

UNIVERSITATEA BABEȘ – BOLYAI  
Școala Doctorală de Geografie

## **TEZĂ DE DOCTORAT**

**Metode cantitative de evaluare a hazardelor vulcanice în zone dens populate: accentuare asupra curgerilor piroclastice. Studiu de caz: vulcanul El Misti și orașul Arequipa, Sud – Vestul Peru**

~ rezumat ~

**Doctorand:**

*Robert Constantinescu*

**Conducător de doctorat**

*Prof. univ. dr. Ioan Aurel Irimuş*

~ Cluj - Napoca, 2012 ~

<b>INTRODUCERE</b> .....	<b>2</b>
<b>I. Scop: Metode de analiză și evaluare a hazardelor vulcanice</b> .....	<b>2</b>
<b>II. Obiectivele tezei</b> .....	<b>5</b>
<b>PARTEA I: HAZARDELE VULCANICE ȘI EVALUAREA ACESTORA</b> .....	<b>9</b>
<b>I. Hazardele vulcanice</b> .....	<b>9</b>
I.1. Hazardele vulcanice directe.....	9
I.1.1. Procese de cădere.....	9
I.1.2. Procese de curgere.....	11
I.2. Hazardele vulcanice indirecte .....	12
I.3. Curenți piroclastici de densitate (PDCs).....	17
<b>II. Metode de evaluare a hazardelor vulcanice</b> .....	<b>21</b>
II.1. Hărți deterministice.....	22
II.2. Hărți bazate pe scenarii eruptive .....	22
II.3. Metode matematice.....	23
II.3.1. Metode statistice și semi-empirice.....	23
II.3.2. Metode probabilistice .....	25
II.3.3. Modelare numerică computerizată .....	27
II.3.3.1. Modelarea căderilor de tephra și a bombelor vulcanice .....	28
II.3.3.2. Modelarea proceselor de curgere de material vulcanic .....	29
II.3.3.3. Modelarea curgerilor de lavă.....	33
II.4. Metode combinate .....	33
<b>III. Studiu de caz: Vulcanul El Misti și orașul Arequipa, Sud – Vestul Peru</b> .....	<b>35</b>
III.1. El Misti și Zona Central Vulcanică Andină .....	35
III.2. Orașul Arequipa.....	42
<b>PARTEA A II-A: ANALIZA ȘI REZULTATELE OBTINUTE PENTRU EVALUAREA HAZARDELOR GENERATE DE CURGERILE PIROCLASTICE ȘI BOMBELE VULCANICE LA VULCANUL EL MISTI ȘI ORAȘUL AREQUIPA</b> .....	<b>44</b>
<b>II.1. Metode și justificări</b> .....	<b>44</b>
<b>II.2. Studii de hazard la El Misti</b> .....	<b>45</b>
II.2.1. Scenarii eruptive pentru El Misti .....	46
II.2.2. Selectarea hazardelor vulcanice pentru studiul de caz .....	47
II.2.3. Pyroclastic flows și pyroclastic surges.....	48
<b>II.3. Metode propuse pentru evaluarea hazardelor generate de PFs și BA la El Misti</b> .....	<b>49</b>
II.3.1. Metode de modelare numerică computerizată .....	49
II.3.1.1. Curgeri piroclastice (Pfs).....	49
II.3.1.2. Bombe vulcanice (BA) .....	49
II.3.2. Metode probabilistice de evaluare a hazardelor vulcanice la El Misti .....	58
II.3.2.1. BET_EF – Bayesian Event Tree for Eruption Forecasting.....	58
II.3.2.2. BET_VH – Bayesian Event Tree for Volcanic Hazards .....	59
<b>II.4. Baza de date pentru evaluarea hazardelor: modelarea PFs și BA la El Misti</b> .....	<b>63</b>
II.4.1. Modelarea numerică computerizată a curgerilor piroclastice .....	63

