento do inventário e é classificada como verdadeira pelo modelo, é contado como um verdadeiro positivo (a área instável foi classificada corretamente como instável). Se for classificado como falso no modelo, é contado como um falso positivo (a área instável erroneamente classificada como estável). Se a célula é negativa, ou seja, não tem escorregamento no inventário e é classificada como falso pelo modelo, é contada como um verdadeiro negativo (a área estável é classificada corretamente estável). E se é classificado como positivo no modelo, é contado como um falso positivo (a área estável classificada erroneamente como instável).

		Classe real	
		V	F
Classe calculada	P	Verdadeiro Positivo	Falso Positivo
	N	Falso Negativo	Verdadeiro Negativo

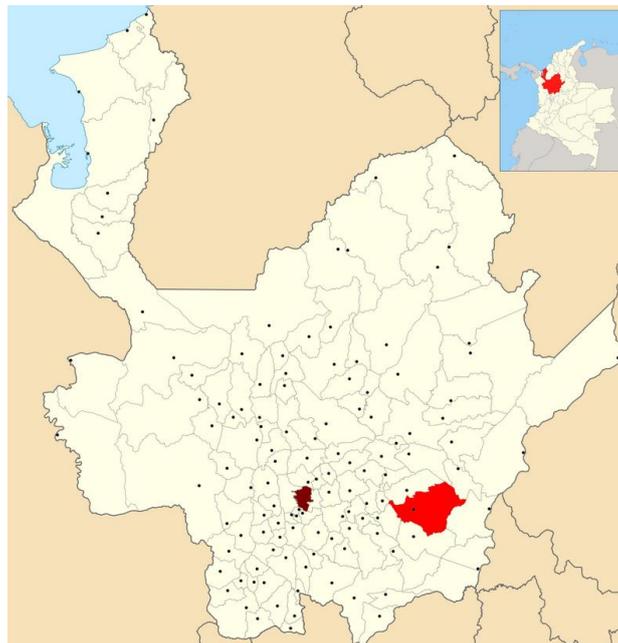
Figura 3.8. Matriz da análise ROC

#### 4- METODOLOGIA

A bacia escolhida para a implementação do modelo é uma de condições topográficas complexas, além estar localizada numa região tropical. Com todo o modelo SHIA\_LandSlide pode ser empregado em qualquer outra bacia hidrográfica sempre que sejam calibrados tanto o modelo hidrológico quanto geotécnico e esse é um processo individual e específico para cada uma delas.

A bacia empregada foi “*La Arenosa*”, e foi particularmente escolhida por um evento de escorregamentos massivos ocorridos no dia 21 de setembro de 1990 que permitiu a calibração geotécnica do modelo para assim fazer uma comparação do desempenho do modelo proposto.

O rio “*La arenosa*” está localizado 160 km ao leste do Vale de Aburrá, no lado sudeste da cordilheira central dos Andes na região de Antioquia. (Hermelin *et al.*, 1992), perto da estrada que conduz de San Carlos para Medellín entre os 1100 e 2200 msnm. A bacia encontra-se em jurisdição do povoado de San Carlos e faz parte da rede de drenagem que alimenta o embalse Punchiná da Central Hidroelétrica de San Carlos. (Colonia García, 1995)



**Figura 4.1** Localização do município de San Carlos no estado de Antioquia na Colômbia.

*La Arenosa* faz parte das bacias mais altas do Rio San Carlos que é formado pela confluência dos rios *La Arenosa*, *Betulia* e *Alejandro*. Ela conta com uma extensão de 9.91 km<sup>2</sup>. (Aristizábal, 2013).

A bacia “*La Arenosa*” tem um clima tropical úmido, está localizada dentro de uma zona muito úmida da região do *Magdalena Médio*, com chuvas anuais medias de 3000 mm. Esta faixa da cordilheira central é uma zona de condensação dos aires cálidos e muito úmidos que ascendem pelas vertentes lestes do vale do Magdalena. A precipitação incrementa notavelmente até as bordas do maciço com medias entre 4000 y 5000 mm anuais. Em geral as precipitações ocorrem preferivelmente a tarde ou a noite e se apresentam como chuvas de curta duração. As frequências de estas precipitações se devem ao fluxo constante de massas de ar quente carregadas de umidade provenientes do vale do rio Magdalena. O gradiente de temperatura está relacionado com o relevo e tem valores anuais entre 17° e 25° graus. (Colonia García, 1995). As temporadas de chuva no ano são em setembro até novembro e em março até maio e a temporada seca com o mínimo de chuvas em julho. (Aristizábal, 2013).

Geologicamente a bacia é praticamente homogênea constituída quase na sua totalidade por rochas do tipo quartzodioritas e granodioritas do Batolito Antioqueño de idade cretácica superior, definido por um corpo de rochas intrusivas. Como resultado de processos de intemperismo e erosão está conformado por solos com espessuras entre 3 e 20 m. O saprolito é bem gradado sendo areia siltoso até siltes arenosos com algumas gravas e baixos conteúdos de argila.

#### **4.1- TORMENTA NA BACIA LA ARENOSA SETEMBRO 21 DE 1990.**

Um evento sem precedentes na área de estudo de curta duração, mas de alta intensidade afetou a bacia La Arenosa o dia 21 de setembro de 1990. Em menos de 3 horas uma chuva de 208 mm deflagrou inúmeros escorregamentos. Esse evento é considerado único levando em conta o elevado número de deslizamentos que foram deflagrados.

Esse evento gerou 20 óbitos e 260 pessoas desabrigadas, 27 casas foram destruídas e outras 30 foram seriamente danificadas, inúmeras pontes e algumas estradas foram afetadas além da hidroelétrica de San Carlos, onde a planta de energia Calderas foi danificada pelos blocos transportados pelo rio “*La Arenosa*”. As perdas totais estão estimadas em mais de US \$6 milhões. (Hermelin *et al.*, 1992).

Os dois meses precedentes foram registrados aproximadamente 621 mm de chuva. A análise estatística da chuva história feita por Mejía & Velásquez (1991), indicou que o evento do dia 21 de Setembro de 1990 foi excepcional de acordo com os indicadores do Rio San Carlos num período de retorno de 200 anos.

A análise posterior ao evento de interpretação aérea de fotos e pesquisas no campo permitiram uma reconstrução parcial da quantidade e principais características dos escorregamentos apresentados no evento. Integral S.A., (1990) e Mejía & Velásquez, (1991), ofereceram um inventário detalhado e uma descrição dos eventos deflagrados por essa chuva. De acordo com o reporte de Integral 1990, não existiam fotos nem topografia da área completa, razão pela qual não foi possível estabelecer a quantidade total de escorregamentos causados pelo evento. Contudo o inventário e a descrição cobrem cerca do 70% da bacia.

Na bacia La Arenosa, 699 escorregamentos foram reportados, todos classificados como deslizamentos de solo e fluxos de detritos e lama de velocidade entre muito rápida e extremadamente rápida com grande quantidade de água.

#### **4.2- METODOLOGIA**

Primeiramente são calculados e obtidos todos os mapas requeridos como dados de entrada, que são apresentados no Capítulo 4. Análises e Resultados. Foi escolhido o evento de chuva apresentado acima para a calibração final do modelo.

O código foi modificado e adaptado para uma outra rotina estatística desenvolvida nesta pesquisa.

O código foi programado para fazer o balanço hidrológico e encontrar a altura do lençol freático enquanto faz uma primeira análise geotécnica onde calcula o mapa de susceptibilidade que vai ser independente dos eventos de chuva. Depois vem a segunda corrida da análise geotécnica, onde é calculada a altura crítica do lençol freático, para finalmente realizar um comparativo, onde as células que pelo menos atinjam esse valor crítico vão falhar. Finalmente é feita uma análise estatística para cada uma das células onde é calculada a probabilidade do valor de lençol freático atingir o valor crítico para as células potencialmente instáveis que ainda não falharam.

Como resumo geral apresenta-se na Figura 4.2 a representação do funcionamento do modelo SHIA\_LandSlide Probabilístico, que é o embasamento do código SHIA desenvolvido por Vélez (2000), que foi adaptado por Aristizabal (2013) para à abordagem determinística do modelo de estabilidade de encostas (SHIA\_LandSlide), e que finalmente foi acrescentado nesta pesquisa com a inclusão no código da abordagem probabilística.

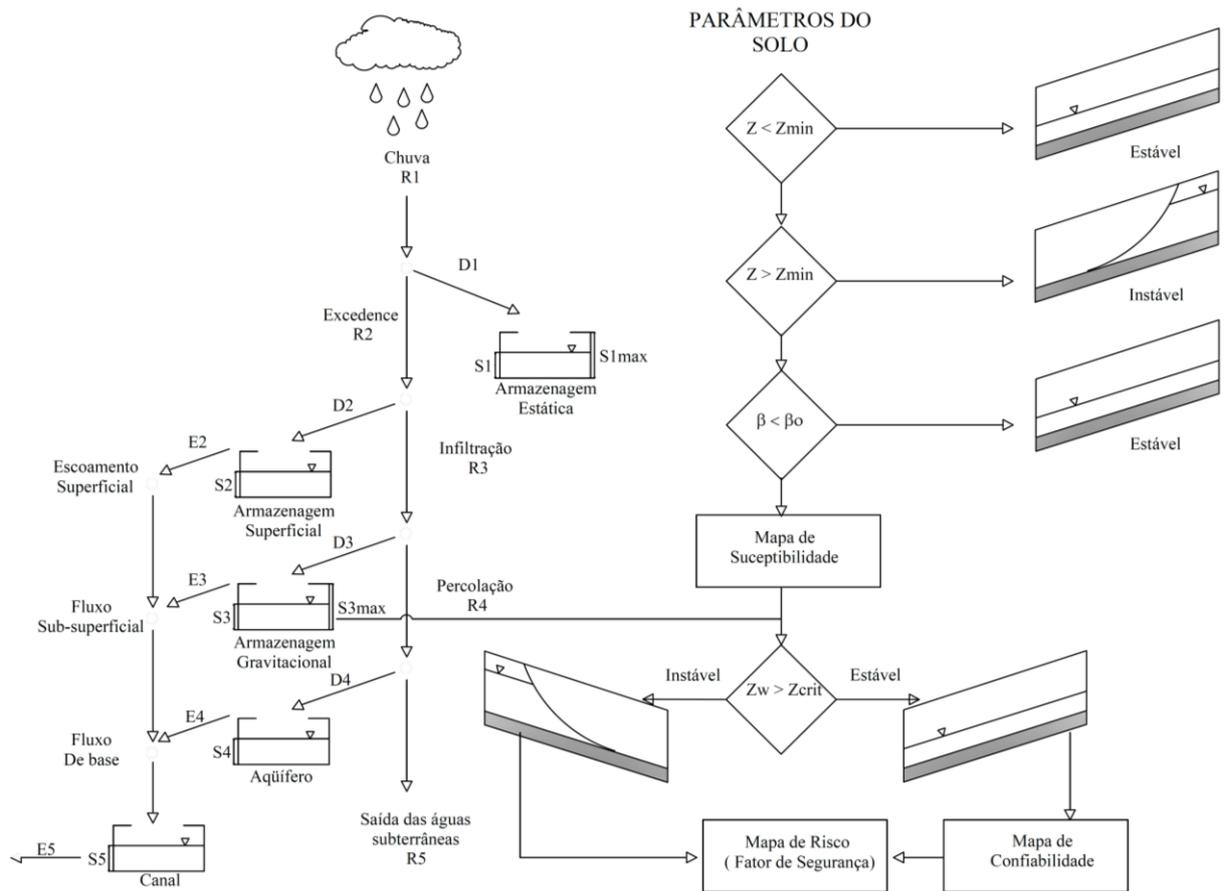


Figura 4.2 Modelo SHIA\_Landslide Probabilístico (Modificado de Aristizábal, 2013)

## **5- ANÁLISES E RESULTADOS**

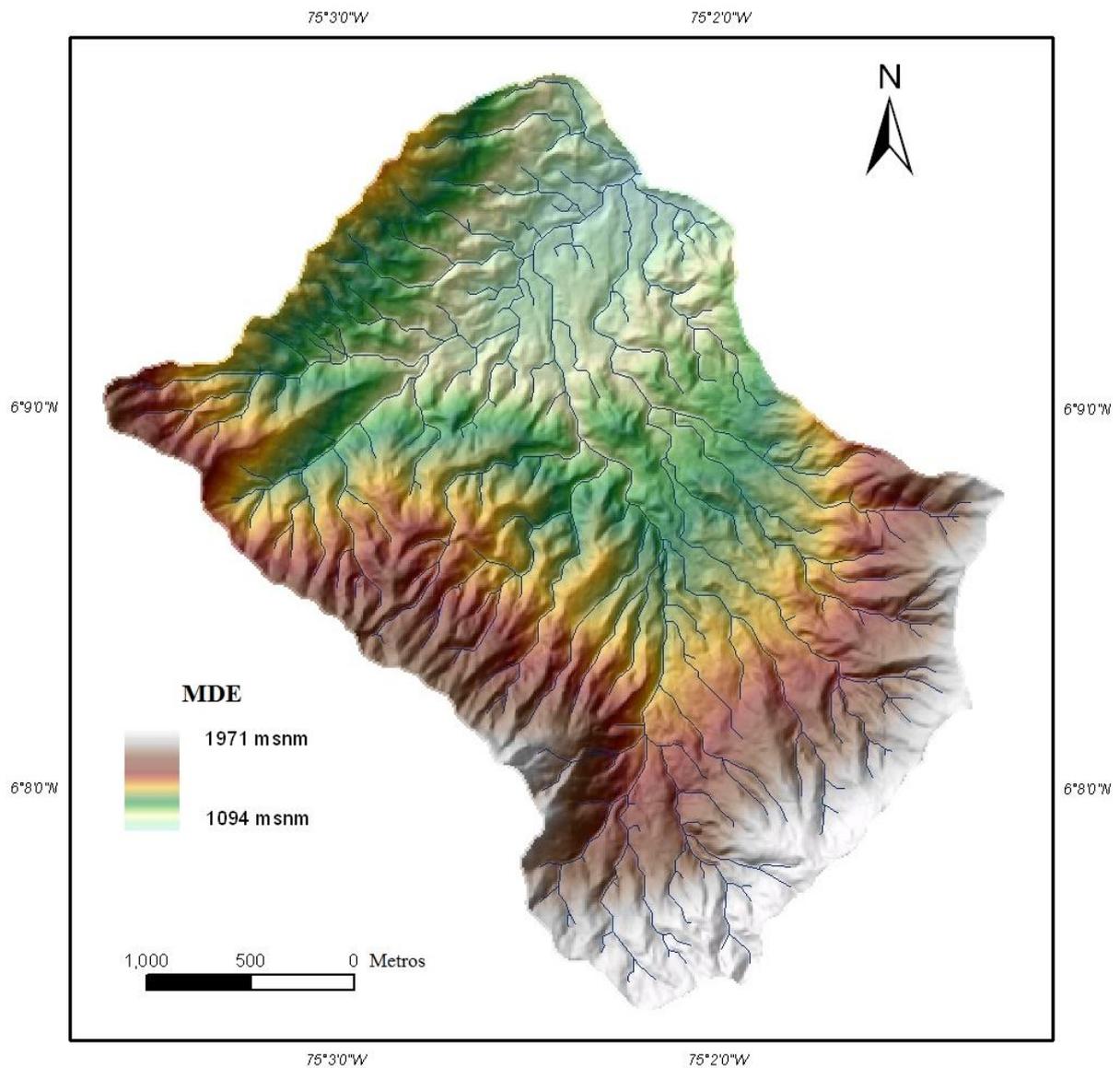
### **5.1- MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT)**

É uma estrutura numérica de dados que representam a distribuição espacial de uma variável quantitativa contínua que representa o terreno em estudo, nesse caso a bacia do riacho “*La Arenosa*”, as curvas topográficas têm uma precisão de 1:10000 com as quais foi possível gerar o modelo digital de elevações (MDE).

De acordo com o MDT, a área de trabalho foi dividida num raster de grade regular de elementos quadrados de 10 m de lado. A matriz do arquivo DEM tem um tamanho 436 colunas e 456 filas, para um total de 198.360 pixels, onde 98.646 pixels compõem a bacia La Arenosa. A partir dessa informação podem ser calculados com ajuda de ferramentas hidrológicas do ArcGIS 10.1 parâmetros como declividade do terreno, mapa de direções, mapa de acumulação de drenagem entre outros apresentados adiante.

#### **5.1.1- Modelo digital de elevação (MDE)**

A Figura 5.1 mostra o DEM ajustado à bacia La Arenosa. As altitudes têm uma faixa entre 1094 e 1971 m.s.n.m. A maior elevação apresenta-se na parte S-SE e a menor na parte S-SE, drenando do Sul ao Norte.

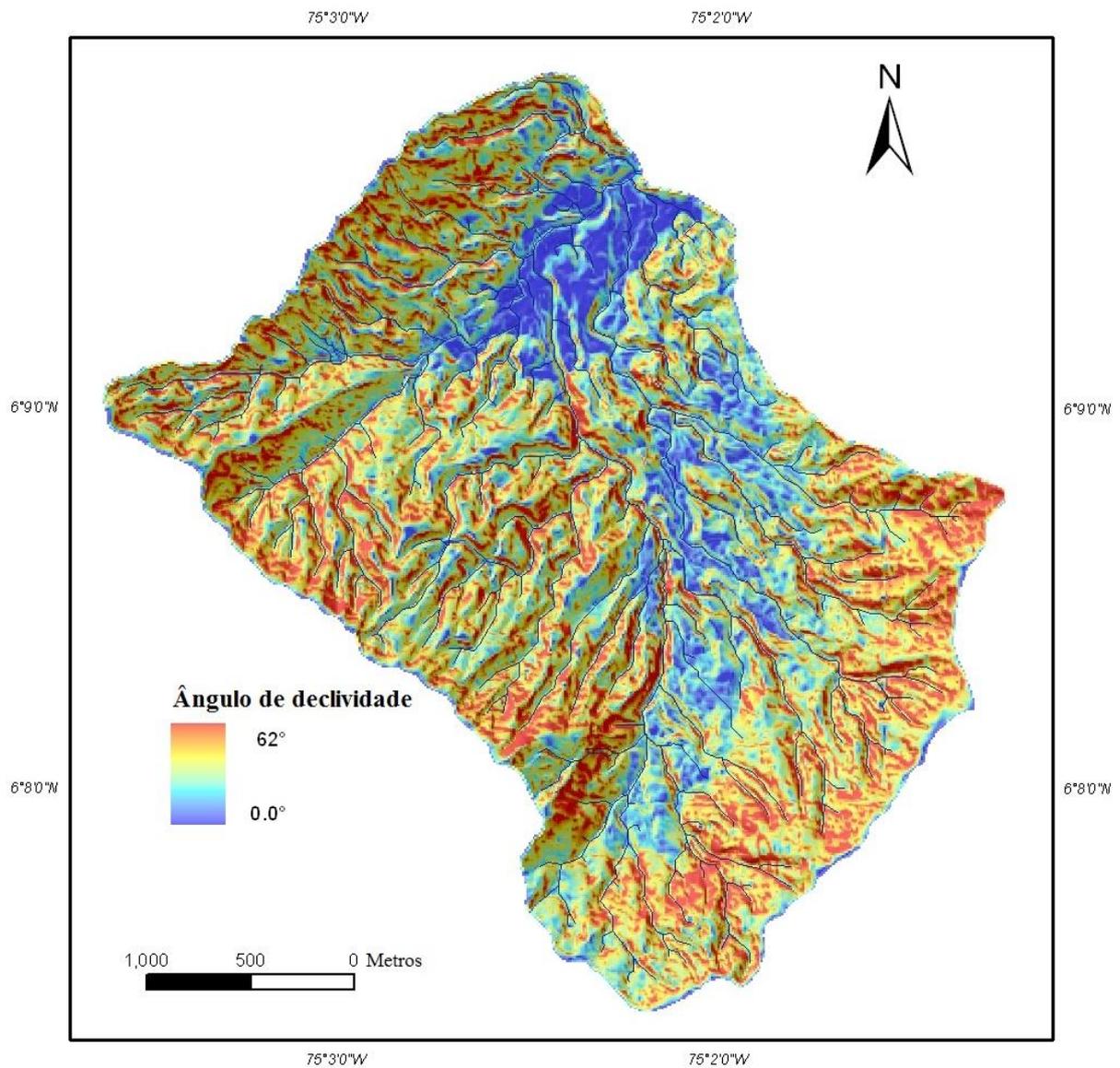


**Figura 5.1 Modelo digital de elevação (MDE) da bacia La Arenosa (Modificado de Aristizábal, 2013)**

### 5.1.2- Mapa de declividade

Os deslizamentos em massa são definidos como processos gravitacionais, é por isso que a declividade é um fator muito importante para o estudo dos escorregamentos. O mapa de declividade é apresentado na Figura 5.2

As declividades mais íngremes estão representadas pelas cores vermelhas e laranjas e as mais suaves são representadas pelas azuis. Embora o modelo SHIA\_LandSlide precisa o mapa de entrada em radianos as declividades estão em uma faixa de 0° até 62°. Ainda que no mapa pode-se observar uma grande parte verde, a bacia é predominantemente íngreme, e as partes mais planas estão perto do Rio La Arenosa.



**Figura 5.2** Mapa de declividade da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013)

### 5.1.3- Mapa de direção de fluxo

O mapa de direção de fluxo determina a direção da drenagem natural de cada uma das células de acordo com o MDE. A Figura 5.3 apresenta o mapa de direção do fluxo da bacia La Arenosa exibindo que a bacia tem uma drenagem preferencial na direção Norte a Noroeste.