II.4.1.1. Parametrii utilizați în TITAN2D-----	63
II.4.1.2. Rezultatele TITAN2D -----	69
II.4.1.3. Implicațiile rezoluției DEM-ului în simulările cu TITAN2D: exemplul curgerilor de tip block-and-ash-flows (BaFs) la El Misti -----	80
II.4.1.3.1. Parametrii utilizați în TITAN2D pentru BaFs-----	81
II.4.1.3.2. Rezultatele TITAN2D pentru BaFs-----	83
II.4.2. Modelarea numerică computerizată a bombelor vulcanice-----	91
II.4.2.1. Parametrii utilizați în EJECT -----	91
II.4.2.2. Rezultatele EJECT -----	94
<b>II.5. Evaluarea probabilistică a hazardelor-----</b>	<b>96</b>
II.5.1. Un Event – Tree pentru El Misti-----	96
II.5.2. Nodurile 1 – 6 pentru El Misti -----	97
II.5.2.1. Nodul 1 -2 -3-----	97
II.5.2.2. Nodul 4 -----	99
II.5.2.3. Nodul 5 -----	100
II.5.2.4. Nodul 6 -----	101
<b>II.6. Rezultatele evaluării probabilistice a PFs-----</b>	<b>103</b>
II.6.1. Nodurile 7 și 8 -----	103
II.6.2. Hărțile probabilistice obținute pentru PFs-----	104
<b>II.7. Rezultatele evaluării probabilistice a BA -----</b>	<b>106</b>
II.7.1. Nodurile 7 și 8 -----	106
II.7.2. Hărțile probabilistice obținute pentru BA -----	107
<b>PARTEA A III-A: IMPLICAȚIILE MODELĂRII NUMERICE ȘI A ANALIZEI PROBABILISTICE</b>	<b>109</b>
<b>III.1. Implicațiile modelării numerice computerizate a PFs în evaluarea vulnerabilității fizice ----</b>	<b>109</b>
III.1.1. Aspecte ale vulnerabilității fizice în fața PFs -----	109
III.1.2. Caracteristicile generale ale clădirilor din suburbiile orașului Arequipa și expunerea la PFs ----	110
III.1.3. Implicații pentru evaluarea vulnerabilității fizice-----	114
<b>III.2. Implicațiile analizei probabilistice în evaluarea riscului-----</b>	<b>114</b>
<b>III.3. Discuții: limitările simulării numerice utilizând studiul de caz El Misti-----</b>	<b>116</b>
<b>CONCLUZII-----</b>	<b>119</b>
IV.1. Sumarul rezultatelor și concluzii generale-----	119
IV.2. Recomandări pentru studii viitoare la El Misti-----	124
<b>Metode cantitative de evaluare a hazardelor vulcanice in zone dens populate: curgeri piroclastice. Studiu de caz: vulcanul El Misti și orașul Arequipa, Sud – Vestul Peru-----</b>	<b>126</b>
<b>Glosar de termeni-----</b>	<b>176</b>
<b>LISTA FIGURILOR -----</b>	<b>177</b>
<b>LISTA TABELELOR -----</b>	<b>182</b>
<b>REFERINȚE -----</b>	<b>183</b>

**Cuvinte cheie:** hazarde vulcanice; modelare numerică; evaluare probabilistică; El Misti; TITAN2D; BET\_VH.

## INTRODUCERE

### I. Scopul: Metode de analiză și evaluare a hazardelor vulcanice

În jurul lumii există foarte multe orașe situate în apropierea sau chiar pe flancurile unor vulcani activi, expunând astfel populația și infrastructura la diferite fenomene vulcanice ce pot duce la daune însemnate cât și la pierderi de vieți omenești.

La începutul secolului XX, estimările sugerau că mai mult de 500,000 oameni trăiesc sub amenințarea riscului unei erupții vulcanice (Tilling, 2005; Chester et al., 2000) și, deși încă nu există o estimare oficială recentă, acest număr a crescut datorită urbanizării intense și continue. Chiar dacă cele mai numeroase așezări urbane din proximitatea vulcanilor activi sunt reprezentate de comunități restrânse, mari centre urbane trăiesc în umbra unui vulcan potențial activ. Dintre aceste mari centre urbane cu populație de peste 1,000,000 locuitori amintim Napoli, Italia (lângă Vezuviu), Ciudad de Mexico, Mexic (lângă Popocatepetl), Kagoshima, Japonia (lângă Sakura - Jima), Arequipa, Peru (lângă El Misti).

Potrivit lui Blong (2000), evaluarea hazardelor vulcanice și a efectelor acestora, se face cel mai bine într-un cadru de analiză și management al riscului.

**Scopul** acestui studiu este de a implementa și de a aplica o metodologie de evaluare a hazardelor vulcanice generate de curgerile piroclastice tip *pyroclastic flows* (PFs) și de *blocurile vulcanice balistice* (bombe vulcanice, BA), bazată pe utilizarea datelor geologice și stratigrafice, modelare numerică computerizată a fenomenelor și analiză probabilistică.

### II. Obiectivele tezei

Studiul de față are în principal două obiective majore: **(1)** utilizarea metodelor moderne de simulare numerică computerizată pentru delinierea spațială a curgerilor piroclastice și a bombelor vulcanice și **(2)** evaluarea probabilistică a hazardelor generate de curgerile piroclastice și bombele vulcanice, și producerea unor hărți ale probabilităților utilizând ca și studiu de caz vulcanul El Misti și orașul Arequipa din sud-vestul Peru.

Pentru a atinge aceste două obiective, este necesară parcurgerea și îndeplinirea unor stadii intermediare de cercetare pentru studiul de caz propus: (1) Identificarea hazardelor și metodelor utilizate pentru modelarea numerică; (2) Definierea unor scenarii eruptive; (3) Crearea unei baze de date despre istoria eruptivă a vulcanului El Misti și a parametrilor pertinenti modelării numerice computerizate; (4) Modelarea numerică computerizată a curgerilor piroclastice tip *pyroclastic flows* și a bombelor vulcanice cu ajutorul programelor computerizate TITAN2D și EJECT; (5) Delinierea și extensia spațială a fenomenelor așa cum reiese din simulările numerice; (6) Conversia hărților geologice și a rezultatelor simulărilor în limbaj binar pentru facilitarea calculului probabilistic; (7) Pregătirea unei baze de date pe baza căreia probabilitățile pot fi calculate cu o acuratețe cât mai mare; (8) Aplicarea metodologiei Event – Tree (Newhall și Hoblitt, 2002), în cadrul programelor de calcul BET\_EF și BET\_VH, pentru a obține probabilitățile fiecărui stagi al unei erupții vulcanice și a fenomenelor subsecvente (e.g. unrest, erupție, deschiderea unui nou coș); (9) testarea rezoluției DEM-ului are implicații majore în modelarea numerică. Pentru a testa acest lucru în cazul lui El Misti, se vor

efectua o serie de simulări pentru curgeri piroclastice tip block-and-ash-flow, cu ajutorul programului TITAN2D, pe două DEM-uri de rezoluție 20m și 30m.

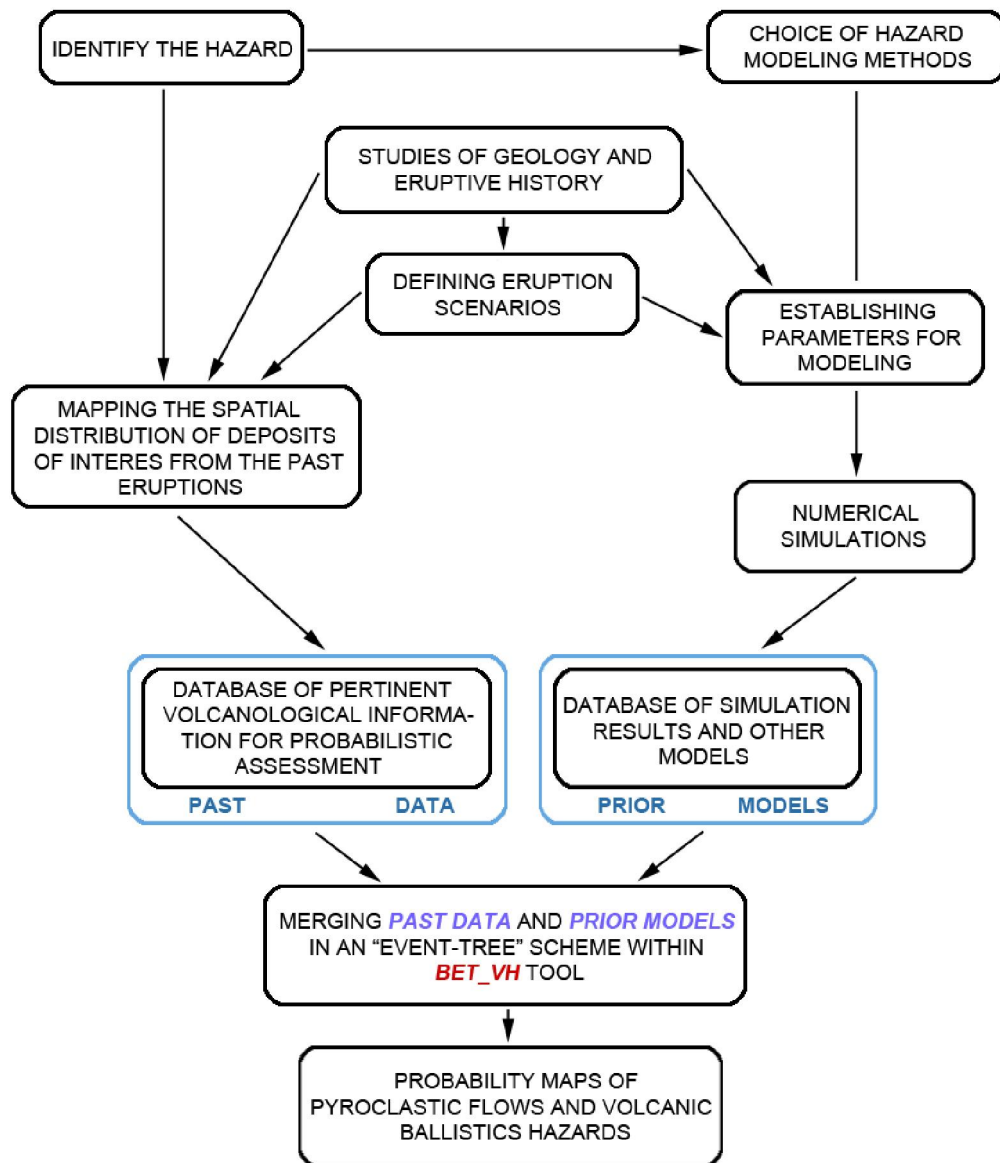


Figure 2. Schema de lucru propusă pentru modelarea curgerilor piroclastice și a bombelor vulcanice și elaborarea hărților probabilistice a hazardelor generate de acestea.