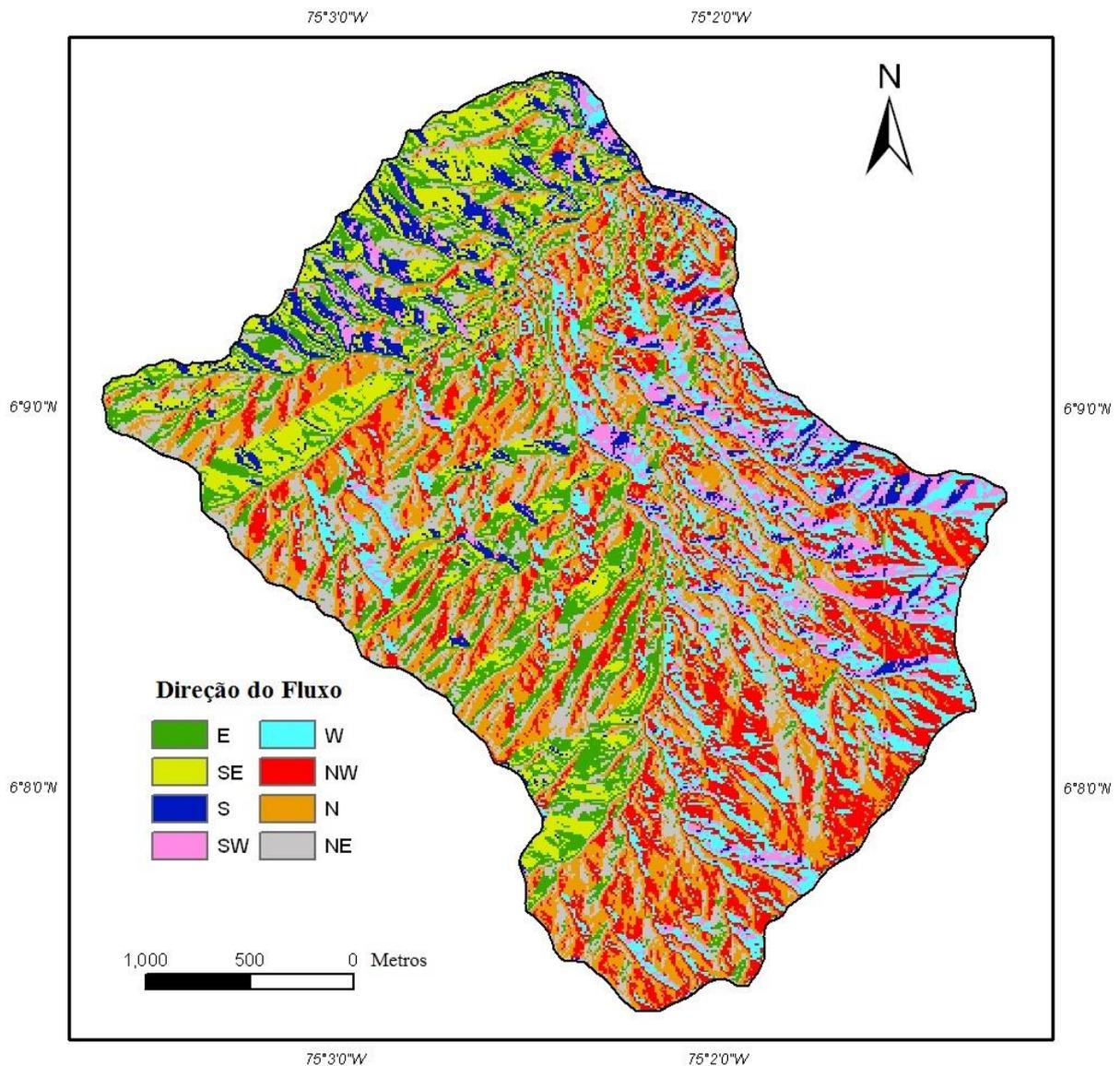
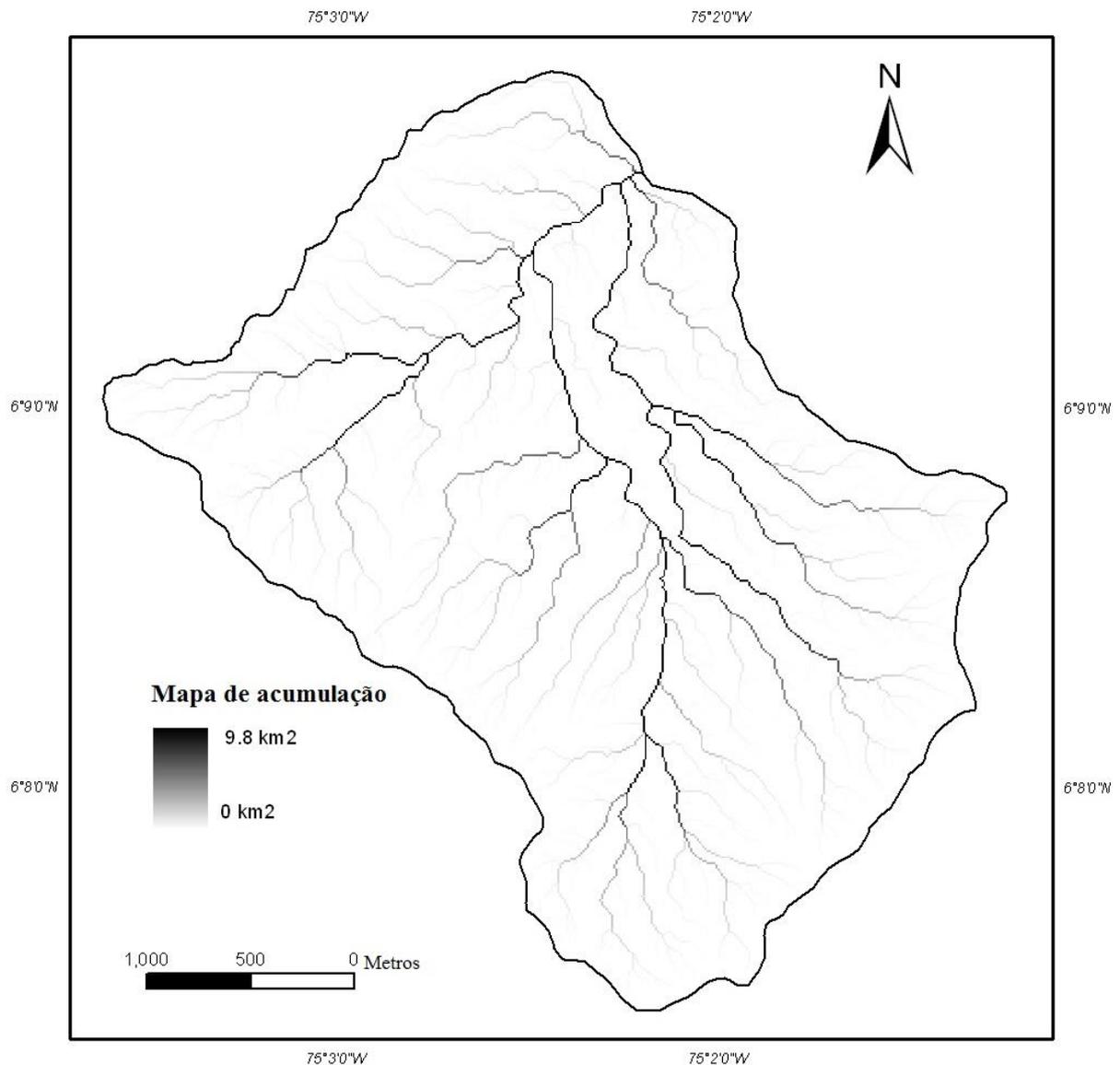


Figura 5.3 Mapa de direção do fluxo da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013)

#### 5.1.4- Mapa de acumulação

É baseado no mapa de direção de fluxo, correspondente à área de drenagem de cada célula ou como seu nome indica a área onde o fluxo se concentra ou acumula. SHIA\_LandSlide usa o máximo de direções de drenagem de cada célula, assim o número de células que contribuem numa área determina a área total de acumulação. A área de máxima acumulação corresponde a o ponto mais baixo, onde o sistema hidrológico é fechado. Na Figura 5.4 mostra-se o mapa de acumulação.



**Figura 5.4** Mapa de acumulação da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013)

## **5.2- PROPRIEDADES DO SOLO**

De acordo com a origem dos solos podem-se inferir algumas das suas propriedades, porque o material parental é o responsável pelas principais características dos mesmos. Embora a escala geológica seja muito grande, ela permite fazer muitas simplificações tais como uma unidade seja considerada homogênea nas suas propriedades tanto hidrológicas quanto geotécnicas. A geologia da bacia é definida por dois tipos de solo que foram definidos pelo Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2007a) e é apresentada na Figura 5.5 Mapa de solos da bacia La Arenosa

Para cada unidade geológica, foi construído um perfil estratigráfico detalhado do qual estão baseados os parâmetros hidrológicos e geotécnicos empregados. Os perfis são apresentados a continuação nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

### 5.2.1- Unidades cartográficas dos solos

Este mapa é associado à agronomia e à classificação taxonômica do solo da bacia La Arenosa, e contém as seguintes associações apresentadas na Figura 5.5. Associação Yarumal (YAe1-YAf2) e Associação Poblano (POc1), segundo IGAC, (2007a).

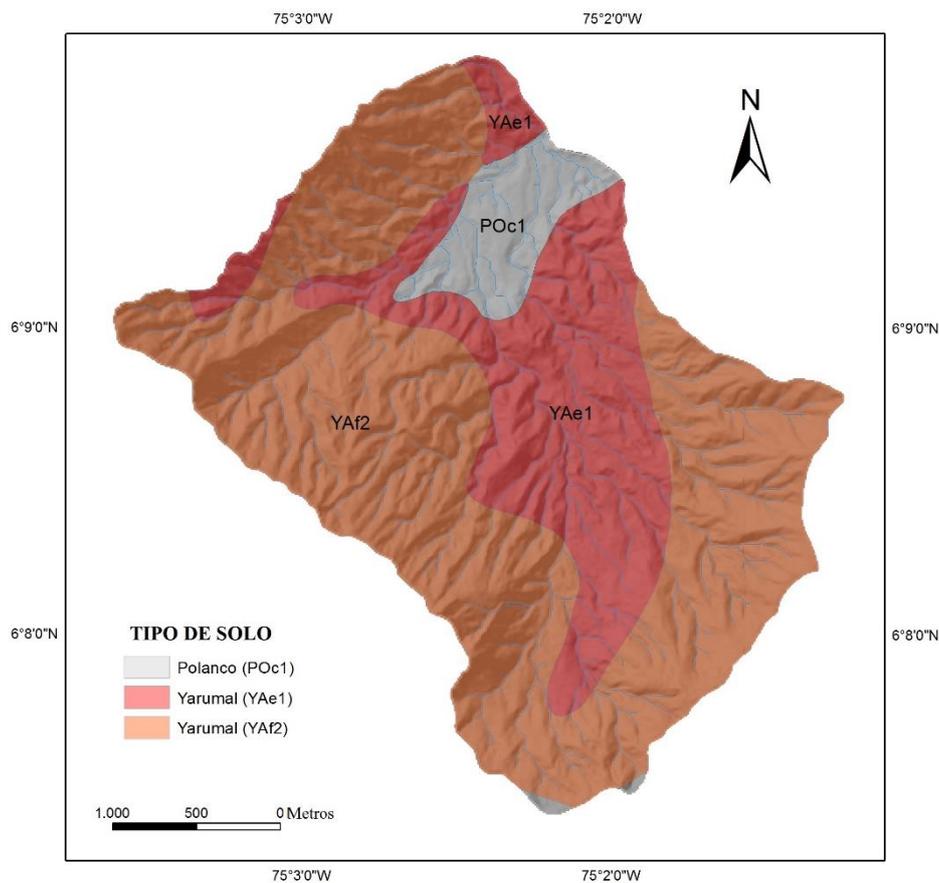


Figura 5.5 Mapa de solos da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013)

A continuação são apresentadas as diferentes associações que compoem a bacia La Arenosa.

- **Associação Yarumal (YAe1-YAf2).** Os solos tem-se formado principalmente de rochas ígneas (Quarzodioritas e granitos) com cinzas vulcânicas, especialmente em os locais com declividades leves na parte alta da bacia. Solos de texturas finas e apresentam alta permeabilidade.

A classificação taxonômica dos solos associados é: Typic Hapludands (35), Humic Dystrudepts (25), Typic Dystrudepts (25) e Hidric Hapludands, e Typic Kandiuults Dystrudepts Oxíco cada uma com (5). A granulometria dos solos é apresentada na Tabela 5.1.

Esta associação cobre o 93.32% da bacia correspondente a 924.37 ha.

**Tabela 5.1 Profundidade e tamanho de partícula do perfil de solo na Associação Yarumal**

Classificação Taxonômica	Porcentagem	Profundidade (cm)		Granulometria		
				Areia	Silte	Argila
TypicHapludands	35	0	25	56	28	16
		25	50	60	24	16
		50	65	44	24	32
		65	130	42	24	34
HumicDystrudepts	25	0	10	63	12	25
		10	20	56	32	12
		20	35	45	39	16
		35	50	40	38	22
		50	110	49	28	23
TypicDystrudepts	25	0	33	55	23	22
		33	60	57	25	18
		60	75	52	22	26
		75	140	37	23	40
HidricFulvudands	5	0	26	70	26	4
		26	42	78	19	3
		42	90	83	15	2
		90	120	85	13	2
OxicicDystrudepts	5	0	15	50	17	33
		15	50	46	11	43
		50	120	44	9	47
		120	150	47	10	43
TypicKandiuults	5	0	20	35	36	29
		20	32	31	24	45
		32	106	31	30	39
		106	140	37	24	39

- **Associação Poblano (POc1).** Este tipo de solo cobre 66.14 há da área da bacia correspondente ao 6.68% da área total. Os solos desta associação tem sido desenvolvidos de depósitos heterométricos misturados com coluviões e materiais aluviais. Estes solos são classificados entre profundos e moderadamente profundos limitados pela presença de fragmentos de rocha e brita. Estes são bem drenados de textura finogranular com uma evolução pedológica pobre com uma estrutura particular nos horizontes superiores.

A classificação taxonômica dos solos associados é Humic Dystrudepts (35), Oxic Dystrudepts (20), Fluventic Dystrudepts (20), Inceptic Hapludox (5), Typic Hapludolls (5), Typic Eutrudepts (5), Typic Udorthents (5) e Andic Dystrudepts (5). A granulometria dos solos é apresentada na Tabela 5.1

**Tabela 5.2 Profundidade e tamanho de partícula do perfil de solo na Associação Poblanco**

Classificação Taxonômica	Porcentagem	Profundidade (cm)		Granulometria		
				Areia	Silte	Argila
<b>HumicDystrudepts</b>	35	0	20	40	38	32
		20	70	36	32	32
<b>OxicDystrudepts</b>	20	0	20	47	24	28
		20	40	43	20	37
		40	75	42	20	38
		75	140	48	24	28
<b>FluventicDystrudepts</b>	20	0	20	19	30	51
		20	70	11	28	61
		70	150	12	35	53
<b>IncepticHapludox</b>	5	0	25	51	18	30
		25	45	52	16	32
		45	80	43	14	42
		80	120	42	20	38
<b>TypicHapludolls</b>	5	0	20	49	25	25
		20	40	62	19	19
<b>TypicEutrudepts</b>	5	0	30	30	38	32
		30	55	24	30	46
		55	75	18	30	52
<b>TypicUdorthents</b>	5	0	20	23	39	38
		20	120	35	44	21
		120	150	10	44	46
<b>Andic Dystrudepts</b>	5	0	44	41	26	33
		44	70	41	20	39
		70	104	17	28	54

### 5.2.2- Cobertura

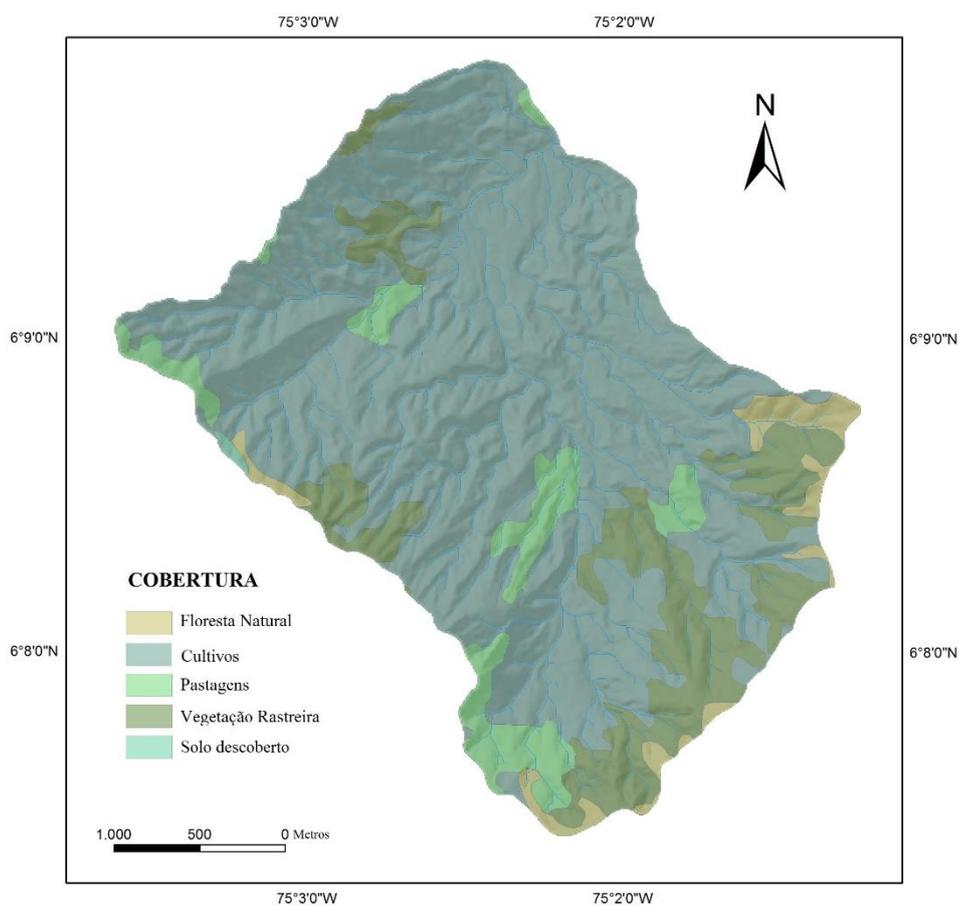
O mapa de cobertura é usado para a definição da profundidade de raiz das plantas, que é um fator muito importante para o tanque de armazenamento estático do modelo SHIA, porque está relacionado com a capacidade desse tanque. Na Figura 5.6 apresenta-se o mapa de cobertura realizado pelo IGAC, (2007b). De acordo com a informação a bacia La Arenosa é ocupada na maioria por plantações correspondentes ao 73% da área total da bacia, seguido pela vegetação

rastreira com um 16%, depois estão os pastos naturais com 8%, seguida da floresta natural com 3% e finalmente o solo descoberto ocupa um 0,16%.

A Tabela 5.3 contém a profundidade de raiz para cada tipo de cobertura de acordo com o IGAC, (2007b).

**Tabela 5.3 Profundidade de raiz a partir da cobertura do solo**

<b>Cobertura</b>	<b>Há</b>	<b>%</b>	<b>Profundidade de Raiz (cm)</b>
<b>Floresta Natural</b>	32,24	3,26	150
<b>Plantação</b>	726,35	73,33	80
<b>Pastos Naturais</b>	75,83	7,66	60
<b>Vegetação Rastreira</b>	154,45	15,59	100
<b>Solo Descoberto</b>	1,62	0,16	0



**Figura 5.6. Mapa de cobertura da bacia La Arenosa. (Modificado de Aristizábal, 2013)**

### 5.2.3- Parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos, representam as propriedades do solo que finalmente vão dar conta do comportamento e da resistência do mesmo. Esses parâmetros não são constantes e dependem de muitos fatores como são a origem da sua formação, dos niveles de tensões aos quais está submetido entre outros. Entre os principais parâmetros temos.

- **Coesão (c).** De acordo com estudos prévios elaborados por Mejía & Velásquez, (1991), a coesão nas formações presentes na bacia em estudo está entre 5 kPa e 12.5 kPa, de acordo com os valores reportados na literatura para solos intemperizados de rochas graníticas. Para os depósitos aluviais compostos por areias e britas a coesão assumida foi de 1 kPa.
- **Ângulo de Atrito ( $\phi$ ).** Os ângulos de atrito para solos residuais na bacia La Arenosa estão na faixa de 16° até 24° de acordo com os resultados dos ensaios realizados por Mejía & Velásquez, (1991). Os solos correspondentes aos depósitos aluviais não contaram com ensaios de laboratório, mas pelas suas grandes declividades é possível assumir bons parâmetros na literatura, pelo seu alto conteúdo de pedregulhos e cascalhos.
- **Peso específico do Solo Saturado ( $\gamma$ ).** As faixas apresentadas por Mejía & Velásquez, (1991), estão entre 18,00 kN/m<sup>3</sup> até 18,8 kN/m<sup>3</sup>, os pesos unitários secos estão entre 14,3 e 14,9 kN/m<sup>3</sup>. Mas para o modelo foi empregado o peso unitário saturado.