## PARTEA I: Hazardele vulcanice și evaluarea acestora

### I. Hazardele vulcanice

Conform terminologiei adoptată de UNISDR în anul 2009, *hazardul este:., un fenomen, substanță, activitate umană sau condiții periculoase, ce pot provoca pierderi de*

*vieți omenești, vătămare sau alte impacturi de sănătate, pagube materiale, pierderea și întreruperea serviciilor și modului de viață, perturbări sociale și economice, sau daune aduse mediului.”*

## **I.1. Hazarde vulcanice directe**

Hazardele vulcanice directe apar în timpul stadiilor eruptive și au fost separate în procese de *cădere* și de *curgere*.

### **I.1.1. Procese de cădere (Fall processes)**

Acestea se referă la expulzarea și depunerea fragmentelor de material vulcanic aeropurtate rezultate în urma unei erupții vulcanice explozive (Tilling, 2005) și sunt reprezentate de : - *Căderile de tephra / cenușă (tephra fallout)* și *Bombele vulcanice (volcanic ballistics)*.

### **I.1.2. Procese de curgere (Flowage processes)**

Dintre procesele de curgere de material vulcanic, amintim: - *Curgerile piroclastice (pyroclastic density currents)*; *Explozie direcțională laterală (lateral directed blast)*; *Avalanșe de debris / colapsul unui flanc (debris avalanches / flank collapse)*; *Laharuri (primary volcanic debris flows / lahars)*(și în franceza e tot „lahar”); *Jökulhlaups (asta lasa-l asa)*; *Curgeri de lavă*.

## **I.2. Hazarde vulcanice indirecte**

Hazardele vulcanice indirecte sunt cele ce rezulta fie în urma unui fenomen vulcanic direct, fie ca și efecte ale acestora pe termen lung, după ce erupția vulcanică s-a încheiat. Cele mai importante sunt: - *Valurile tsunami (tsunami e și în franceza)*; *(secondary lahars) laharuri secundare*; *Schimbări climatice post-eruptive (post-eruptive climate changes)*; *foamete etc.*

## **I.3. Curenți piroclastici de densitate (PDCs)**

Curgerile piroclastice (parcă în franceza sunt „*écoulement piroclastique*”) sunt cunoscute sub denumirea de – **pyroclastic density currents** (curenți piroclastici de densitate) – și sunt amestecuri de particule și gaz vulcanic foarte fierbinți, cu sau fără apă liberă, ce se deplasează pe pământ sub influența gravitației cu viteze foarte mari. Se împart în două categorii :

– **pyroclastic flows (PFs)** – curgeri concentrate de particule mari și slab sortate; de obicei sunt canalizate în văile naturale și canalele de scurgere de pe versanți (văi, canale naturale de scurgere), acestea ating viteze foarte mari și distanțe de până la 100km (Nakada, 2000). Cel mai des se formează prin colapsul domurilor de lavă și se numesc *block-and-ash-flows* sau prin colapsul coloanei de erupție și se numesc *scoria flows* sau *pumice / ash flows*, depinde de vezicularitatea particulelor.

Pe lângă PFs mai sunt – **pyroclastic surges (PS)** – acestea sunt curgeri mai diluate de particule foarte fine în amestec cu gaze fierbinți și vapori de apă. Ating viteze

mult mai mari decât cele de tip pyroclastic flows și pot depăși cu ușurință bariere topografice, făcându-le astfel mult mai periculoase. Distanțele la care pot ajunge în general curgerile piroclastice sunt influențate de raportul H / L (înălțime / distanță).

## **II. Metode de evaluare a hazardelor vulcanice**

Datorită diferitelor grade de expunere a unor comunități la diverse fenomene vulcanice atât proximale (e.g. bombe vulcanice) cât și distale (e.g. căderi de tephra), studii de evaluare a hazardelor vulcanice au început să fie întreprinse încă din anii '70. Investigarea depozitelor din teren și reconstituirea erupțiilor din trecut reprezintă prima sursă de informații pentru studiile de hazard vulcanic (Crandell et al., 1984). Analiza hazardelor vulcanice se poate face pentru un singur fenomen pe rând sau pentru combinații de mai multe fenomene asociate unei erupții.