- **Tabela 5.4 Parâmetros geotécnicos empregados. (Tomado de Aristizábal, 2013).**

<b>Formação Superficial</b>	<b>Depósito Aluvial</b>	<b>Solo Residual (YAE1)</b>	<b>Solo Residual (YAF2)</b>
<b>Coesão (kPa)</b>	1	5	5
<b>Ângulo de atrito (°)</b>	34	24	24
<b>Peso unitário do solo saturado (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20	18	18

- **Espessura do Solo Intemperizado (Z).** Foi construído um mapa de espessura do solo a partir do gradiente do mapa de declividade. De acordo com o perfil de solo intemperizado assumido, tem-se uma relação entre a espessura de solo e a declividade da encosta. Para o local de estudo foram tomadas medidas de espessura de solo em campo, depois informação foi interpolada e plotada.

Os faixas da espessura do solo são de 1,2 até 2,8 m onde as menores espessuras foram encontradas nas cristas mais íngrimes, e as maiores espessuras foram encontradas no fundo dos vales onde também são acumulados os depósitos coluviais.

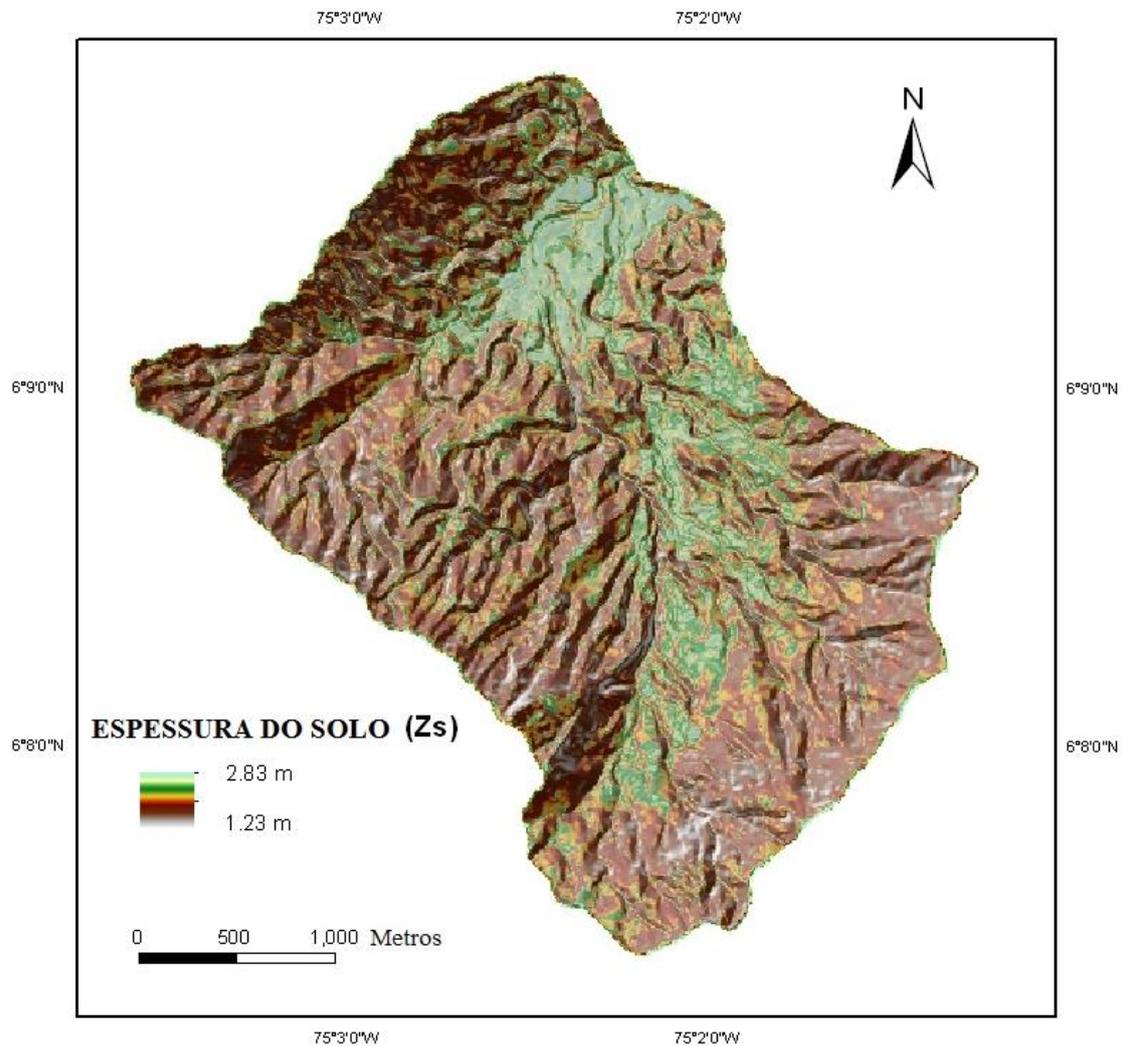


Figura 5.7 Mapa de capacidade máxima de armazenagem estática. (Modificado de Aristizábal, 2013)

### 5.3- PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E HIDROLÓGICAS

As propriedades hidráulicas foram obtidas com a ajuda do software SPAW, (*Soil Water Characteristics Program*), que é um modelo desenvolvido pelo serviço de pesquisa de agricultura (Agricultural Research Service) do departamento de agricultura dos Estados Unidos (USDA), e as propriedades das unidades cartográficas do solo obtidas a partir do mapa de solos fornecido pelo IGAC, (2007a).

Considerando que cada perfil tem diferentes tamanhos de partícula que variam com a profundidade, uma média ponderada foi feita para cada tipo de solo respeitando a porcentagem de cada classificação taxonômica.

### 5.3.1- Armazenagem estática máxima ( $S_{1max}$ )

Corresponde à capacidade máxima do tanque S1 (Vegetação) para o armazenamento da água, que é resultante da diferença entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo, apresentados no Capítulo 3, que foram obtidos com ajuda do software SPAW, ao longo da altura de raiz obtida da cobertura do solo. A capacidade máxima é obtida com uma média ponderada dos armazenamentos máximos de cada horizonte de solo. Na Figura 5.8 é apresentado o mapa da armazenagem estática.

### 5.3.2- Armazenagem gravitacional máxima ( $S_{3max}$ )

A capacidade máxima do tanque gravitacional para armazenamento é dada pela diferença entre o ponto de saturação e a capacidade de campo ao longo do perfil de solo. É representado pela Figura 5.9 e representa a quantidade de água presente no subsolo que vai se movimentar por ação da gravidade.

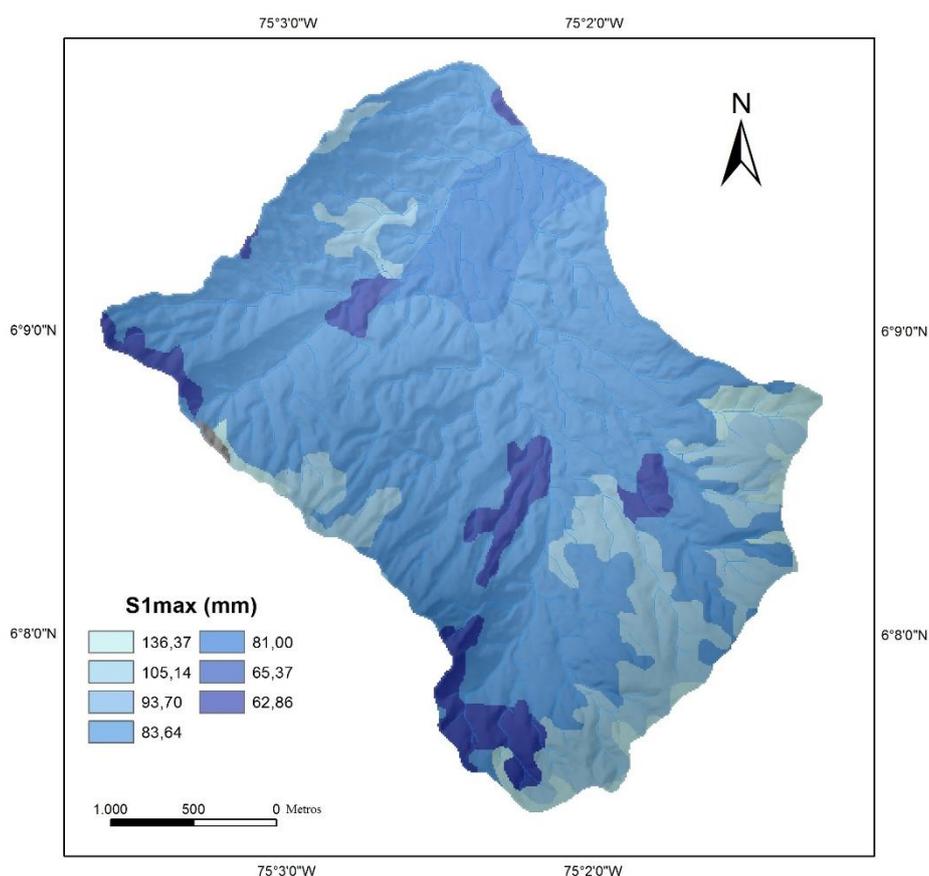


Figura 5.8 Mapa de capacidade máxima de armazenagem estática. (Modificado de Aristizábal, 2013)

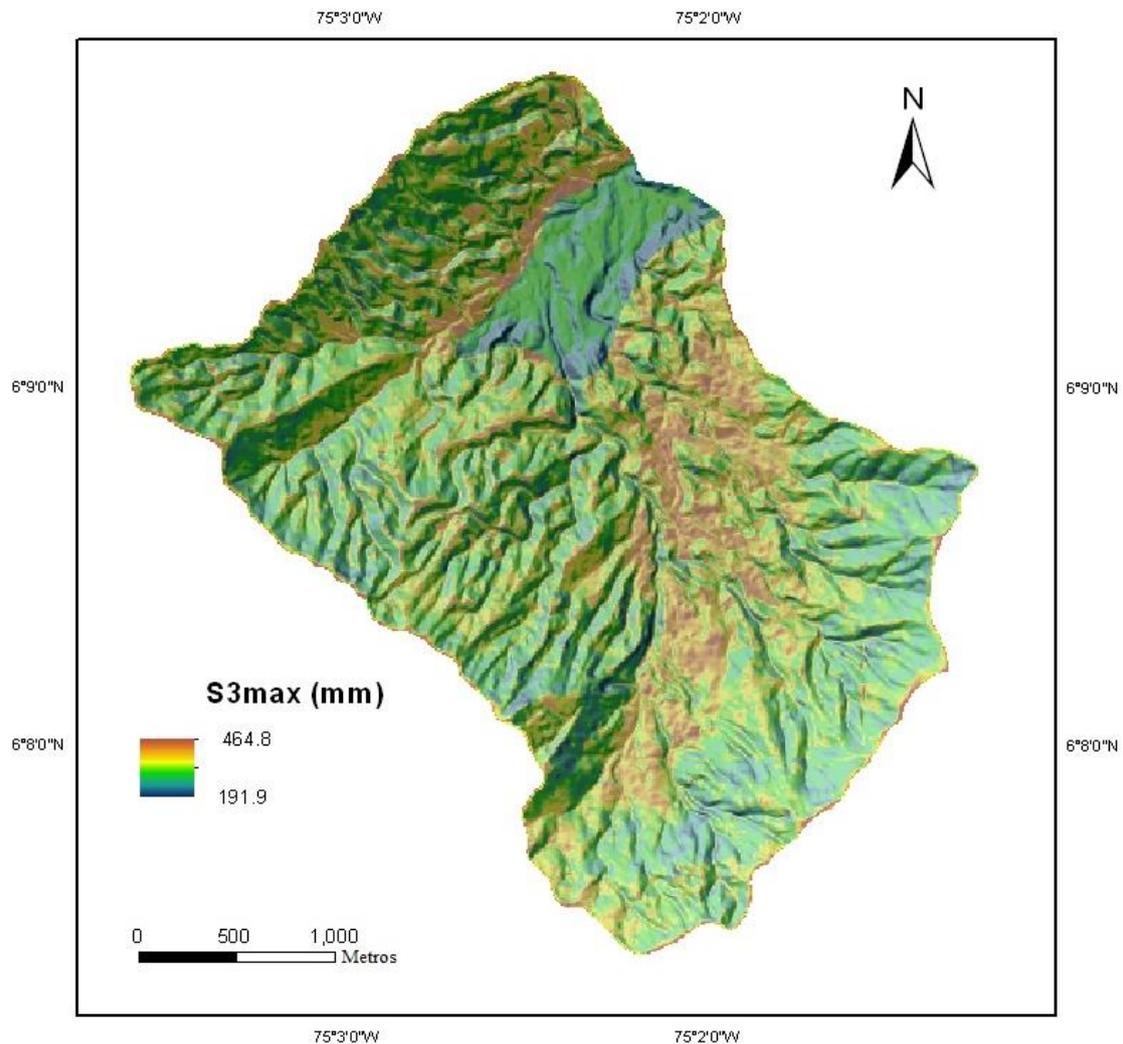


Figura 5.9 Mapa de capacidade máxima de armazenagem gravitacional. (Modificado de Aristizábal, 2013)

### 5.3.3- Condutividade hidráulica saturada ( $k_s$ )

Descreve o movimento da água no meio saturado e o valor inicial é determinado pelo software SPOW a partir do tamanho de partícula do solo levando em consideração uma média ponderada de cada horizonte de solo. A condutividade secundária é considerada em fatores de correção. Os valores de condutividade hidráulica saturada são apresentados na Tabela 5.5

### 5.3.4- Condutividade hidráulica saturada do sub-solo ( $k_p$ )

Não se tem informações na bacia de condutividade hidráulica saturada do subsolo por essa razão foi utilizada a informação dos valores propostos na literatura de permeabilidade para solos residuais e saprólitos derivados de rochas graníticas.

**Tabela 5.5 Parâmetros hidrogeotécnicos empregados. (Tomado de Aristizábal, 2013).**

<b>Formação Superficial</b>	<b>Depósito Aluvial</b>	<b>Solo Residual (YAE1)</b>	<b>Solo Residual (YAF2)</b>
<b>Condutividade Hidráulica saturada (cm/h)</b>	0.479	1.96	1.96
<b>Condutividade Hidráulica do subsolo (cm/h)</b>	0,0799	0,0799	0,0799

### **5.3.5- Evapotranspiração (Evp)**

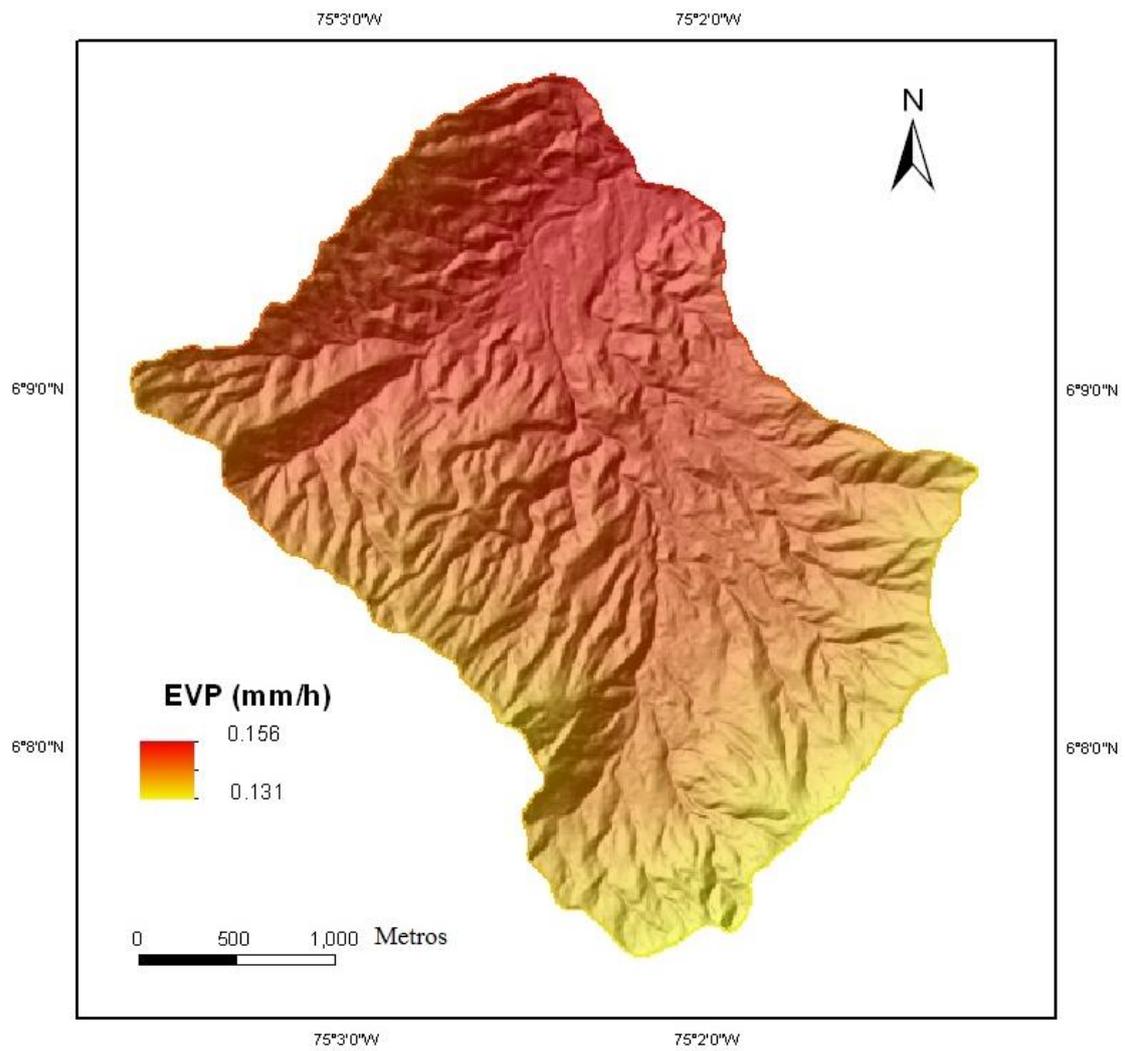
Evapotranspiração pode ser facilmente estimada ou medida. Mas para a área em estudo não foi possível obter medições diretas. Foi estimada usando a equação apresentada por CENICAFÉ (*Centro Nacional de Investigaciones de Café*) (Jaramillo, 1989) para o potencial de evapotranspiração.

$$EVP = 4.658^{(-0,002DTM)} \quad (4.1)$$

onde o DTM corresponde as elevações em metros. A Figura 5.10 apresenta o potencial de evapotranspiração.

### **5.3.6- Histórico de chuvas e vazão**

É usada uma série temporária para definir os valores de chuva de entrada para o modelo. A quantidade de chuva é reportada de hora em hora, em uma interpolação entre as estações Calderas na parte alta da bacia, e a estação La Arenosa, localizada na parte baixa da bacia. A Figura 5.11 junto com a estação de medição da vazão.