### **II.1. Hărți deterministice**

Cea mai populară abordare este de a crea hărți ale hazardelor bazate pe istoria eruptivă a vulcanului. Hărțile de hazard vulcanic reprezintă de obicei extinderea actuală sau potențială a fenomenelor vulcanice care se produc prin „curgere” (curgeri piroclastice, lahar, curgeri de lava), alături de distribuția potențială de tephra (Haynes et al. 2007).

### **II.2. Hărți bazate pe scenarii – eruptive**

Analizele bazate pe scenarii – eruptive se bazează fie pe un tip de erupție, pe un scenariu definit în prealabil de către experți și / sau fenomenele asociate acestuia. De obicei aceste scenarii sunt definite pe baza celor mai comune tipuri de erupție din istoria eruptivă a vulcanului studiat și combină abordări statistice ce oferă de regulă perioada de recurență pentru fiecare tip de erupție.

### **II.3. Metode matematice**

#### **II.3.1. Metode statistice și semi-empirice**

Metodele statistice de obicei reprezintă o combinație a unui scenariu eruptiv cu analize statistice ale frecvenței erupțiilor în trecut, fie a apariției unui anumit tip de fenomen. Aceste tipuri de analiză implică de obicei diverse metode de calcul cu ajutorul modelelor numerice computerizate.

#### **II.3.2. Metode probabilistice**

Evaluarea probabilistică a hazardelor vulcanice a fost propusă în urmă cu mai mult de două decenii, pentru a putea oferi o prognoză cantitativă, pe termen scurt și / sau lung, a inițierii unei noi erupții vulcanice și a hazardelor generate.

Evaluarea probabilistică într-o schemă tip Event – Tree (arbore de evenimente) a fost propusă de Newhall și Hoblitt (2002). Această schemă este o reprezentare grafică a evenimentelor, unde legăturile dintre acestea sunt pași logici de la un stadiu inițial (e.g.



inițierea unei erupții), cuprinzând stadii intermediare subsecvente (e.g. deschiderea unui nou crater; apariția unui anumit fenomen) și până la finalizarea erupției (Newhall and Hoblitt, 2002). O astfel de schemă facilitează obținerea probabilităților pentru diferite momente sau fenomene de la inițierea și până la finalizarea unei erupții vulcanice.

„*Bayesian Event Tree for Eruption Forecasting*” (**BET\_EF**) și *Bayesian Event Tree for Volcanic Hazards* (**BET\_VH**) sunt instrumente (soft-uri) de calcul al probabilităților pentru predicția erupțiilor vulcanice (Marzocchi et al 2004, 2008, 2010) care îmbină două probleme: - se manipulează ușor în timpul crizei și oferă probabilități în timp real.

### **II.3.3. Modelare numerică computerizată**

Pentru fiecare tip de fenomen vulcanic s-au dezvoltat diferite modele computerizate de simulare ce folosesc diferiți parametri, astfel căutându-se cele mai bune condiții ce pot arăta modul de evoluție, comportamentul cât și extinderea fenomenelor în teren.

#### **II.3.3.1. Modelarea căderilor de tephra și a bombelor vulcanice**

Hurst (1994) a propus și creat un model de predicție a dispersiei și depunerii de tephra rezultată în urma unei erupții magmatice explozive. Acest model se numește ASHFALL și a fost folosit de Hurst și Smith (2004) pentru evaluarea probabilistică a dispersiei de tephra în Noua Zeelandă, având în vedere o erupție de la orice vulcan din insula de Nord a țării. Modele mai recente și mai complexe sunt TEPHRA și TEPHRA2 (Bonadonna et al., 2005; Connor și Connor, 2006)(Fig. 9 a). EJECT (Mastin, 2001) este un program computerizat ce ajută la calcularea traiectoriilor unor obiecte balistice (e.g. bombe vulcanice) ce călătoresc prin atmosferă.

#### **II.3.3.2. Modelarea proceselor de curgere de material vulcanic**

Pentru simularea diferitelor procese de curgere, s-au propus numeroase modele computerizate ce au în vedere anumiți parametri care guvernează caracterul reologic al curgerilor de natură vulcanică. Dintre cele mai uzitate modele amintim: - ENERGY CONE (Malin și Sheridan, 1982), FLOW2D și FLOW3D (Sheridan și Macias, 1992; Sheridan et al., 2000), VOLCFLOW, PDAC2D, LAHARZ, PYROFLOW, TITAN2D (acestea nu le traduci – așa se numesc ele) (Tab. 4). Aceste modele au la bază energia reliefului și raportul H (înălțime) / L (distanță).

#### **II.3.3.3. Modelarea curgerilor de lavă**

Un exemplu de program de simulare numerică a curgerilor de lavă este FLOWGO și a fost implementat de Harris și Rowland (2001) pentru a descrie zona inundată de curgerea de lavă printr-un canal predefinit. Modelul integrează aspecte termo – reologice ale lavei cu factori ambientali (gravitație, pantă) și dimensiunile canalului de curgere (Harris și Rowland, 2001).

## II.4. Metode combinate

Studii recente au încercat abordarea de evaluare multi – hazard, bazată pe combinarea hărților geologice cu scenariii – eruptive într-o schemă probabilistică. Exemple de astfel de studii sunt ale lui Alberico et al. (2011) și Magill și Blong (2005a).

## III. Studiu de caz: vulcanul El Misti și orașul Arequipa

### III.1. El Misti și zona Central Vulcanică Andină

Anzii reprezintă cel mai lung lanț muntos continental, cu o lungime de aproximativ 7000 km de-a lungul coastei vestice a Americii de Sud. S-au format datorită subducției plăcii oceanice Nazca sub placa continentală a Americii de Sud, cu o convergență ce avansează și astăzi cu o viteză de 63 mm / an (Norabuena et al., 1998; Kendrick et al., 2003; Mamani et al., 2008). Vulcanismul Andin este divizat în patru zone (Fig. 10), separate de „goluri vulcanice” (volcanic gaps – zone în care lipsește orice activitate vulcanică) (e.g. Thorpe, 1984; Stern 1984a, 2004; Tilling, 2009). Central Volcanic Zone, din care face parte și vulcanul El Misti (Fig. 11), este reprezentată de 44 centre vulcanice active majore și alte 18 minore (de Silva and Francis, 1989a,b, 1991; Stern, 2004). Dintre acestea, în Peru sunt cel puțin 9 vulcani activi, din care 4 au erupt de la Inchiziția Spaniolă și până în prezent: - *Nevado Sabancaya* cu erupții aproape continuu între 1990 și 1998 (Gerbe și Thouret, 2004) și o erupție mai recentă în 2003; *El Misti* cu activitate freatică mai recentă în 1984 – 1985 și o ultimă erupție magmatică în ~ 1400 A.D. (Thouret et al., 2001); *Ubinas*, cel mai activ vulcan în Peru, cu 24 episoade eruptive în ultimii 500 de ani (Rivera et al., 2010) cu explozii continue între 2006 – 2008 și un episod eruptiv mai recent în 2009 și *Huaynaputina*, cu cea mai mare erupție din America de Sud cunoscută în timpuri istorice.

**El Misti** (5822 masl – meters above sea level) (Fig.12 a,b; Fig. 13) : - prezentul con vulcanic a fost estimat ca având aproximativ 40 km<sup>3</sup> (de Silva și Francis, 1990) dar investigațiile mai recente sugerează un volum de 70 – 83 km<sup>3</sup> (Thouret et al., 2001). Studiile geologice efectuate au identificat construcția actualului edificiu în ultimii ~ 833 ka în patru mari stagii denumite Misti 1,2,3 și 4 (Thouret et al., 2001). Câteva erupții Subplinienene și Plinene au produs în ultimii 35,000 de ani depozite de curgeri piroclastice și căderi de cenușă dar eroziunea intensivă datorată localizării geografice, a lăsat doar puține aflorimente ce pot fi studiate în detaliu (Legros, 2001). Mari depozite de curgeri și căderi piroclastice au fost atribuite unor erupții Pliniene undeva între 25,000 și 31,000 a B.P. ). Activitatea mai recentă la El Misti comprimă câteva episoade fumaroliene și mici explozii freactice datorate unor degazeificări puternice în 1984 și 1985 ce au produs o coloană de erupție de cenușă fină cu o înălțime de 1km. O descriere mai detaliată a geologiei și activității lui El Misti poate fi găsită în Thouret et al. 2001.

### III.2. Orașul Arequipa

Orașul Arequipa (Fig. 13. 14 a) este al doilea ca mărime din Peru cu o populație de 835859 de locuitori în 2011 (INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú). Vechiul oraș a fost construit la apexul a două mari conuri vulcanolclastice, la o distanță de 17 km față de vârful. Proximitatea față de vulcanul El Misti face ca orașul

Arequipa să fie expus unor fenomene vulcanice, fapt dezvăluit de investigațiile geologice: - căderi de tephra, curgeri piroclastice, laharuri, avalanșe de debrisi (e.g. Thouret et al, 1996, 1999a, 2001; Legros, 2001; Delaite, 2005; Vargas et al., 2010; Martelli, 2011). O caracteristică importantă a morfologiei conului și care este pertinentă în analiza hazardelor generat de fenomene de curgere vulcanică este raportul  $H / L$  (înălțime / distanță): - diferența verticală între crater și centrul orașului este de 3500 m în numai 17 km distanță (Fig. 14 b).