**Figura 5.10** Potencial de Evapotranspiração calculada. (Modificado de Aristizábal, 2013)

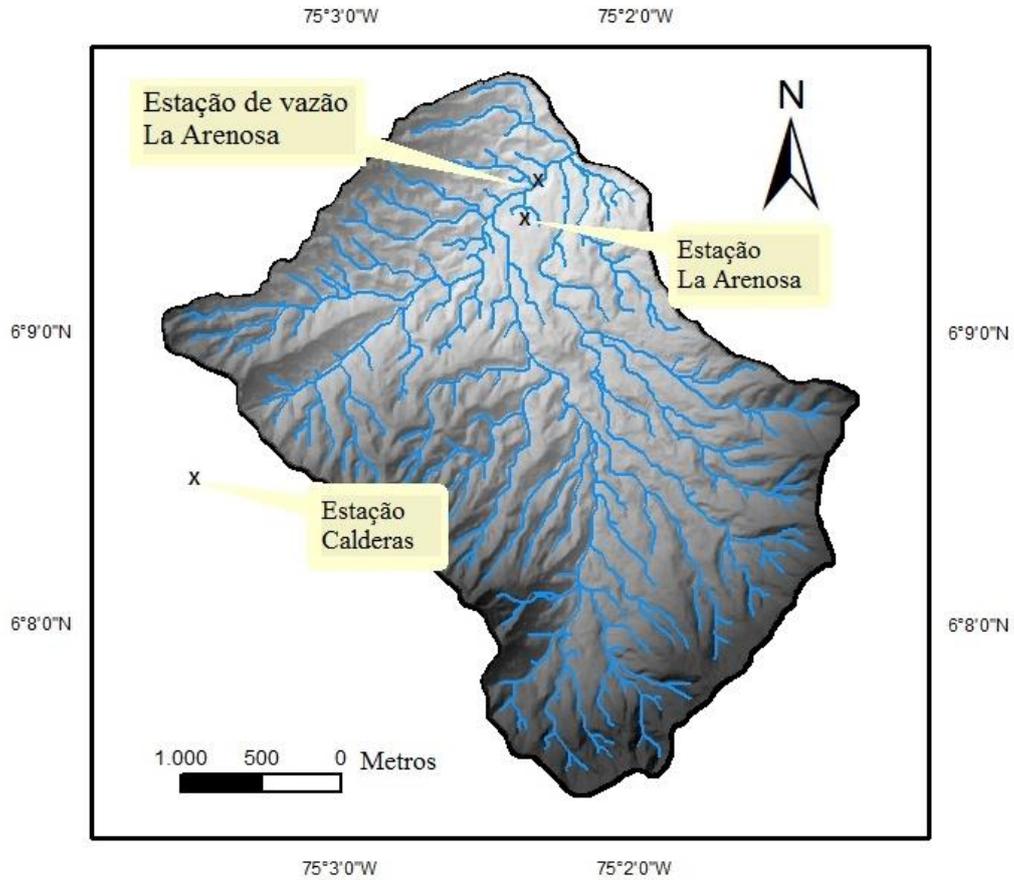


Figura 5.11 Localização das estações Meteorológicas. (Modificado de Aristizábal, 2013)

A chuva a utilizar na calibração e validação do modelo hidrológico é um registro horário entre 2007 e 2012 e é apresentado nas Figura 5.12 e Figura 5.13

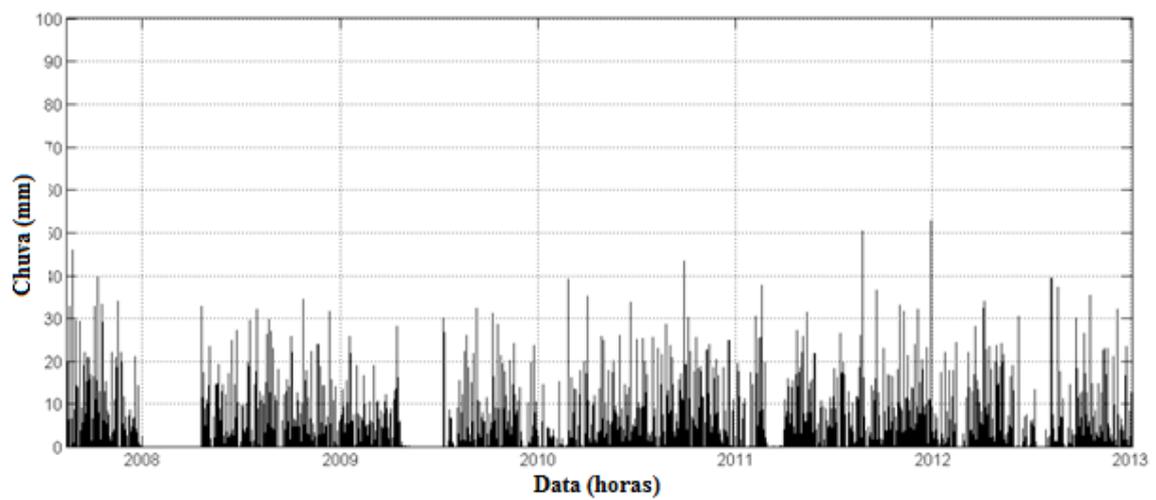
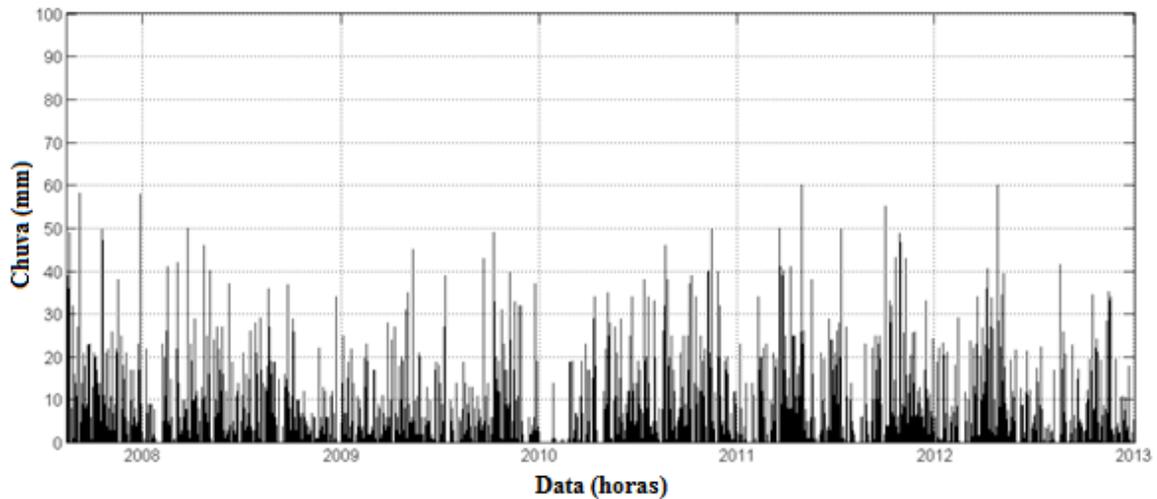


Figura 5.12. Chuva horária da estação Calderas entre agosto de 2007 e dezembro de 2012

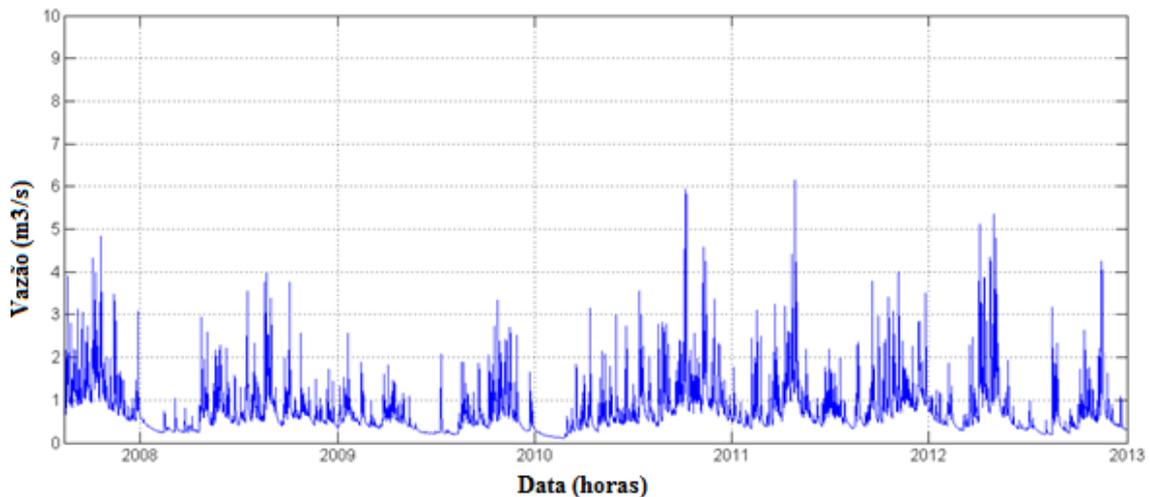


**Figura 5.13 Chuva horária da estação La Arenosa entre agosto de 2007 e dezembro de 2012**

Foram estimados fluxos para o mesmo período de precipitações num mesmo intervalo de tempo. A Vazão de La Arenosa, recebe a vazão da Planta Hidroelétrica do Rio Calderas de ISAGEM, e a descarga da planta está localizada 40 m acima da única estação de medição de vazão da bacia La Arenosa. Essa estação de medição da vazão inclui um sensor de nível de água automático, no entanto ainda não se tem as curvas de vazão associadas aos diferentes níveis do rio. Considerando a falta das curvas de descarga da Planta Calderas foi descartada a possibilidade de utilizar a informação.

Para obter a vazão da bacia, foi empregado um modelo hidrológico chamado TETIS (Modelagem de água, inundações e sedimentos), que tem a mesma concepção do modelo SHIA, cujos parâmetros hidrológicos foram ajustados com a informação regional da bacia Calderas, que é um rio próximo com características similares. O modelo foi calibrado usando um balanço ao longo prazo e uma curva fluxo-duração usando o software HIDROSIG (Análises de variáveis hidrológicas, climáticas y geomorfológicas) implementado por CORNARE para a região em estudo. A Figura 5.14 apresenta a descarga ou balanço ao longo prazo obtida para a bacia La Arenosa. O balanço ao longo prazo foi calculado da seguinte forma, onde P e E são a média da precipitação e da evapotranspiração da bacia.

$$DESCARGA = \int [P(x, y) - E(x, y)] \cdot dA \quad (4.2)$$



**Figura 5.14 Vazão horária simulada para o rio La Arensa entre agosto de 2007 e dezembro de 2012**

Para a calibração geotécnica foi empregado o inventário de deslizamento feito por Mejía & Velásquez, (1991) correspondente ao inventário de cicatrizes da tormenta de Setembro de 1990. Para este período foram empregadas chuvas horárias desde o dia 1 julho até o dia 30 de setembro de 1990. Os dados foram fornecidos por ISAGEN (Companhia de geração de energia).

#### **5.4- VARIÁVEIS ESTATÍSTICAS**

Para o desenvolvimento da componente estatística foram necessários alguns dados como são os valores médios ou esperados das variáveis independentes e os coeficientes de variação a partir dos quais são calculados os desvios padrões e finalmente as variâncias.

As variáveis independentes neste caso são quatro:

1. Coesão: cuja faixa de coeficiente de variação vai a partir de 20 até 80 kPa, no nosso caso os cálculos serão feitos com um coeficiente de variação de 40%
2. Ângulo de atrito: cuja faixa de coeficiente de variação vai a partir de 4 até 20°, no nosso caso os cálculos serão feitos com um coeficiente de variação de 10%
3. Peso específico do solo: cuja faixa de coeficiente de variação é bem menor, a faixa vai a partir de 2 até 8 kN/m<sup>3</sup>, no nosso caso os cálculos serão feitos com um coeficiente de variação de 3%
4. Espessura do solo intemperizado: cuja faixa de coeficiente de variação é de 20 até 80m, no nosso caso os cálculos serão feitos com um coeficiente de variação de 50%

As médias são tomadas dos mapas iniciais de cada uma das variáveis estatísticas, e os coeficientes de variação podem ser modificados pelo usuário na janela principal do programa.

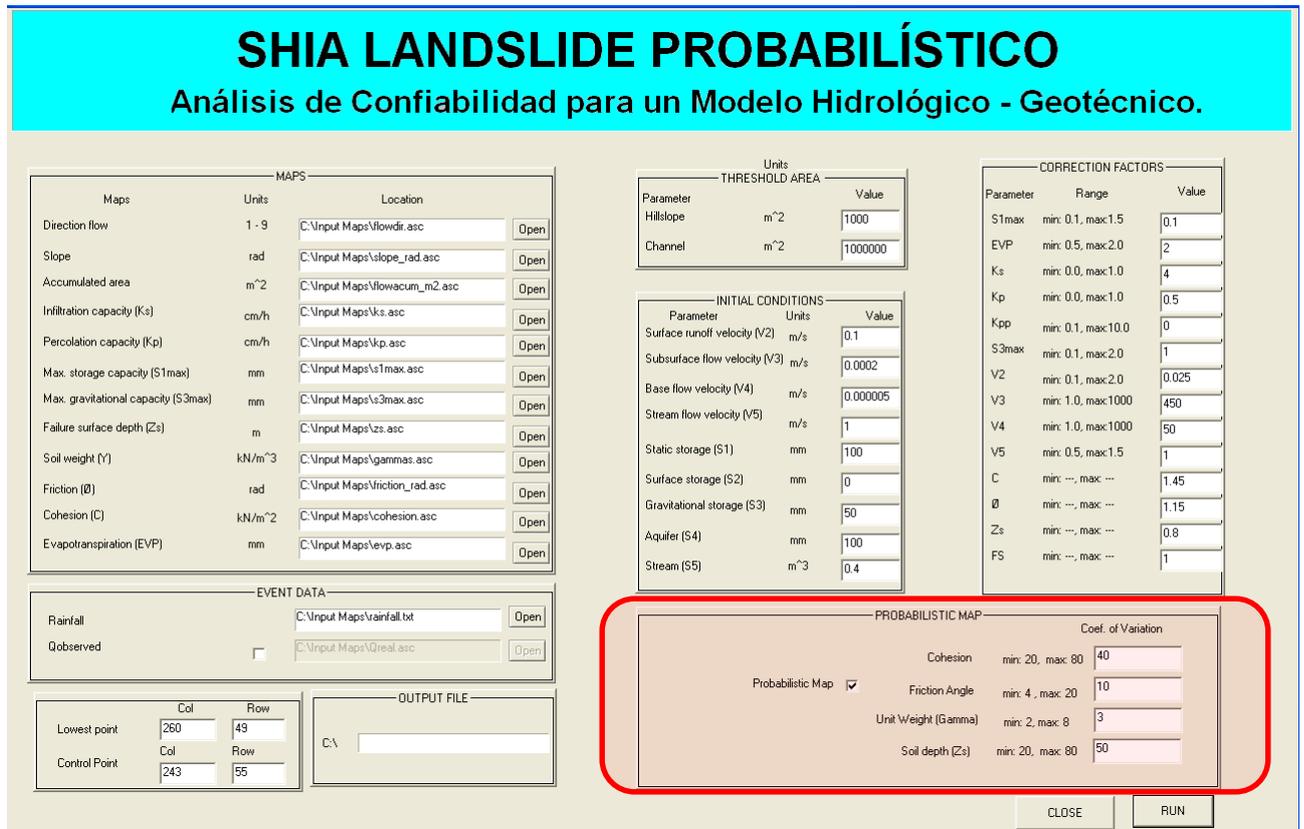


Figura 5.15 Janela principal no programa SHIA\_LandSlide Probabilístico

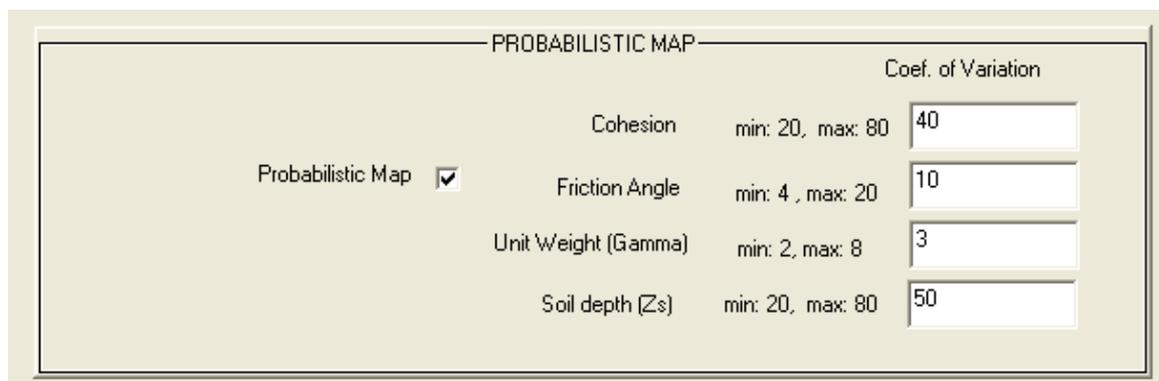


Figura 5.16 Dados estatísticos de entrada no modelo.

O Módulo estatístico deve ser ativado pelo usuário e este vai apresentar valores padrão, mas estes podem-se trocar por os valores que o usuário deseje.

## 5.5- PARÂMETROS GEOMORFOLOGICOS E DE CORREÇÃO PARA O MODELO

### 5.5.1- Parâmetros de correção

A pesar da boa qualidade do conjunto de valores e parâmetros empregados nos modelos, a alta variabilidade dos processos naturais determina a inviabilidade da obtenção de uma parametrização exata.

Os parâmetros geotécnicos e hidrológicos empregados foram ajustados usando parâmetros de correção para reproduzir a vazão natural do rio. É importante destacar que os parâmetros de correção são específicos para cada local de estudo, já que os valores empregados são condicionais para o evento hidrológico simulado, os erros dos dados empregados e para as escalas tanto temporais quanto espaciais de cada bacia.

A Tabela 5.6 apresenta um resumo dos fatores de correção empregados tanto para a abordagem linear quanto a não linear usadas para modelar a poro pressão nas encostas e realizar a análise de estabilidade durante o evento de chuva de setembro de 1990. Pode-se observar que tem uma concordância entre os fatores de correção da abordagem linear e não linear, só o fluxo sub-superficial para o modelo não linear requer um valor maior.

**Tabela 5.6 Fatores de correção usados no modelo**

<b>Parâmetro</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Não linear</b>	<b>Linear</b>
S1max	$C_1$	0.1	1.5	0.1	0.1
<i>EVP</i>	$C_2$	0.5	2.0	2	2
Ks	$C_3$	0.0	1.0	4	4
Kp	$C_4$	0.0	2.0	0.5	0.5
kpp	$C_5$	0.0	10	0	0
v2	$C_6$	0.1	2.0	0.025	0.025
v3	$C_7$	1.0	1000	450	1.2
v4	$C_8$	1.0	1000	50	50
v5	$C_9$	0.5	1.5	1	1
C	$C_{10}$	-	-	1.45	1.45
$\phi$	$C_{11}$	-	-	1.15	1.15
Zs	$C_{12}$	-	-	0.8	0.8
S3max	$C_{13}$	0.1	1.5	1.0	1.0
FS	$C_{14}$	-	-	1	1

### 5.5.2- Condições iniciais

As condições iniciais correspondem aos limites da área de drenagem acumulada, velocidade de saída de fluxo, o conteúdo inicial de água em cada tanque, e a célula de posição para o ponto de controle.

A área de acumulação do fluxo mínima para formar um canal efêmero e a área mínima para formar um canal perene foi selecionada de acordo com o trabalho de campo e à análise feita com o MDT.

Para cada versão do modelo é necessário começar com os valores de velocidade inicial para cada nível de fluxo, escoamento superficial, fluxo sub-superficial e vazão. Para a abordagem não linear esses valores só são considerados na primeira análise, e depois são calculados no processo iterativo utilizando o último valor obtido para cada célula. Pro caso linear as velocidades são consideradas constantes.

Para o conteúdo inicial de água nos tanques é preciso ter um período de regulação para os tanques de dois meses prévios ao caso de estudo no mínimo, as simulações começam com valores razoáveis para o conteúdo de cada tanque obtidos das análises prévias e valores da literatura. Na Tabela 5.7 são apresentados esses valores.

**Tabela 5.7 Condições iniciais (Fonte: Aristizábal, 2013)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Canal Efêmero	1.000 m <sup>2</sup>
Canal Perene	1.000.000 m <sup>2</sup>
Vel. Fluxo superficial	0,1 m/S
Vel. Fluxo Sub-superficial	0.0002 m/s
Vel. Água subterrânea	0.000005 m/s
Vazão	1 m/s
Armazenamento estático	100 mm
Armazenamento Superficial	0 mm
Armazenamento Sub-superficial	50 mm
Armazenamento Subterrâneo	100 mm
Corrente	0,4 m <sup>3</sup>

### 5.6- PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO GERAL DO MODELO

A calibração geral é feita com a finalidade de identificar como o modelo reproduz os dados observados. A calibração do modelo é feita com um processo manual, ajustando os valores dos parâmetros até a informação de saída do modelo coincida o máximo possível com os dados

observados. O ajuste de parâmetros foi feito com o processo de tentativa e erro, o procedimento de calibração ajuda a descobrir o melhor ajuste, embora diferentes resultados possam ser obtidos com diferentes modelos.

A calibração do modelo determinístico foi feita por Aristizábal (2013) considerando dados reais da bacia de boa qualidade em diferentes datas. Infelizmente os dados da tormenta de setembro de 1990 foram insuficientes para fazer a calibração do modelo hidrológico e geotécnico já que no momento da tormenta o rio não tinha controle de vazão, motivo pelo qual a calibração hidrológica foi feita com chuvas de março até maio de 2011 quando a bacia já tinha medição de vazão.

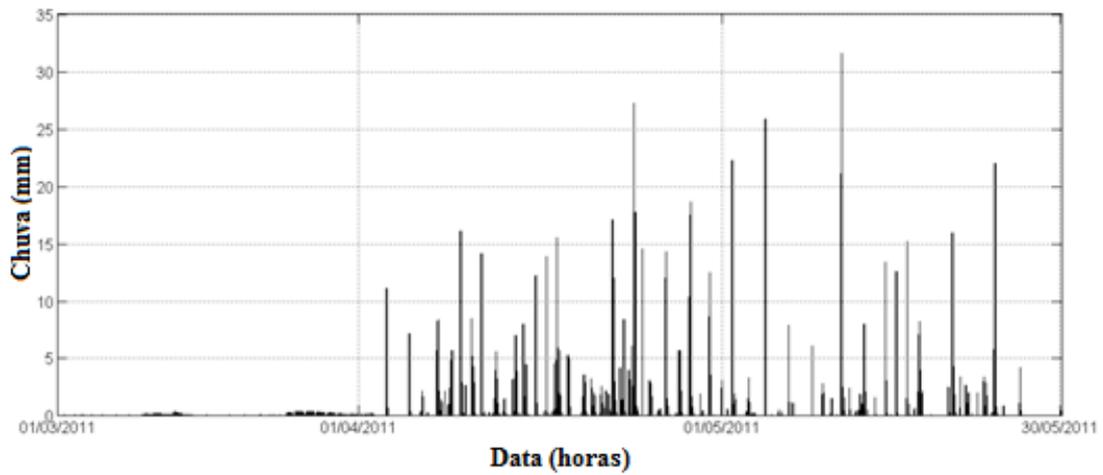
Aristizábal (2013), fez inúmeras análises entre as quais estão quatro períodos de chuvas diferentes, dois empregados no processo de calibração, uma na calibração hidrológica e outra na geotécnica. e as outras duas foram empregadas em validações geotécnicas.

**Tabela 5.8 Períodos de Calibração e validação escolhidas. (Aristizábal, 2013).**

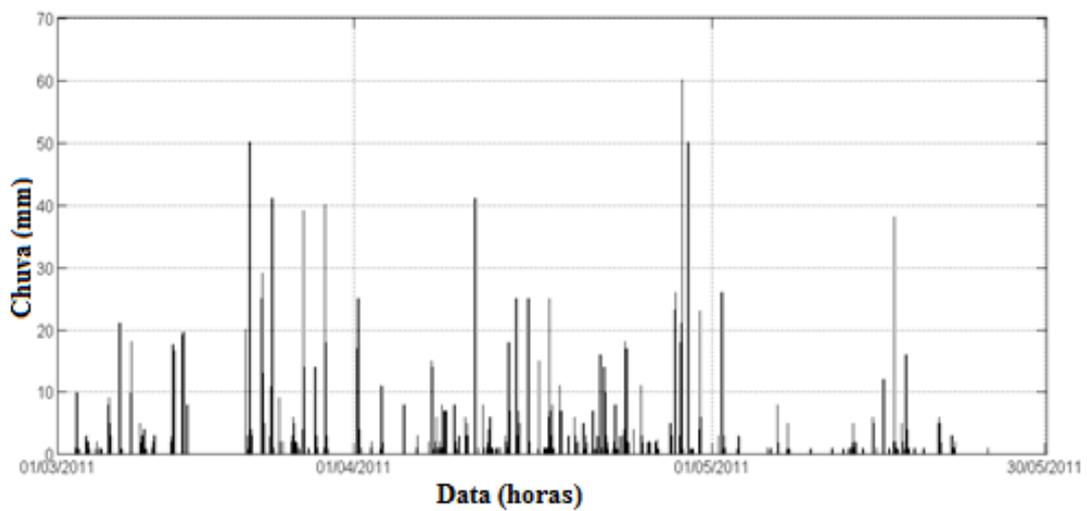
Período	Data Inicial	Data Final	
Período 1	01/03/2011, 00:00 h	31/05/2011, 24:00 h	Calibração Hidrológica
Período 2	01/07/1990, 00:00 h	22/09/1990, 24:00 h	Calibração Geotécnica
Período 3	01/09/2012, 00:00 h	30/11/2012, 24:00 h	Validação Hidrológica e Geotécnica N.1
Período 4	01/09/2007, 00:00 h	30/11/2007, 24:00 h	Validação Hidrológica e Geotécnica N.2

### **5.6.1- Calibração hidrológica (Aristizábal, 2013)**

A primeira calibração do modelo foi a calibração hidrológica tendo em conta as chuvas do primeiro período de estudo desde 01 de março de 2011 até o 31 de maio de 2011 com um MRI de 60 mm/h. As chuvas das estações Calderas e La Arenosa são apresentadas a continuação.

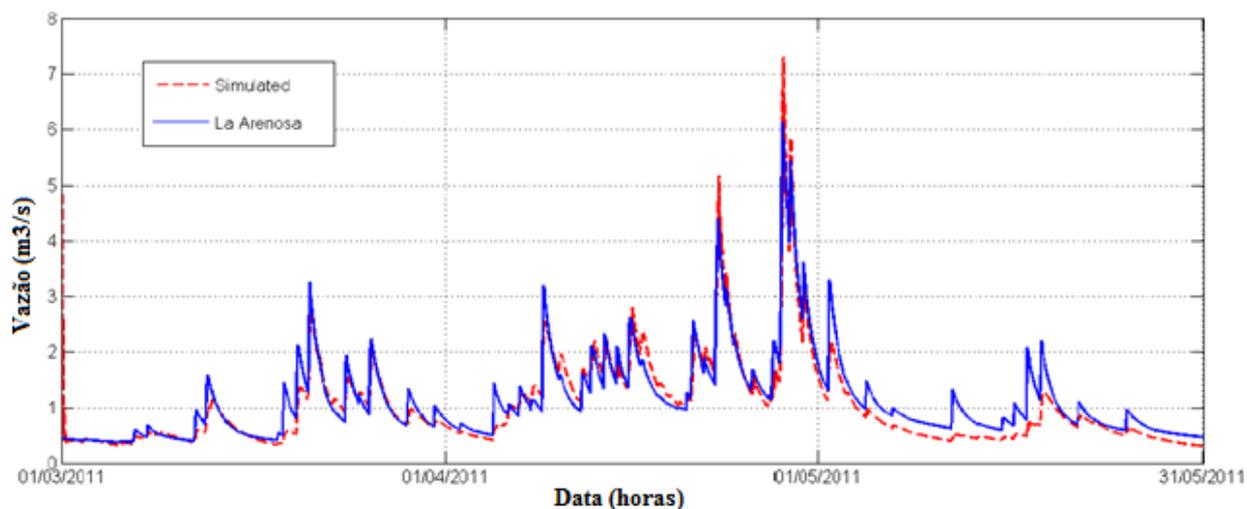


**Figura 5.17 Registro de chuvas na estação Calderas no período de março e maio de 2011**



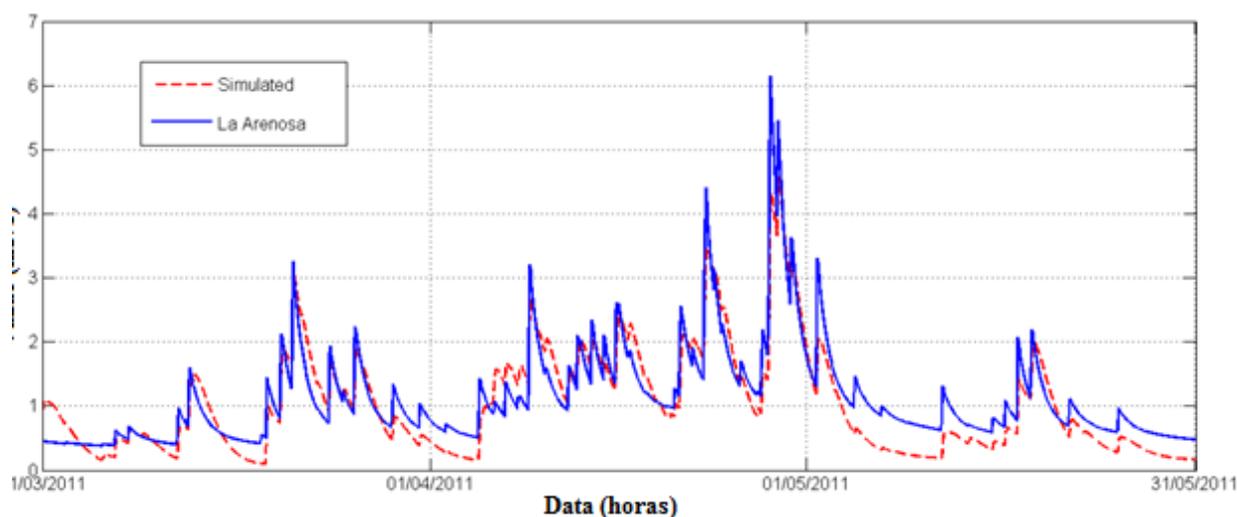
**Figura 5.18 Registro de chuvas na estação La Arenosa no período de março e maio de 2011**

São apresentadas as Figura 5.19 e Figura 5.20 onde são observados os resultados obtidos com o modelo nas abordagens tanto lineares quanto não lineares, elas ilustram a vazão da bacia simulada com o SHIA\_LandSlide comparado com a vazão observada para o período de calibração.



**Figura 5.19** Resultados usando a abordagem não linear no período de calibração do modelo comparado com a vazão na bacia La Arenosa.

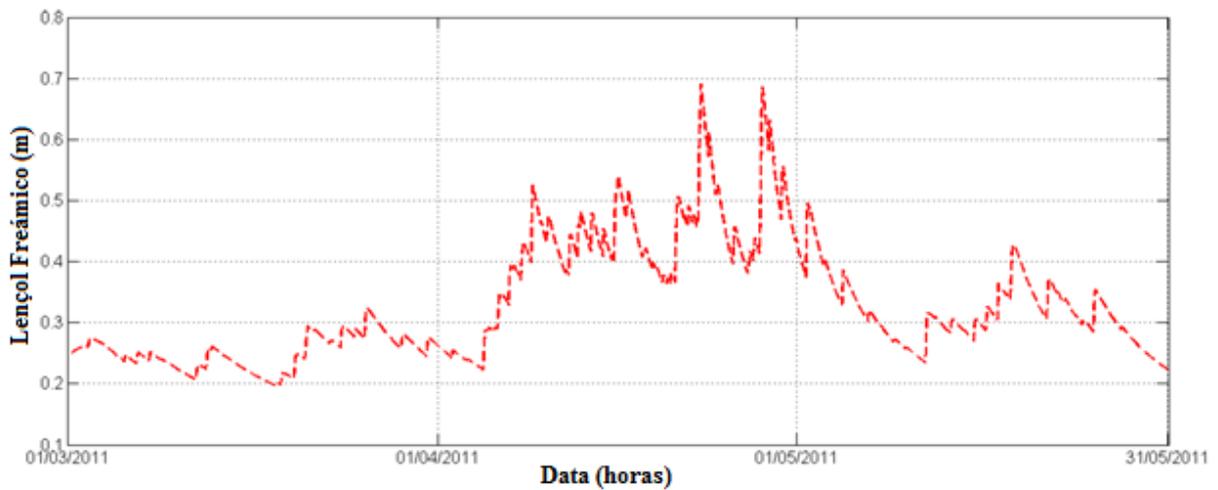
Hidrológicamente, a abordagem não linear simula muito bem os picos e os vales e conserva uma similitude muito maior com a vazão da bacia. A abordagem linear descreve muito bem o comportamento da bacia, mas não é tão preciso quando o modelo não linear, já que tanto os picos quanto os vales são um pouco menores que os reais.



**Figura 5.20** Resultados usando a abordagem linear no período de calibração do modelo comparado com a vazão na bacia La Arenosa.

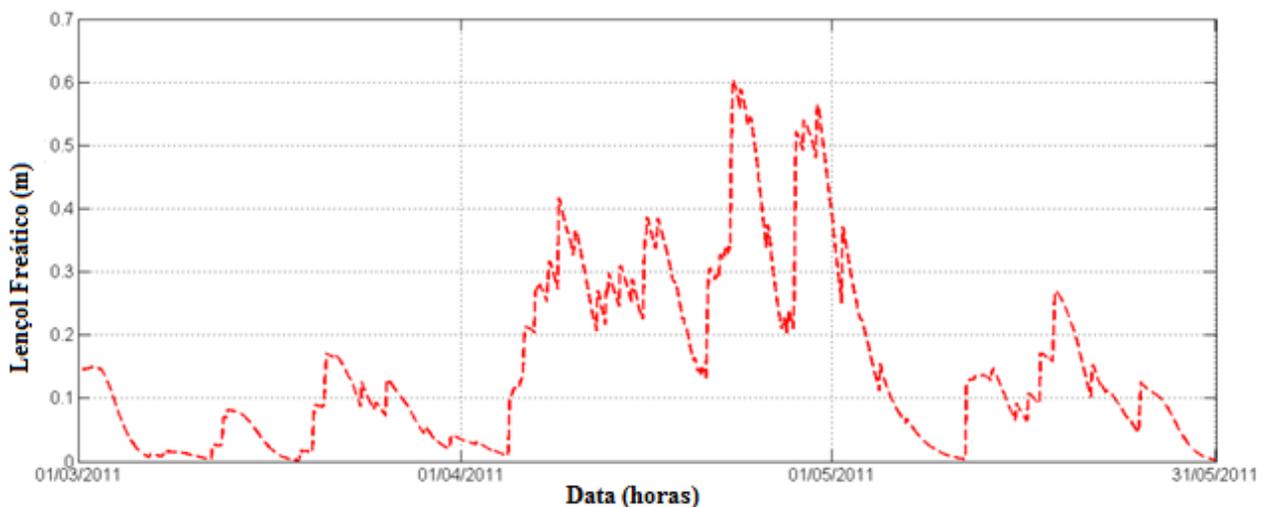
As Figura 5.21 e Figura 5.22 apresentam o lençol freático simulado empregando o modelo linear e não linear para o período de calibração avaliado numa célula tipo encosta com uma área de acumulação de  $800 \text{ m}^2$ , o que quer dizer que é drenada pelo fluxo de oito (8) células tipo encosta. Neste período de tempo o nível do lençol freático se manteve um nível ao redor de

0,2 m. e os máximos valores estiveram entre 0,6 m e 0,7 m, correspondentes com o pico da última semana de abril.



**Figura 5.21** Lençol freático calculado na versão não linear para uma célula tipo encosta (área acumulada de 800m<sup>2</sup>)

Para o modelo linear, os valores em geral decresceram, além os dois picos representativos são menores, e os valores vale chegam até zero em curtos períodos de tempo. Avaliando a declividade dos picos, pode-se observar que com a versão linear obtém-se uma resposta mais rápida da poro pressão positiva nos solos, acrescentando e diminuindo os picos mais rápido d que a versão não linear.



**Figura 5.22** Lençol freático calculado na versão linear para uma célula tipo encosta (área acumulada de 800m<sup>2</sup>)

### 5.6.2- Avaliação do modelo hidrológico

Para avaliar o desempenho do modelo é necessário ter uma vazão observada, ou nosso caso calculada a partir de outros programas para comparar com a vazão simulada pelo modelo. A capacidade de predição e desempenho do modelo na parte hidrológica é medida usando a raiz do erro médio quadrático (*Root Mean Square Error*), e o *Nash-Sutcliffe efficiency* coeficiente (NS). O *RMSE* e o *NS* são providenciados pelo modelo em cada simulação.

O *RMSE* mede a média da magnitude do erro, seu alcance é desde 0 até infinito, com 0 como o desempenho ótimo. O *RMSE* da predição do modelo com respeito à vazão observada ( $Q_{obs}$ ) é definida como a raiz quadrada da média do erro quadrático.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{T}} \quad (4.2)$$

Onde  $Q_{obs}$  é a vazão observada ou medida,  $Q_{sim}$  é a vazão modelada no tempo t. T é o tempo total.

O coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS) é comumente empregado para avaliar o poder preditivo de modelos hidrológicos de vazão. As eficiências Nash-Sutcliffe podem alcançar valores entre  $-\infty$  até 1. Uma eficiência de 1 é uma correspondência perfeita entre o modelo e o observado. Uma eficiência de 0 indica que as predições do modelo são tão precisas como a média dos dados observados, enquanto que uma eficiência menor de zero ( $-\infty < NS < 0$ ) ocorre quando a predição da média dos dados modelados não é tão boa quanto os observados.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (4.3)$$

Adicionalmente, o modelo hidrológico calcula um balanço de água em termos de porcentagem, fazendo o balanço usando a chuva total sobre a bacia, os escoamentos ao longo das diferentes células e finalmente considerando a água armazenada nos tanques no final da simulação.

A chuva é estimada considerando a chuva correspondente a cada célula na matriz da bacia (x) no tempo da modelação (t).

$$Chuva = \sum_{x=1}^n \sum_{t=1}^m Chuva(x, t) \quad (4.4)$$

Para o ponto de saída da bacia, onde o processo é fechado, os fluxos provenientes do escoamento superficial (E2), sub-superficial (E3), águas subterrâneas (E4) e vazão (E5) são consideradas para cada intervalo de tempo.

$$Escoamento = \sum_{t=1}^n \sum_{Tanq=2}^5 E_{Tanq}(t) \quad (4.5)$$

A saída da armazenagem estática, que corresponde à evapotranspiração EVP, é considerada em todas as células em todos os intervalos de tempo da seguinte maneira.

$$EVP = \sum_{x=1}^n \sum_{t=1}^m EVP(x,t) \quad (4.6)$$

A água armazenada nos tanques no final da simulação é estimada da seguinte maneira.

$$Armazenagem = \sum_{x=1}^n \sum_{Tanq=1}^5 S_{Tanq}(x) \quad (4.7)$$

Para finalmente obter

$$BalançodeÁgua(\%) = \frac{Escoamentos + EVP + Armazenagem - Chuva}{Escoamento + EVP} \quad (4.8)$$

Fazendo a comparação do modelo linear e não linear com as figuras apresentadas acima, pode-se inferir que o modelo não linear simulou melhor o comportamento do ciclo hidrológico na bacia, já que a vazão calculada pelo modelo não linear conseguiu simular melhor os picos e os vales o que quer dizer que o modelo não sobre estimou a vazão.

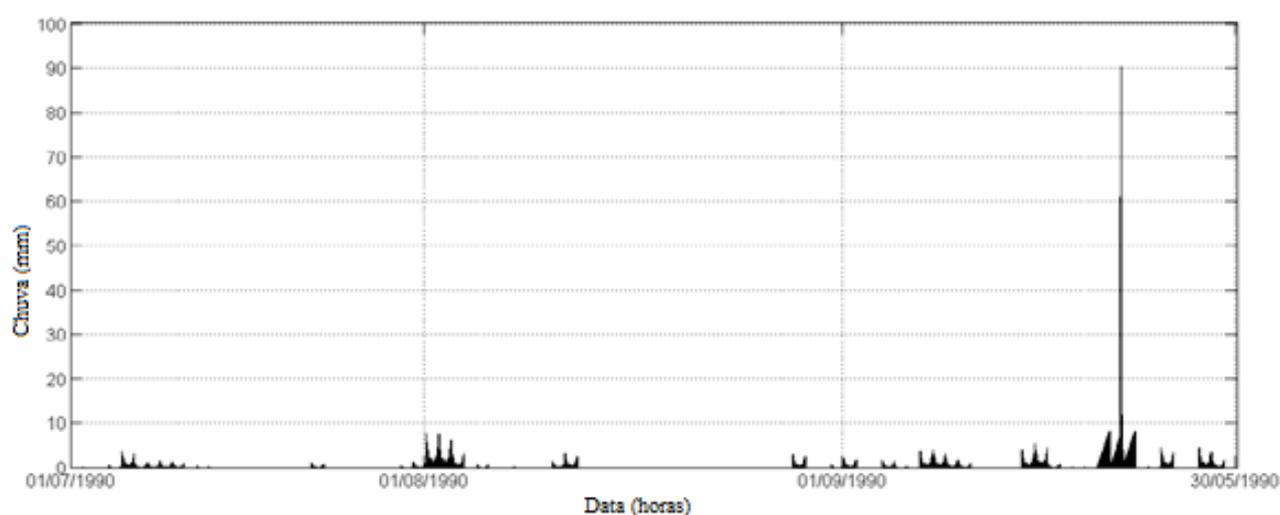
Para o modelo linear o erro quadrático médio (RMSE) foi de 0,292 e o *Nash-Sutcliffe* coeficiente (NS) foi de 0,852 mostrando uma muito boa correlação entre a vazão calculada e a medida. O balanço de água apresentou uma leve diferença negativa (WB) de -1,59%.

Na versão linear, a simulação é aceitável com valores de RMSE de 0,347 e NS de 0,791, mas são um pouco menores do que a versão não linear. Contudo o balanço de água obteve-se um valor semelhante e igualmente negativo -1,61%. Embora o modelo linear simula adequadamente o evento, as curvas de recessão são muito menores comparadas com a vazão de La Arenosa.

### 5.6.3- Calibração geotécnica

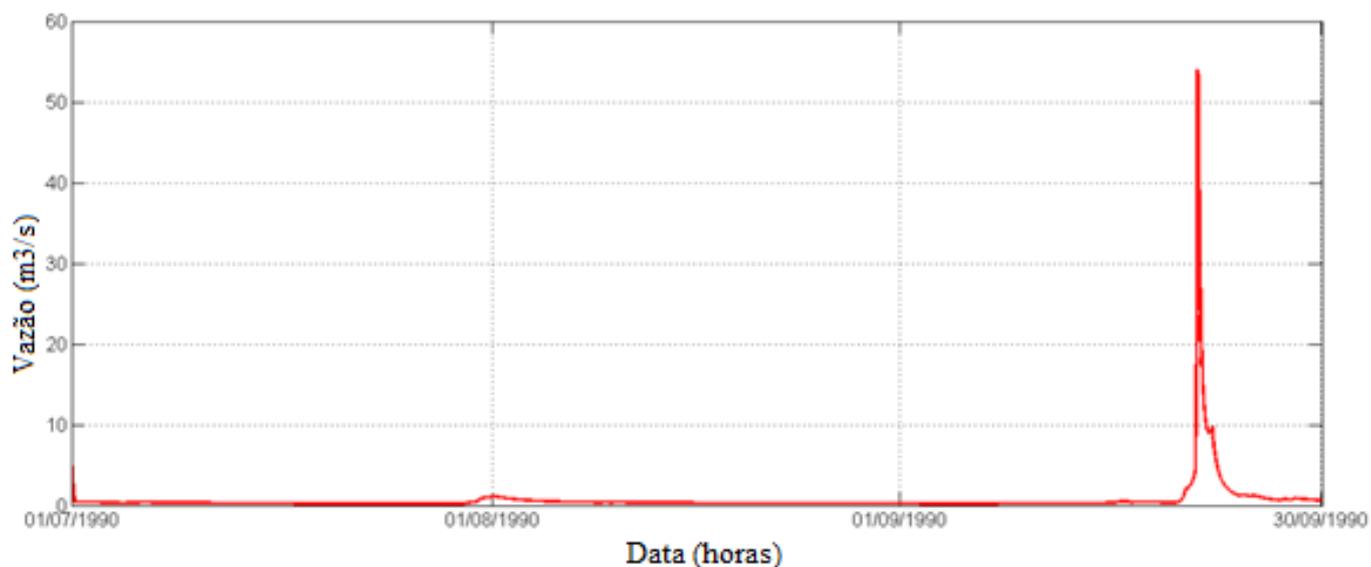
A componente geotécnica do modelo foi calibrada, sobrepondo o mapa de inventário de deslizamentos do período de calibração com o mapa obtido das simulações. Assume-se que os pontos do mapa identificam o ponto de começo do deslizamento.

Foi empregado um período de 3 meses de chuvas prévios a data de calibração desde o dia 01 de julho de 1990, até 30 de setembro de 1990, para o aquecimento do modelo, e para ter certeza que as condições iniciais do modelo no momento do evento de chuva sejam os mais próximos da realidade.