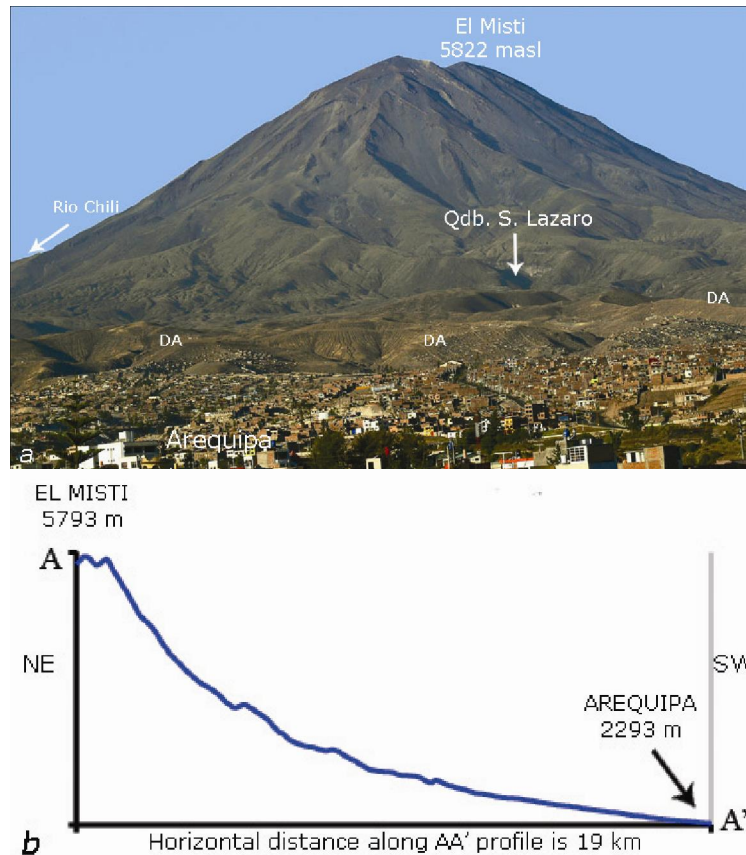


Figure 14 a,b. a) Vedere dinspre SE asupra orașului Arequipa la poalele vulcanului El Misti (imagine luată din <http://www.trekearth.com>). b) profil topografic reprezentând diferența de altitudine dintre vârful vulcanului și centrul orașului.

## PARTEA a II - a: Analiza și rezultatele evaluării hazardelor vulcanice generate de curgerile piroclastice și bombele vulcanice la vulcanul El Misti și orașul Arequipa

### II.1. Metode și justificări

Pentru studiul de față, evaluarea hazardelor generate de curgeri piroclastice tip *pyroclastic flows* și de bombele vulcanice (*volcanic ballistic*s) se va efectua în cadrul

unei scheme tip „Eent – Tree” (Newhall și Hoblitt, 2002), calculul fiind facilitat cu ajutorul programului BET\_VH (Marzocchi et al., 2010) ce ajută la obținerea de hărți probabilistice. Pentru un calcul cât mai riguros al probabilităților și pentru atenuarea incertitudinilor epistemice și aleatoare, pe lângă date geologice, stratigrafice și statistice, se vor efectua și simulări numerice cu ajutorul codurilor TITAN2D și EJECT pentru fenomenele propuse.

## **II.2. Studii de hazard la El Misti**

Până în prezent, studii mai amănunțiate în cazul lui El Misti s-au concentrat pe analiza hazardului și riscului generat de laharuri întrucât acestea au o frecvență ridicată și s-au format și fără a fi necesară o erupție (Stinton et al., 2004, Delaite et al., 2005, Vargas et al, 2010, Martelli, 2011).

### **II.2.1. Scenarii eruptive pentru El Misti**

Thouret et al. (1999a) și Delaite et al. (2005), în urma analizei statistice a tipurilor eruptive la El Misti și a recurenței acestora, au propus pentru analiza hazardelor, trei scenarii eruptive. Aceste scenarii sunt bazate pe cele mai importante tipuri de activitate vulcanică identificate la El Misti: - 1) Un eveniment de **magnitudine mică**; 2) Un eveniment de **magnitudine medie**; 3) Un eveniment de **magnitudine mare**.

### **II.2.2. Selectarea hazardelor pentru studiul de caz**

Pentru studiul de față, s-a ales efectuarea unei analize de evaluare a hazardelor generate de curgerile piroclastice tip pyroclastic flows produse în urma colapsului unei coloane eruptive și de bombe vulcanice.

### **II.2.3. Pyroclastic flows și pyroclastic surges**

Diferențele principale între aceste două tipuri sunt: compoziție diferită și reologie diferită. Curgerile de tip pyroclastic flows sunt caracterizate de interacțiunea a două fracțiuni compoziționale: particule solide și gaz; iar curgerile de tip pyroclastic surges sunt alcătuite din trei fracțiuni compoziționale: particule solide, gaz și picături de apă. Aceste diferențe influențează puternic dinamica și reologia curgerilor, făcând modelare numerică a acestora mult mai dificilă.