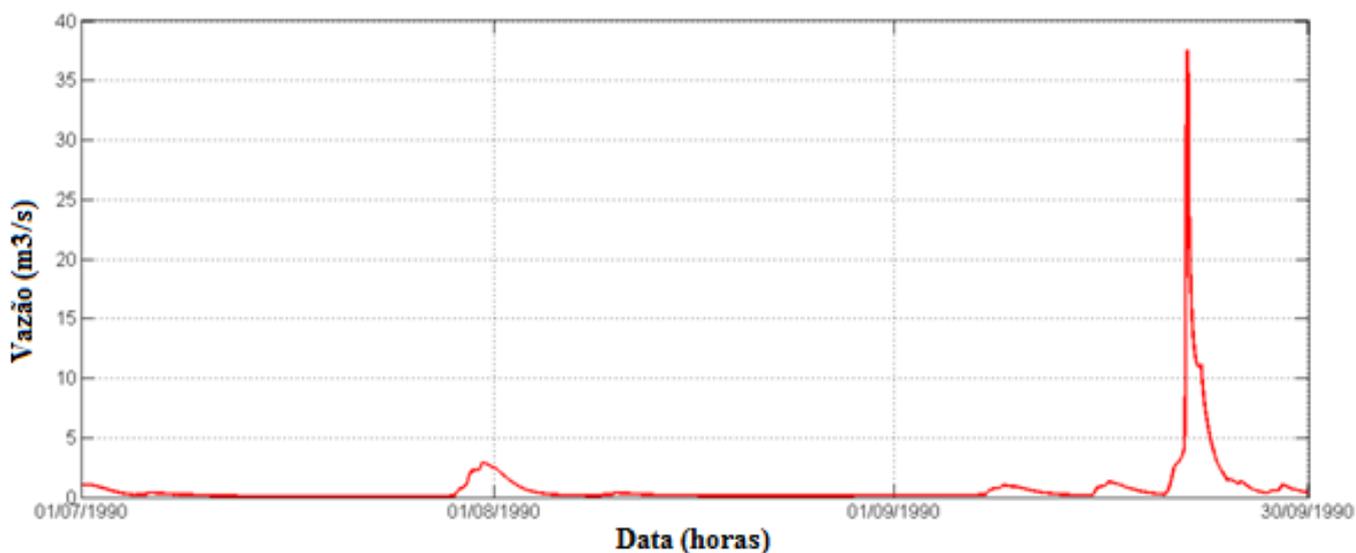


**Figura 5.23 Registro de chuvas de julho até setembro de 1990 na estação La Arenosa**

As seguintes figuras apresentam as vazões da tormenta de setembro de 1990 para os modelos lineares e não lineares. De acordo com o modelo não linear a vazão na bacia La Arenosa foi de  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  e para a versão linear foi de  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  o que significa um aumento de mais de 30 vezes a vazão base de La Arenosa. É importante ressaltar que a vazão corresponde só à água, já que de acordo como Hermelin *et al.*, (1992), o evento foi caracterizado por um grande volume de sedimentos estimados em  $1,5 \text{ Mm}^3$ . Levando em consideração este volume, o total de água e sedimentos se acrescenta consideravelmente.

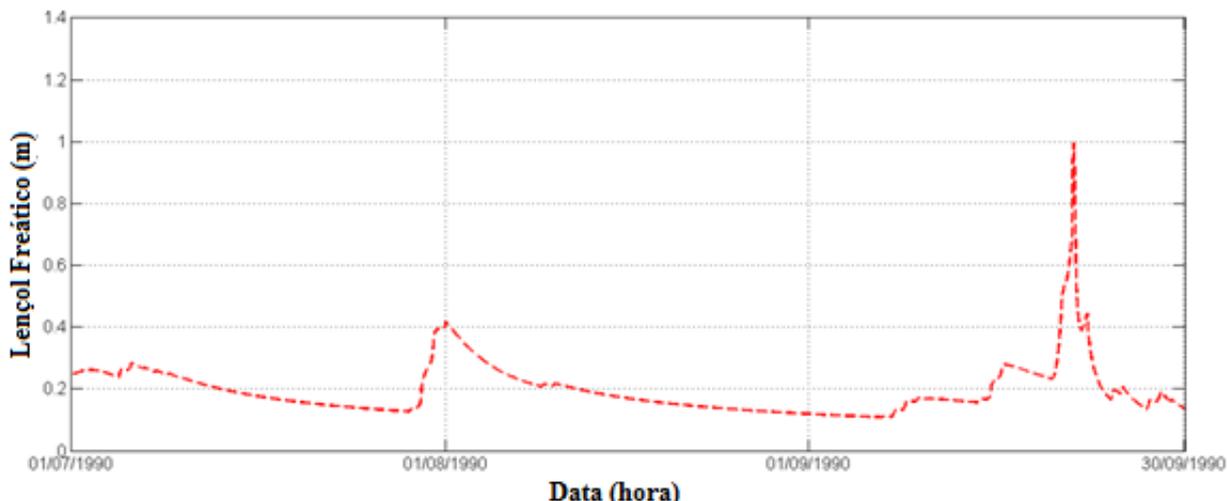


**Figura 5.24 Vazão simulado com o modelo não linear.**



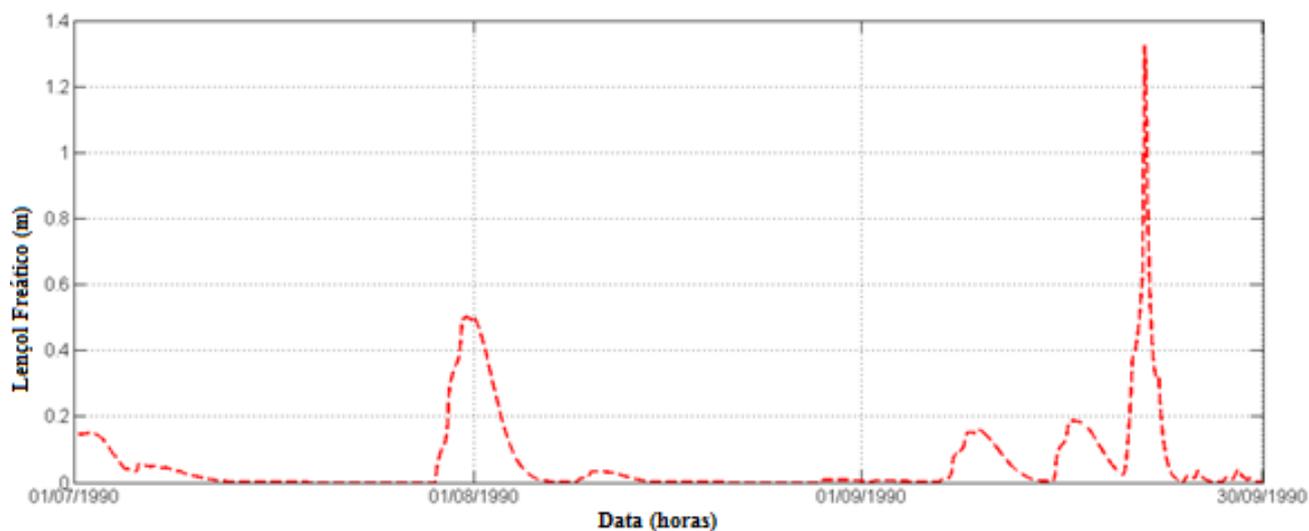
**Figura 5.25 Vazão simulado com o modelo linear.**

As Figura 5.26 e Figura 5.27 apresentam o nível do lençol freático na tormenta de setembro de 1990 para o modelo linear e não linear, foi empregada a mesma célula tipo encosta empregada na calibração hidrológica com uma área acumulada de 800 m<sup>2</sup>. O lençol freático alcança um pico de 1,3 m durante o período mais intenso da tormenta. O pico obtido na versão linear é maior do que obtido com a versão não linear; para a análise não linear, tem-se um fluxo base de 0.1 m, enquanto que a linear chega até zero.



**Figura 5.26** Nível do lençol freático simulado com o modelo não linear.

A Figura 5.28 apresenta a matrix 1, que corresponde ao mapa de susceptibilidade, ou seja, ao primeiro mapa calculado pelo modelo correspondente ao mapa que contém as áreas incondicionalmente estáveis, incondicionalmente instáveis e as potencialmente instáveis.

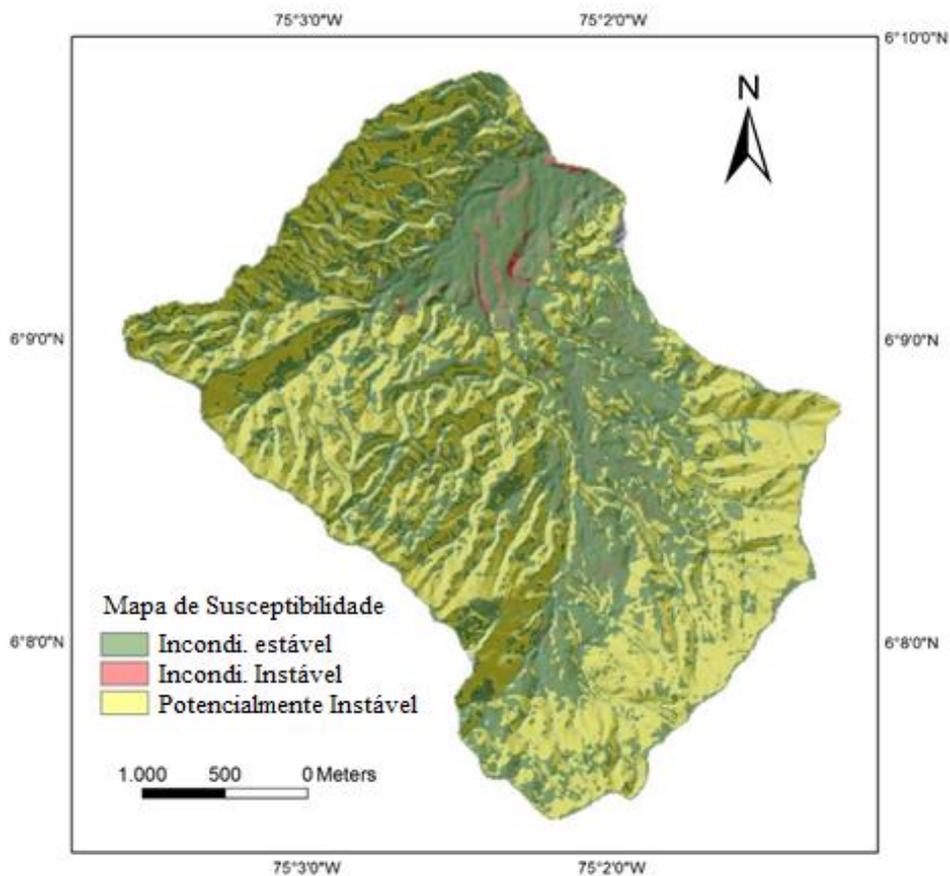


**Figura 5.27** Nível do lençol freático simulado com o modelo linear.

**Tabela 5.9** Resultado Matrix 1 correspondente ao mapa de susceptibilidade

Mapa de Susceptibilidade	Células	Porcentagem (%)
Incondicionalmente estável	45.852	46,70
Incondicionalmente instável	1.618	1,60
Potencialmente instável	51.176	51,87
Total	98.646	100

As áreas amarelas, são as áreas potencialmente instáveis a serem deflagradas por um evento de chuva, que correspondem ao 52% da área total da bacia. 92% de essas cicatrizes do evento de setembro de 1990 foram localizadas nessa área, o 8% restante corresponde às áreas classificadas incondicionalmente instáveis. Os escorregamentos são apresentados nos mapas de ameaça nas Figura 5.29 Figura 5.30. Estas figuras representam o resultado da matrix 2 para os modelos não lineais e lineais respectivamente, correspondentes ao produto final que apresenta os setores onde vão se ter escorregamentos superficiais deflagrados por chuva.

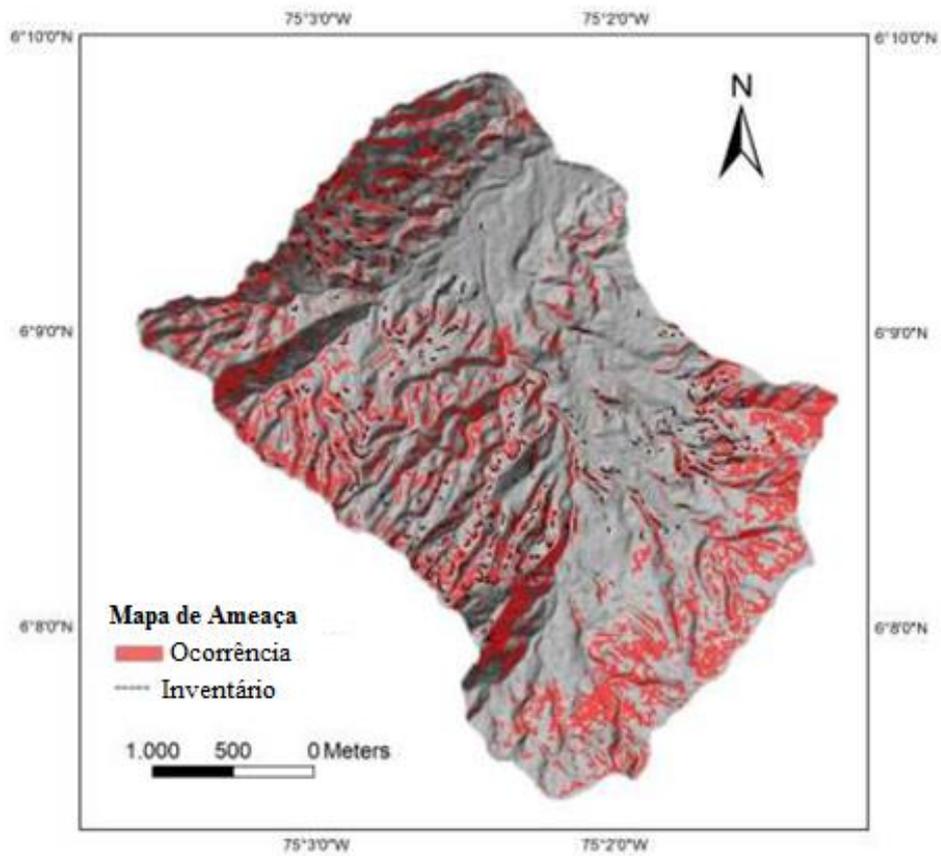


**Figura 5.28 Mapa de Susceptibilidade tormenta setembro de 1990**

As áreas propensas a terem escorregamentos superficiais deflagrados por chuvas mudam consideravelmente dependendo do modelo empregado. Para a simulação com a versão não linear (Figura 5.29) 23.456 células falharam durante a tormenta correspondentes ao 24% da área total da bacia, enquanto que com o modelo linear foram detectadas 34.268 células falhadas que corresponde com um 35% do total da área da bacia. Comparando as duas versões, o modelo linear tem uma sobre estimação de 11%.

**Tabela 5.10 Resultado Matrix 2 correspondentes ao mapa de ameaça para o modelo linear e não linear**

	Não linear	Linear
Instável	23.456	434.268
Porcentagem Parcial	46%	67%
Porcentagem Total	24%	35%



**Figura 5.29 Mapa de Ameaça para tormenta setembro de 1990 no modelo não linear**

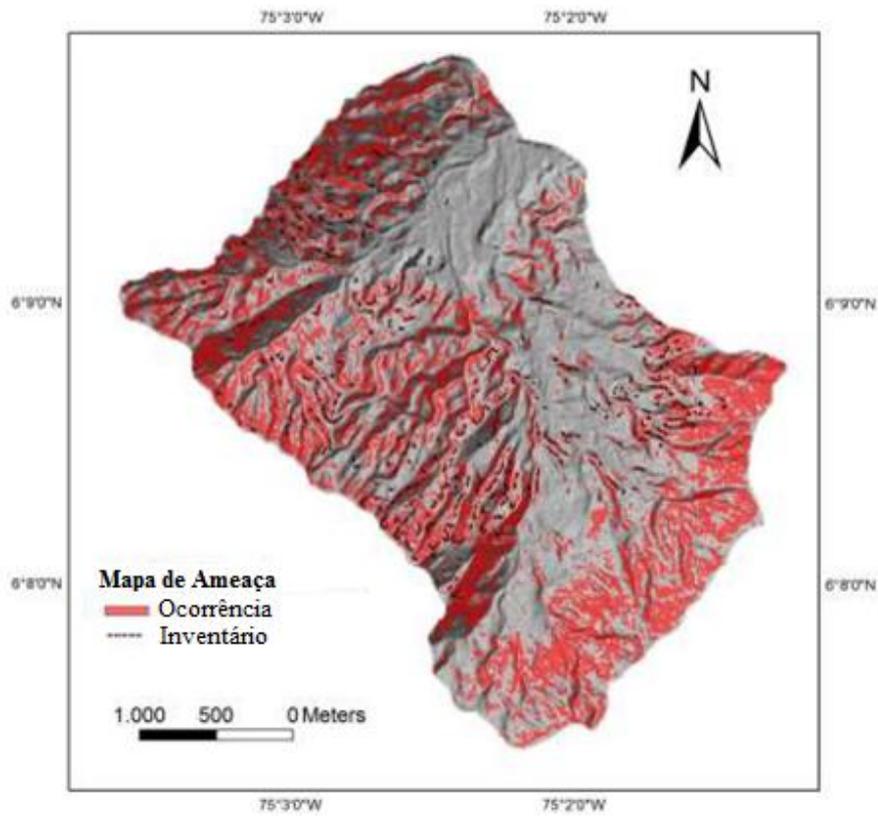
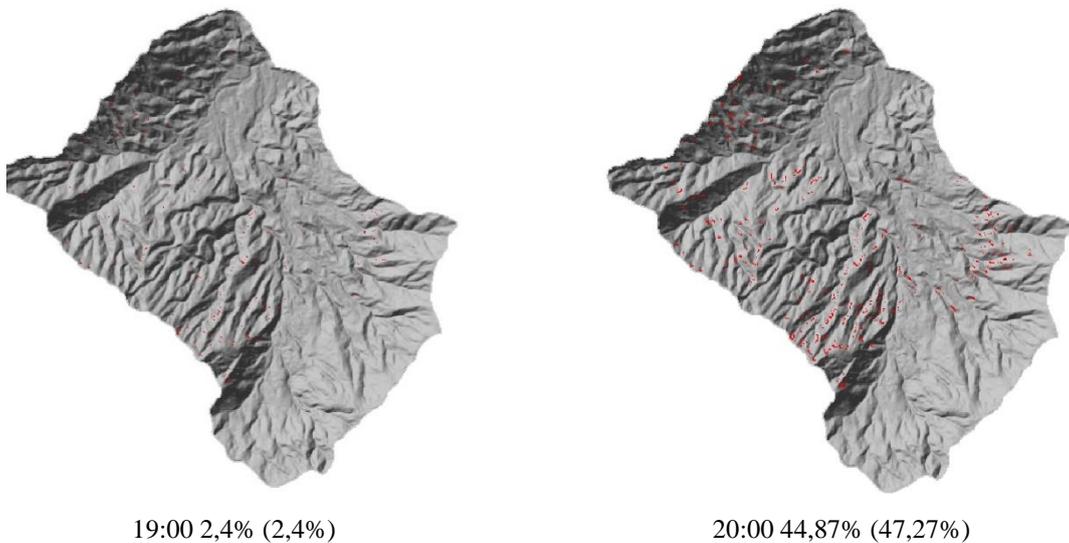
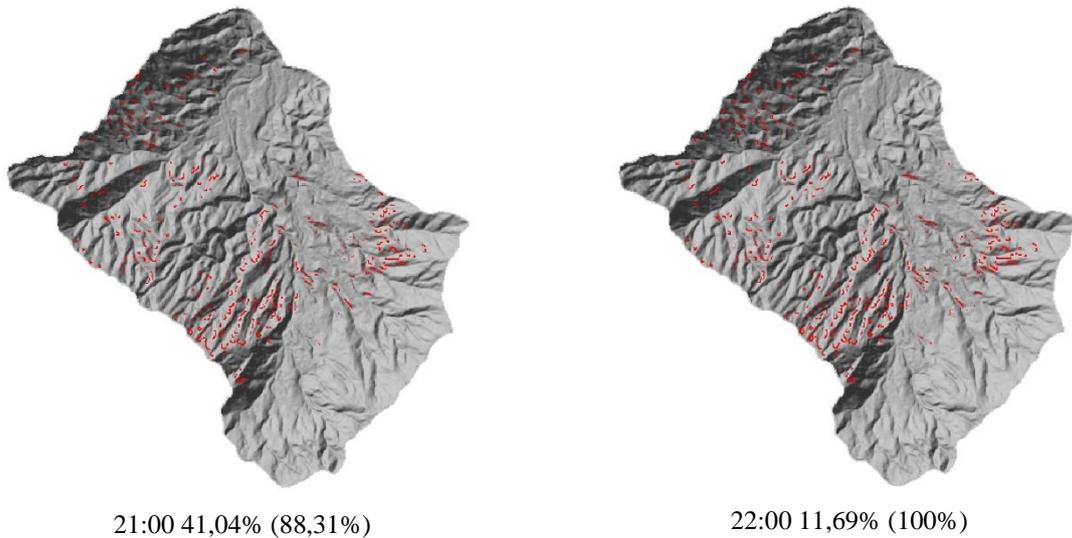


Figura 5.30 Mapa de Ameaça para tormenta setembro de 1990 no modelo linear

A continuação apresenta-se a análise do comportamento do modelo com o tempo baseada nas células corretamente classificadas.





**Figura 5.31** Análise temporal do desempenho do modelo considerando somente as células corretamente classificadas na tormenta de 21 de setembro de 1990

O processo de validação passo a passo é apresentado no trabalho de Aristizábal (2013) apresentam-se os capítulos 5.6 e 5.7.

#### **5.6.4- Modelo probabilístico**

Para começar a calibração do modelo probabilístico foram empregadas as chuvas correspondentes ao evento ocorrido em Setembro de 1990, que foi a mesma análise empregada no modelo determinístico (SHIA\_LandSlide) com o intuito de verificar a concordância dos modelos e ter um ponto de partida para a nova análise. Depois de empregar as chuvas de calibração do modelo geotécnico determinístico, são gerados os mesmos dois mapas iniciais (susceptibilidade e ameaça) e além, apresenta-se um terceiro mapa de confiabilidade

No novo código, as sub-rotinas da análise hidrológica e as primeiras análises do modelo geotécnico são iguais, já que a primeira análise geotécnica correspondente a análise de susceptibilidade onde são calculadas as células independentemente instáveis, as independentemente estáveis e as potencialmente instáveis, a segunda análise é o cálculo da altura  $Z_{crit}$  com os valores médios dos parâmetros geotécnicos, porém, os dois primeiros resultados (Matrix 1 e Matrix 2) são iguais nos dois modelos, no entanto o modelo probabilístico vai apresentar um terceiro resultado (Matrix 3) Correspondente à confiabilidade de cada célula.

Na Figura 5.35 é apresentado o mapa de confiabilidade associado à chuva do dia 21 de Setembro de 1990, onde é fácil perceber que as zonas de menor confiabilidade estão muito próximas às áreas onde o modelo previu escorregamentos, além disso o mapa de ameaça

apresenta em total 23450 células falhadas entanto o mapa de confiabilidade apresenta 24563, apresentando uma variabilidade que é o objetivo final desta pesquisa, mas tem que se ter muito cuidado com a análise dos resultados, porque considerando a variabilidade das propriedades do solo pode-se acrescentar o poder de acerto do modelo, mas também pode significar um acréscimo considerável na porcentagem de falso alarme.

É importante também ressaltar que o mapa de confiabilidade não é um mapa binário do tipo mapa de ameaça, ou seja ele não só vai apresentar as áreas que falharam e as áreas que ficam estáveis, também vai apresentar uma terceira classificação que são as áreas que embora não falharam, estão numa condição considerada limite, ou seja, ante uma solicitação externa (outro período de chuva, intervenção antrópica, um terremoto etc.) a condição pode passar de estável para instável.

É necessário lembrar que a confiabilidade apresentada nesta análise é diferente à análise de confiabilidade do fator de segurança já que a o modelo emprega outra função objetivo, porém os valores adotados e limiares de instabilidade são diferentes à análise de confiabilidade conhecida.

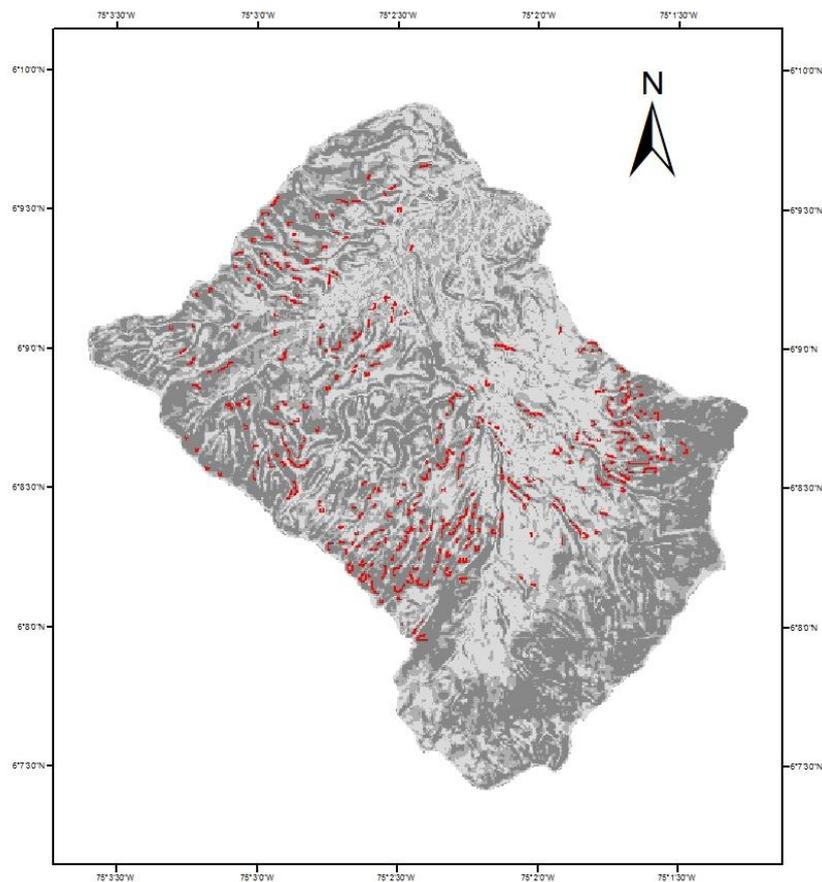
Levando em consideração essa premissa, deve ser feita uma análise onde seja definido o valor limite ou limiar onde a confiabilidade é muito baixa e vão-se deflagrar os deslizamentos, tendo uma segunda faixa onde ainda não se apresentaram deslizamentos, mas a área está numa condição de estabilidade limite e a terceira faixa onde as áreas são estáveis. Esse processo é muito visual e foi feito baseado no inventário de deslizamentos feito por Mejía & Velásquez, (1991). É importante ressaltar que o inventário foi feito num 70% da bacia devido à impossibilidade de aceder à parte sul-este da mesma, o que se traduz numa diminuição da capacidade de predição do modelo e de um aumento na porcentagem de falsos alarmes.

A análise probabilística é feita nas células potencialmente instáveis, ou seja, nas células onde depois de fazer a análise de susceptibilidade ainda não falharam e que por suas condições de declividade e propriedades do solo poderiam falhar.

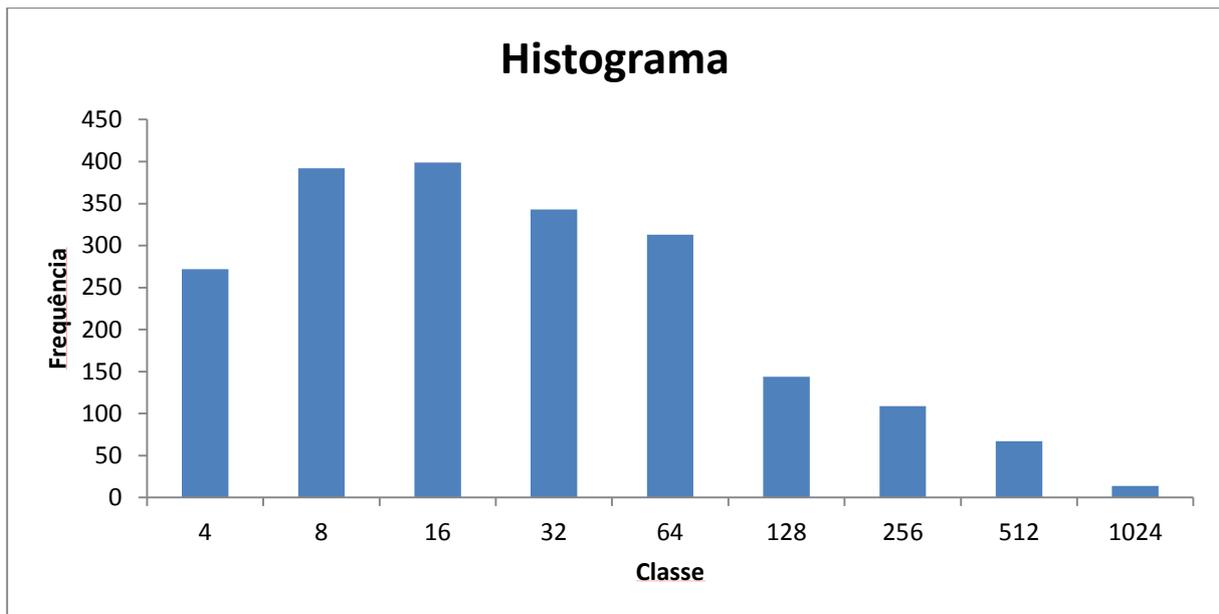
Finalmente é apresentado um valor de confiabilidade para cada uma das células potencialmente instáveis onde a faixa de valores é de  $-0,0000002$  até  $0,0000680$  que são valores muito pequenos em comparação com os valores de confiabilidade tradicionais, e em diante vai se multiplicar por  $1 \times 10^7$  para facilitar a análise de resultados, com tudo, como foi expresso em linhas atrás a presente análises de confiabilidade é diferente ao tradicional, onde embora a função objetivo

seja derivada da função de fator de segurança finalmente são diferentes. Além disso, considerando o período chuvoso que está se estudando e que a capacidade de armazenagem da água não é muito grande é fácil perceber que os valores de  $Z_w$  são muito próximos aos críticos em geral e que as distribuições de probabilidade, portanto apresentam um desvio padrão muito pequeno.

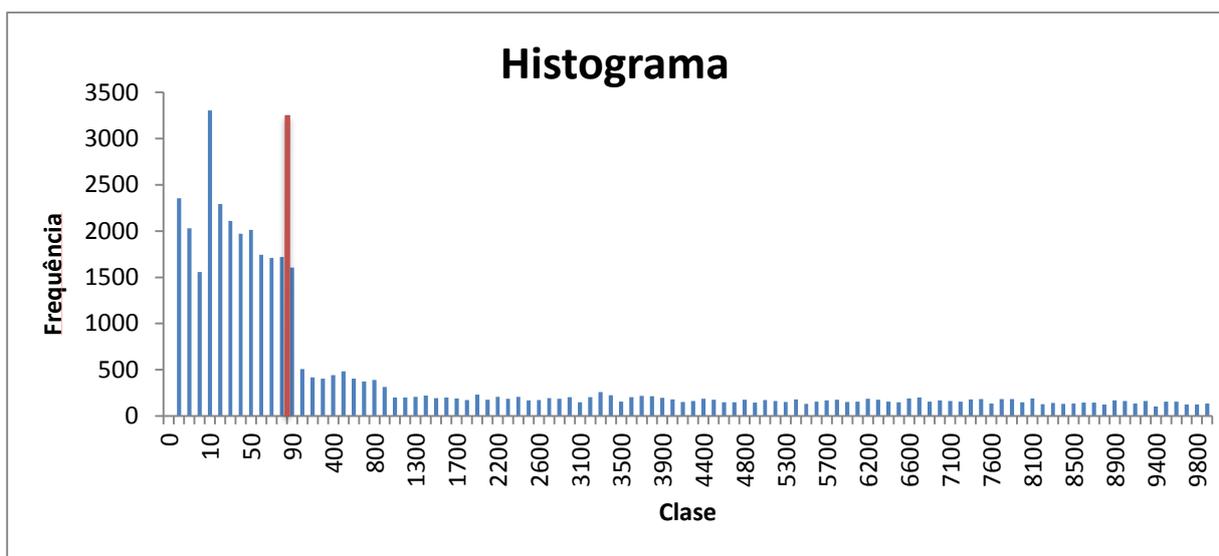
Com ajuda do inventário de deslizamentos (Figura 5.32), encontra-se o valor crítico de confiabilidade a partir do valor meio ( $\beta^*=46$ ) do histograma de frequências apresentado na Figura 5.33 que corresponde com o 77% dos deslizamentos ocorridos no dia 21 de Setembro de 1990 com um total de 14111 células falhadas. O segundo valor é tomado da análise de confiabilidade final, levando a conta unicamente as células classificadas como potencialmente instáveis, onde o valor meio ( $\beta^*=140$ ) vai se tornar o limiar para as zonas estáveis e as que apresentam uma condição de estabilidade limite.



**Figura 5.32. Inventário de deslizamentos. (Modificado de Velásquez & Mejía, 1991)**



**Figura 5.33. Histograma de frequência dos valores de confiabilidade para as células do inventário**



**Figura 5.34. Histograma de frequência dos valores de confiabilidade para as células potencialmente instáveis**

Na Figura 5.35 é apresentado o mapa de confiabilidade da bacia, onde se têm três faixas principais para dividir a análise de confiabilidade que são limitados pelos valores anteriormente apresentados, as cores vermelhas ( $\beta^* < 46$ ) correspondem com valores de confiabilidade baixos onde as células falham, a cor amarela ( $46 < \beta^* < 140$ ) representa uma confiabilidade media, onde as células estão numa condição de equilíbrio limite e a cor verde ( $\beta^* > 140$ ) de confiabilidade alta, onde as células estão longe da falha.

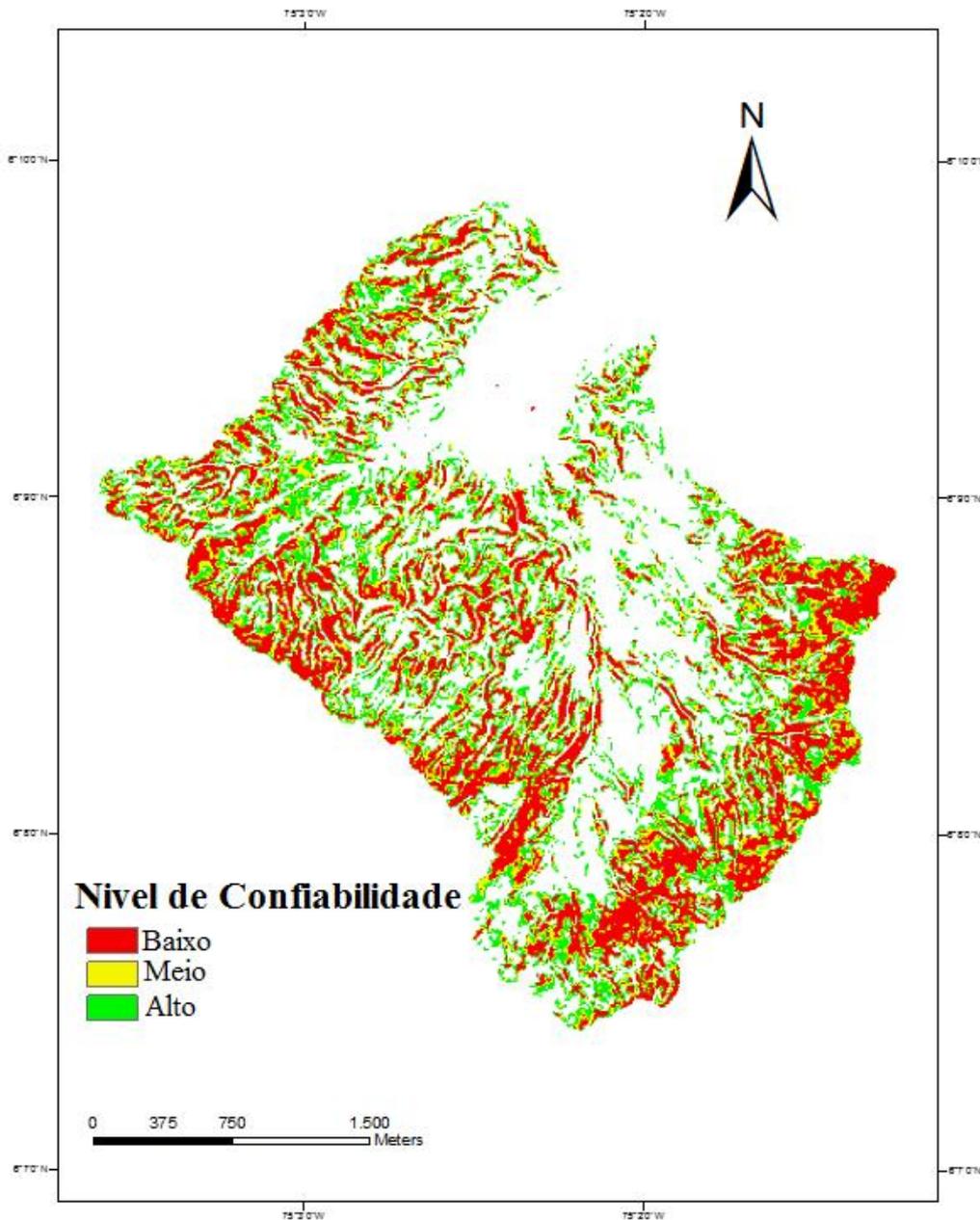


Figura 5.35. Figura 5.36. Mapa de Confiabilidade Bacia La Arenosa

### 5.7- MAPA DE SENSIBILIDADE

Este mapa é o primeiro resultado da análise determinística (Equações 3.52, 3.53 e 3.54) e é totalmente independente da chuva, porém as células potencialmente instáveis que são as que podem falhar pela ação da água foram unicamente as levadas em conta para a análise determinística e probabilística.

O mapa de susceptibilidade é o primeiro filtro da análise onde são descartadas aquelas células que vão falhar pelas condições próprias do solo (propriedades mecânicas, de declividade,

espessura do solo residual). Assim são determinadas às áreas que serão incondicionalmente estáveis (principalmente por apresentar um ângulo de declividade muito baixo) e as incondicionalmente instáveis que a causa da combinação dos fatores descritos acima, não vão precisar de fatores externos para chegar na falha.

Nesta primeira parte encontrou-se que o número de pixels incondicionalmente instáveis são 1628 (1.64%) dos quais 141 correspondem com o inventário da zona, é importante lembrar que não foi possível encontrar um inventário completo da bacia, e que aproximadamente um 30% da área não foi estudada o que pode acrescentar a quantidade de falsos positivos. A maior parte dessas áreas estão localizadas na zona baixa da bacia associadas aos bancos de sedimentos do riacho e além disso se tem as células nomeadas de “células órfãs” que são células instáveis rodeadas de células estáveis que segundo Aristizábal (2013) são causadas por mudanças na topografia ocasionadas pelo fator antrópico.

As células incondicionalmente estáveis corresponderam ao 46,8% da bacia onde 8% das células do inventário foram erroneamente classificadas correspondentes com 175 células, e finalmente o 51,8% das células são as potencialmente instáveis o que ajuda diminuir o tempo de processamento quase à metade que é muito importante num sistema de alarme.

## **5.8- MAPA DE AMEAÇA**

Este mapa corresponde a análise determinística onde se apresentam os deslizamentos que realmente foram deflagrados por chuvas, resultado das mudanças na poro pressão e diminuição da resistência ao cisalhamento do solo, a estabilidade é verificada em cada intervalo de tempo na procura de novas células instáveis, e uma vez a célula falha, esta sai do cálculo diminuindo assim ainda mais o tempo de processamento em cada intervalo.

Neste caso o modelo conseguiu reproduzir muito bem a chuva do dia 21 de setembro de 1990 que foi o caso de estudo do modelo determinístico onde 51 176 pixels foram classificados como potencialmente instáveis. E nessa área o 77% do inventário foi corretamente classificado.

## 5.9- AVALIAÇÃO GERAL DO MODELO COM A METODOLOGIA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC)

De acordo com a metodologia ROC, o modelo previu 82% das áreas instáveis observadas e 55% das áreas estáveis observadas. Os valores calculados são apresentados na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11 análise ROC para a bacia La Arenosa na tormenta de 21 de setembro de 1990 empregando o SHIA\_Landslide Probabilístico.**

Classificação	SHIA_LANDSLIDE		
	Pixels	Área (m <sup>2</sup> )	Porcentagem Parcial (%)
Áreas Instáveis			
VP	1688	168800	82,22%
FN	365	36500	17,78%
Áreas Estáveis			
VN	28223	28223000	55,15%
FP	20892	2089200	40,83%

Uma grande vantagem da análise ROC é a possibilidade de aplicar várias grandezas para avaliação do desempenho do modelo. No processo de avaliação do desempenho do modelo serão calculados: sensibilidade, especificidade, falso alarme e precisão das simulações com o intuito de fazer uma comparação quantitativa com outros modelos da literatura. A taxa de verdadeiros positivos, também chamada taxa de acerto (Hit Rate), sensibilidade ou acurácia que é definida como a relação entre os verdadeiros positivos e os positivos totais reais, a taxa de verdadeiros negativos, também chamada especificidade ou acurácia negativa, é a relação entre os verdadeiros negativos e os negativos totais reais, a taxa de falsos positivos, também chamada de taxa de falso alarme ou erro negativo, é definida como a relação entre os falsos positivos e os negativos totais reais, e finalmente o valor preditivo positivo, também chamado de precisão, é a relação entre verdadeiros positivos e total de positivos previstos pelo modelo.

- Taxa de acerto (%) (Hit Rate):

$$\frac{\text{Positivos corretamente classificados}}{\text{Positivos totales reales}} = \frac{\# \text{ total de células instáveis corretamente classificadas}}{\# \text{ total de células instáveis}}$$

- Especificidade (%)

$$\frac{\text{Negativos corretamente classificados}}{\text{Negativos totales reales}} = \frac{\# \text{ total de células estáveis corretamente classificadas}}{\# \text{ total de células estáveis}}$$

- Taxa de falso alarme (%)

$$\frac{\text{Negativos incorretamente classificados}}{\text{Negativos totales reales}} = \frac{\# \text{ total de células estáveis incorretamente classificadas}}{\# \text{ total de células estáveis}}$$

- Precisão (%)

$$\frac{\text{Positivos corretamente classificados}}{\text{Positivos totales previstos pelo modelo}} = \frac{\# \text{ total de células instáveis corretamente classificadas}}{\# \text{ total de células instáveis previstas pelo modelo}}$$

**Tabela 5.12. Índices estatísticos para a medição do desempenho do modelo**

<b>Índice</b>	<b>Valor</b>	<b>Faixa</b>
<b>Taxa de acerto</b>	82,22	0-100
<b>Taxa de falso alarme</b>	40,83	0-100
<b>Especificidade</b>	57,46	
<b>Precisão</b>	0,074	

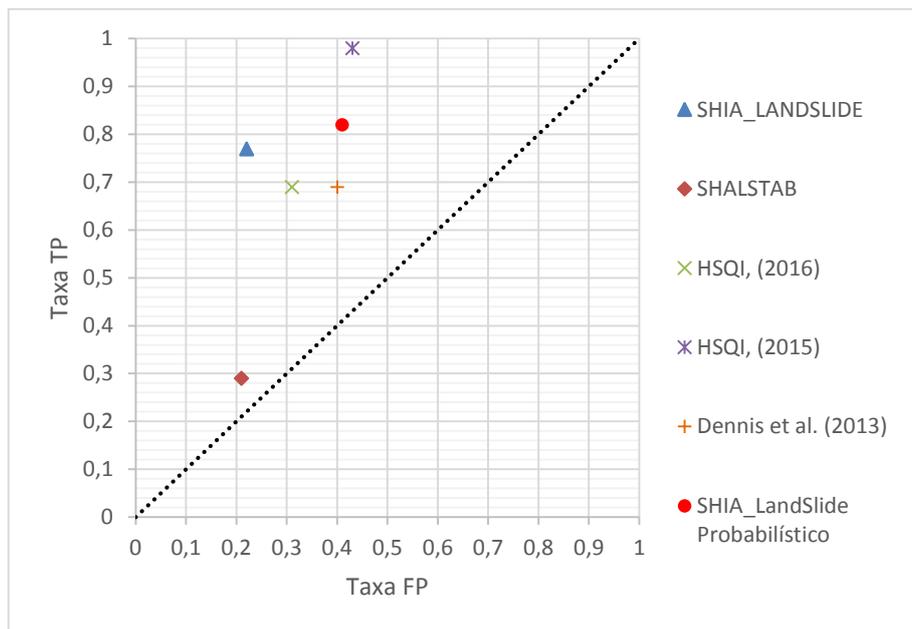
Para ter uma melhor visualização dos resultados da análise, apresenta-se o gráfico do espaço ROC, onde é avaliado o desempenho do modelo plotando num plano cartesiano dois dos indicadores acima mencionados que são a porcentagem de acerto no eixo Y e a porcentagem do falso alarme no eixo X.

O comportamento ideal é para qualquer modelo, é quando se aproxime à esquina superior esquerda (0, 0,1) do espaço ROC apresentado na Figura 5.37.

Além do modelo SHIA\_LandSlide Probabilístico, são apresentadas as avaliações de outros modelos semelhantes como são o SHIA\_Landslide (Aristizábal, 2013), SHALSTAB (Martinez, 2012) para comparar o comportamento. Também foram comparados outros modelos como são o HSQI (2015 e 2016) ((Moreno-Ceballos, 2015) e (Ocampo-Araya, 2016)) que são metodologias empregadas em projetos lineais como estradas e o modelo desenvolvido pra fluxos de detritos na California. Dennis *et al.* (2013) ressaltando que esses últimos modelos utilizam escalas diferentes nas classificações por tanto a comparação são é válida dentro do espaço ROC, mas não assim os critérios analisados de cada modelo.

**Tabela 5.13. Avaliação ROC em diferentes modelos**

Espaço ROC	SHIA-LANDSLIDE (Aristizábal, 2013)	SHALSTAB (Martínez, 2012)	HSQI (Moreno-Ceballos, 2015)	HSQI (Ocampo-Araya, 2016)	Dennis <i>et al.</i> (2013)
TP (VP)	77	29	98	69	69
FP (FP)	22	21	43	31	40



**Figura 5.37. Representação do espaço ROC**

## 5.10- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi realizada uma análise de sensibilidade levando em consideração os valores máximos e mínimos de coeficientes de variação das propriedades do solo baseados nos valores encontrados na literatura para cada um dos parâmetros considerados na análise probabilística.

### 5.10.1- Análise de sensibilidade ante mudanças nos valores meios

Para a análise determinística Aristizábal (2013) encontrou que o modelo tem uma grande sensibilidade às mudanças na espessura do solo, já que com uma diminuição na espessura entre o solo residual e o saprolítico foram induzidos uma maior quantidade de deslizamentos de terra. Consequentemente é confirmada a confiabilidade do módulo hidrológico já que com essa diminuição na espessura foi detectada uma saturação bem más rápida e, porém, um aumento

nos deslizamentos. No entanto no mapa de susceptibilidade as áreas incondicionalmente instáveis aumentaram com o acréscimo da espessura do solo.

Com respeito às propriedades geotécnicas as mudanças no ângulo de atrito e a coesão demonstram um comportamento inversamente proporcional aos pixels instáveis como esperado.

O modelo é mais sensível às mudanças na coesão do solo, espessura do solo residual e ângulo de declividade; é moderadamente sensível às mudanças do ângulo de atrito e é insensível às mudanças do peso unitário do solo.

#### **5.10.2- Análise de sensibilidade ante mudanças no desvio padrão**

A análise de sensibilidade do desvio padrão foi feita levando em consideração os limites das faixas de coeficiente de variação para cada uma das variáveis independentes encontrados na literatura e esses valores foram uniformizados considerando os resultados da análise realizada com os valores médios que foram encontrados na literatura.

Igual que foi descrito acima, o modelo apresenta uma grande sensibilidade às mudanças do coeficiente de variação e, porém, do desvio padrão da espessura do solo.

Observou-se que quando a variabilidade da espessura de solo foi acrescentada, os valores de confiabilidade aumentaram até o ponto que quase não se apresentaram zonas críticas (cores vermelhas). Também se observou que quando diminui o valor do desvio padrão da espessura do solo a confiabilidade diminuiu e as áreas vermelhas aumentaram, especialmente nas zonas mais altas da bacia.

Em geral observou-se que com a diminuição dos coeficientes de variação os valores de confiabilidade diminuíram embora o modelo não apresente muita sensibilidade ao coeficiente de variação da coesão e ângulo de atrito, mais sim com a peso específico do solo.

## 6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões do trabalho são apresentadas a continuação.

O objetivo geral da pesquisa foi validar o SHIA\_LandSlide como ferramenta na previsão de escorregamentos superficiais e verificar a capacidade de predição numa chuva definida com uma abordagem probabilística e encontrou-se que o modelo previu 82% dos deslizamentos ocorridos no evento de 21 de setembro de 1990, já o modelo determinístico SHIA\_LandSlide previu 77% dos deslizamentos.

Comparando o modelo determinístico com o probabilístico encontra-se que existe um aumento na taxa de falso alarme de 18%, isso ocorreu porque a abordagem probabilística leva em consideração uma combinação de incertezas que, quando combinadas, classificam as células que chegaram perto do valor crítico da água como células instáveis.

A análise de confiabilidade acrescentou uma faixa de classificação, deixando o sistema binário (Falha/No falha) para atrás. Nessa nova faixa as células ainda não falharam, mas possuem uma estabilidade condicionada aos fatores externos que podem levar a célula a uma condição de instabilidade.

Os valores de confiabilidade ( $\beta^*$ ) obtidos são muito pequenos quando comparados com os valores de confiabilidade tradicionais, lembrando que o planejamento matemático é diferente pelo qual não podem ser diretamente comparados, mas a magnitude é muito pequena porque pelo evento ocorrido no dia 21 de setembro de 1990 o lençol freático subiu consideravelmente chegando muito perto do valor crítico, porém quando restar as probabilidades acumuladas estas vão ser muito parecidas com tendência a zero.

De acordo com a metodologia do espaço ROC, que considera as células corretamente classificadas sem deixar ao lado as células incorretamente classificadas (Falsos Positivos) a capacidade do modelo é boa, já que ficou no quadrante esquerdo com uma boa porcentagem de Verdadeiros Positivos 82% contra um 41% de falsos positivos que pode ser um valor alto, mas quando os resultados são comparados com outro modelo similar como é o SHALSTAB que apresenta uma porcentagem de verdadeiro positivo de 29% com um 21% de Falso alarme é fácil perceber que é um acréscimo de predição de 53% contra um acréscimo de falso alarme de 20%, comparando com outros tipos de modelos como o desenvolvido por Dennis *et al.* (2012) que obteve 69% de verdadeiros positivos contra 40% de falsos positivos ou seja um acréscimo de acerto de 13% contra um acréscimo de 1% na falso alarme.

É importante levar em consideração que o modelo não tem a capacidade de reproduzir esses deslizamentos ocasionados pelos fatores antrópicos que fazem parte do inventário.

No inventário do evento do dia 21 de setembro de 1990, apenas 70% da bacia possui levantamento cartográfico o que acrescenta a porcentagem de falso alarme do modelo.

A análise realizada só considerou as incertezas próprias do solo, mas é importante ter presente que as condições hidrológicas e hidráulicas também possuem incertezas para ter em conta nos modelos.

Embora o modelo seja probabilístico o resultado final não apresenta um mapa da probabilidade de ruptura, mas sim, um resultado produto de uma abordagem probabilística para encontrar os limiares finais de confiabilidade ( $\beta^*$ )

Pela conceição do modelo, onde a primeira parte é uma abordagem hidrológica que fornece uma altura de água e tendo uma segunda análises onde se tem os valores críticos de altura da água, é fácil entrar num sistema de alerta temprana com uma bacia específica onde esses valores críticos estejam previamente determinados para o momento em que o radar detecte a chuva, só seja necessário realizar o primeiro análises hidrológico para fazer a comparação, e assim economizar tempo, o qual esses sistemas é tão importante porque o tempo numa situação de ameaça pode significar salvar vidas.

As recomendações para pesquisas futuras são as seguintes.

Implementar o modelo SHIA\_LandSlide Probabilístico numa bacia urbanizada para dessa maneira conhecer o efeito da impermeabilização e o efeito da intervenção antrópica no funcionamento do modelo.

Dividir o tanque de armazenagem estática T1 e assim separar a capilaridade da captação vegetal para finalmente incorporar o efeito do avanço da frente úmida no modelo.

Implementar uma análise com espessura de solo variável levando em consideração o tipo de solo e a rocha parental, a declividade, a proximidade com as zonas de drenagem etc.

Acrescentar a análise probabilística levando em consideração os parâmetros e incertezas hidrológicas como são a chuva, a vazão observada do rio e as capacidades máximas do tanque 1 (Armazenagem estática) e o tanque 3 (Armazenagem sub-superficial)

## 7- BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, M.G. & Lloyd, D.M. (1991). Using a combined slope hydrology-stability model to develop cut slope design charts. *Gr. Board*, 91(4): 705–718.
- Anderson, S.A. & Sitar, N. (1995). Analysis of rainfall-induced debris flows. *J. Geotech. Eng.*, : 544–552.
- Aristizábal, E. (2013). SHIA \_ Landslide: Developing a physically based model to predict shallow landslides triggered by rainfall in tropical environments. PhD Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colômbia.
- Assis, A., Esposito, T., Almeida, M. & Carvalho, J. (2004). Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia.
- Azevedo, G.F. (2011). Análise da relação chuva-escorregamento em regiões tropicais montanhosas urbanas, caso de estudo Rio de Janeiro, Brasil. Universidade de Brasília.
- Azevedo, G.F. (2015). Sistema de Análise Quantitativa de Risco Por Escorregamentos Rasos Deflagrados Por Chuvas Em Regiões Tropicais. Universidade de Brasília.
- Baum, R.L., Savage, W.Z. & Godt, J.W. (2008). TRIGRS — A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.,.
- Bertoldi, G. & Rigon, R. (2004). Geotop: A hydrological balance model. Technical Description and Programs Guide.
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1): 43–69.
- Bishop, A. w. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1): 91–128.
- Borga, M., Dalla Fontana, G. & Cazorzi, F. (2002). Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. *J. Hydrol.*, 268: 56–71.
- Brunsdon, D. & Prior, D.B. (1984). SLOPE INSTABILITY. Wiley (John) & Sons, Limited, Chichester.
- Camapun de Carvalho, J., Gitirana Jr, G. & Leão, C.. (2012). Tópicos Sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicada a solos tropicais.
- Castellanos, R. & González, A. (1996). Relations between annual and critical rainfall that hit mass movements (in spanish). *Jornadas Geotécnicas la Ing. Colombina*, IX: 4.62–4.70.
- Cho, S.E. & Lee, S.R. (2002). Evaluation of superficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, 128(9): 756–763.

- Christian, J.T. & Asce, H.M. (2005). Geotechnical engineering reliability : how well do we know what we are doing ? *Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 130(10): 985–1003.
- Christian, J.T. & Baecher, G.B. (2005). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. Technometrics*, 47.
- Colonia García, G. (1995). Danos ocorridos na Central Hidroelétrica de Calderas pelo escoamento na bacia La Arenosa, Em Espanhol.
- Crawford, N.H. & Linsley, R.S. (1966). *Digital simulation in Hydrology: The Stanford Watershed Model IV*. Stanford University, PaloAlto, California.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. *Environmental Geol.*, 35(2-3): 131–145.
- Crosta, G.B. & Dal Negro, P. (2003). Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the sarno 1998 event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3(1/2): 53–69.
- Cruden, D.M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 43(1): 27–29.
- Dawdy, D.R. & O'Donnell, T. (1965). Mathematical models of catchment behavior. *J. Hydraul. Div.*, 91(4): 123–137.
- Dhakal, A.S. & Sidle, R.C. (2004). Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions. *Hydrol. Process.*, 18(4): 757–776.
- Duncan, M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Geotech. Geoenvironmental Eng. ASCE*, : 307–316.
- Fernandes, N.F., Guimarães, R.F., Gomes, R. a T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R. & Greenberg, H. (2004). Topographic controls of landslides in rio de janeiro: field evidence and modeling. *Catena*, 55(2): 163–181.
- Fourier, A.B., Rowe, D. & Blight, G.E. (1999). The effect of inæltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. *Géotechnique*, 49(1): 1–13.
- Francés, F., Vélez, J.I. & Vélez, J.J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *J. Hydrol.*, 332(1-2): 226–240.
- Francés, F., Vélez, J.J., Múnera, J.C., Medici, C. & Bussi, G. (2012). Description of a conceptual distributed model of hidrological simulation TETIS v.8 (In Spanish).
- Fredlund, D.G., Morgenster, N.R. & Widger, R.S. (1978). No title. *Geotech. Div. A.S.C.E*, 103(5): 447–466.
- GeoRio. (2000). *Movimentos de massa. Manual técnico de encostas*, Ltda., I.C. (Ed.), Rio de Janeiro, pp. 69–95.

- Graham, J. (1984). Methods of stability analysis, department of civil engineering. university of manitoba. Slope Instability., John Wiley & Sons, pp. 171–215.
- Guimaraes, R.F., Montgomery, D.R., Greenberg, H.M., Fernandes, N.F., Gomes, R.A.T. & de Carvalho Junior, O.A. (2003). Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to rio de janeiro. Eng. Geol., 69(1-2): 98–108.
- Hammond, C., Hall, D., Miller, S. & Swetik, P. (1992). Level I Stability Analysis (LISA), Documentation for Version 2.0, General Technical report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station.
- Harp, E.L., Reid, M.E., McKenna, J.P. & Michael, J. a. (2009). Mapping of hazard from rainfall-triggered landslides in developing countries: examples from honduras and micronesia. Eng. Geol., 104(3-4): 295–311.
- Harr, M.E. (1985). Reliability- Based desing in civil engineering. York, Publishing company New.
- Hermelin, M., Mejía, O. & Velásquez, E. (1992). Erosional and depositional features produced by a convulsive event, san carlos, colombia, september 21. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., : 89–95.
- IGAC. (2007a). Estudo geral de solos e zonificação de terras do estado de Antioquia, Colômbia (Em Espanhol).
- IGAC. (2007b). Levantamento semidetalhados de cobertura terrestre para o estado de Antioquia, Colombia (Em Espanhol).
- Iida, T.O. (1999). A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due rainstorm. Dissertation, Kyoto University.
- Iverson, R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. Water Resour. Res., 36(7): 1897.
- Janbu, N. (1973). Slope stability computation. Embankment Dam Eng., 47(86): 47–86.
- Jaramillo, Á. (1989). Relação entre a evaporação e os elementos climáticos. Cenicafé, 40(3): 86–94.
- Kubota, J. & Sivapalan, M. (1995). Towards a catchment-sacale model of subsurface small-sacale process-based modelling and runoff generation based on synthesis of field studies. Hydrol. Process., : 297–310.
- Leopold, L.B. & Maddock Jnr, T. (1953). The hydraulic geomtry of stream channels and some physiographic implications. Geol. Surv. Prof. Pap. 252, : 1–56.
- Martinez, C. (2012). Susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa superficiales detonados por lluvia utilizando el modelo SHALSTAB: Cuenca La Arenosa, municipio de San Carlos Antioquia. Universidad de Antioquia.

- Mejía, R. & Velásquez, M.. (1991). Processos e depósitos associados à tormenta do dia 21 de Setembro na área de San Carlos (Antioquia, Colômbia). Em espanhol. Universidad Nacional de Colombia.
- Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resour. Res.*, 30(4): 1153.
- Montoya, E. (2013). Modelo de alerta de escorregamentos deflagrados por chuvas usando redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Moreno-Ceballos, C.A. (2015). Sistema de classificação Geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no Índice de Qualidade HSQI: Proposta Metodológica e Validação. Universidade de Brasília, DF.
- Morgenster, N.R. & Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1): 725–726.
- Morrissey, M.M., Wieczorek, G.F. & Morgan, B.A. (2004). Transient hazard model using radar data for predicting debris flows in madison county , virginia. *U.S. Geol. Surv.*, X(4): 285–296.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C. & Jaedicke, C. (2006). Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3(2): 159–173.
- O’Loughlin, E.M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resour. Res.*, 22(5): 794–804.
- Ocampo-Araya, M. del C. (2016). Sistema de classificação Geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no Índice de Qualidade HSQI: aplicação na Costa Rica [DF]. Universidade de Brasília.
- Pack, R.T., Tarboton, D. & Goodwin, C.N. (1998). Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00.
- Paiva, C.R.D. De. (2009). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso : Bacia do rio Solimões. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Parsons, A.J., Abrahams, A.M. & Wainwright, J. (1994). On determining resistance to interrill overland flow. *Water Resour. Res.*, : 3515–3521.
- Pellenq, J., Kalma, J., Boulet, G., Saulnier, G.M., Wooldridge, S., Kerr, Y. & Chehbouni, a. (2003). A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth. *J. Hydrol.*, 276(1-4): 112–127.
- Rahardjo, H., Lim, T.T. & Fredlund, D.G. (1995). Shear strength characteristics of a residual soil with suction. *Can. Geotech. J.*, 32: 60–77.
- Rosso, R., Rulli, M.C. & Vannucchi, G. (2006). A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resour. Res.*, 42(6): 1–16.

- S.A., I. (1990). Informe sobre danos na central Calderas pela avenida ocorrida no riacho La Arenosa no dia 21 de Setembro de 1990.
- Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G. & Rigon, R. (2010). Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using geotop-fs†. *Hydrol. Process.*, 22: 532–545.
- Soeters, R. & Van Westen, C.. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: Investigation and Mitigation*, A.K. Turner & R.L Shuster (Ed.), National Academic Press, Washington DC, pp. 129–177.
- Souza, F.T. de. (2004). Predição de escorregamentos das encostas do município do Rio de Janeiro através de técnicas de mineração de dados. *Universiade Federal do Rio de Janeiro*.
- SPAW. (n.d.). Spaw hydrology and water budgeting, agricultural research service, usa.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1): 11–26.
- Takasao, T. & Shiiba, M. (1988). Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping. *J. Hydrol.*, 102(1-4): 301–322.
- Turra, C. & Queiroz, B. (2005). Before it's too late: demographic transition, labor supply, and social security problems in brazil, proceedings of the united nations expert group eting on social and economic implications of changing population age structure, onu, mexico city.
- Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Natl. Acad. Sci.*,
- Varnes, D.J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Nat. Hazards*, (3): 64.
- Velásquez, N., Botero, V. & Vélez, J.I. (2011). Rainfall distribution based on a delaunay triangulation method. *Transactions on Computational Science XIV, Lecture Notes in Computer Science Volume 6970*, Springer (Ed.), Medellín, pp. 173–187.
- Vélez, J.I. (2001). Desenvolvimento de um modelo hidrológico conceitual distribuído orientado à simulação de inundações. (Em Espanhol). DsC, Universidade de Valencia, Valencia, España.
- Vélez, J.I., Villarraga, M., Álvarez, O.D., Alarcón, J.E. & Quintero, F. (2004). Hydrological and geotechnical distributed model to determine the threat of surface slip (in spanish). *XXI Congreso Latinoamericano de hidráulica*, Medellín, 1–10.
- Wang, G. & Sassa, K. (2006). Rainfall-induced landslide hazard assessment using artificial neural networks. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31(2): 235–247.
- Watson, D.F. (1980). Computing the n-dimensional tessellation with application to voronoi polytopes. *Comput. J.*, 24(2): 167–172.

- Whitman, R. V. (2000). Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, (July): 583–593.
- Wilkinson, P.L., Brooks, S.M. & Anderson, M.G. (2000). Design and application of an automated non-circular slip surface search within a combined hydrology and stability model (chasm). *Hydrol. Process.*, 14(11-12): 2003–2017.
- Wu, W. & Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resour. Res.*, 31(8): 2097–2110.