## **II.3. Metode pentru evaluarea hazardelor generate de pyroclastic flows și bombe vulcanice propuse pentru El Misti**

### **II.3.1. Metode de modelare numerică computerizată**

#### **II.3.1.1. Curgeri piroclastice (PFs)**

TITAN2D (Fig. 15) este un software creat de Geophysical Mass Flow Group la State University of New York at Buffalo (S.U.A.), și permite utilizatorului să simuleze

curgeri granulare pe modele de elevație digitale ale terenului (DEM). Acest model este bazat pe media - adâncimii unei mixturi incompresibile caracterizată de ecuațiile lui Coulomb; un model de curgere granulară de mică adâncime. TITAN2D combină simulările numerice a unei curgeri, cu un model de elevație digitală (DEM) printr-o interfață GIS (TITAN2D User Guide). Parametrii care se iau în calcul pentru simulări sunt volumul curgerii, unghiul de frecare a particulelor între ele (internal friction angle), unghiul de frecare cu suprafața de alunecare (bed friction angle), viteza inițială a curgerii și direcția. Modelul matematic pe care se bazează TITAN2D este descris în Patra et al. 2005 și Pitman et al. 2003, iar în Tabelul 6 este prezentat un sumar al unor parametri simulați de diferiți autori pentru diferite curgeri de tip pyroclastic flows la alți vulcani.

### **II.3.1.2. Bombele vulcanice (BA)**

Un obiect balistic ce călătorește prin atmosferă este supus unor forțe care îi dictează viteza și traiectoria (Fig. 17), cum ar fi forța gravitațională, forța de frecare cu atmosfera etc. Mastin (2001) a propus un cod computerizat de calcul al traiectoriilor obiectelor balistice, bazat pe ecuațiile balistice de bază și câteva condiții inițiale. Acest cod se numește EJECT (Fig. 18) și este folosit pentru determinarea distanțelor parcurse de bombele vulcanice în cazul lui El Misti.

Pentru efectuarea simulărilor, codul EJECT are nevoie ca și input de câțiva parametri: - indicele de frecare cu atmosfera, diametrul și forma obiectului balistic simulat, densitatea acestuia, unghiul de expulzare, direcția și viteza vântului și o viteză inițială de expulzare. Rezultatele sunt fie în format .txt ce conține distanța maximă parcursă, înălțimea maximă atinsă și viteza terminală a obiectului balistic, fie sub forma unui grafic generat în interfața codului (Figura 18) .

### **II.3.2. Metode probabilistice de evaluare a hazardelor vulcanice propuse pentru El Misti**

Pentru studiul de față, rezultatele obținute din simulările cu TITAN2D și EJECT alături de datele geologice, vor fi cuantificate și compilate cu ajutorul softului *BET\_VH – Bayesian Event Tree for Volcanic Hazards*, pentru a elabora hărțile probabilităților.

#### **II.3.2.1. BET\_EF (asta e numele softului – nu tradu)**

*BET\_EF – Bayesian Event Tree for Eruption Forecasting* (Marzocchi et al., 2008) este un cod statistic utilizat pentru estimarea și vizualizarea predicțiilor vulcanice pe termen lung și scurt – *BET\_EF* – a hazardelor vulcanice - *BET\_VH*, cât și a incertitudinilor asociate (epistemice și aleatorii).

BET este un model probabilistic care folosește toate informațiile vulcanologice – modele teoretice și empirice, date geologice și istorice, observații de monitorizare – pentru a obține probabilitățile de apariție a oricărui eveniment vulcanic. Aceste probabilități reprezintă o sinteză omogenă și cantitativă a tot ceea ce știm despre vulcan.

Cu ajutorul lui *BET\_EF* se poate calcula: Nodul 1 – probabilitatea ca vulcanul să intre în stadiul de *unrest*; Nodul 2 – probabilitatea ca acest „*unrest*” (cuvântul asta nu-l tradu – așa ramane) să fie de origine magmatică; Nodul 3 – probabilitatea ca un *unrest*

magmatic să ducă la o erupție magmatică; Nodul 4 – probabilitatea ca această erupție să se inițieze într-o anumită locație și Nodul 5 – probabilitatea ca această erupție să fie de o anumită magnitudine.

### II.3.2.2. BET\_VH

**BET\_VH** – *Bayesian Event Tree for Volcanic Hazards* (Fig. 19) (Marzocchi et al., 2010) – este deasemenea un soft ce utilizează schema „event – tree” pentru calculul probabilităților hazardelor vulcanice pe termen lung (long – term volcanic hazards). Schema BET\_VH este o continuare „naturală” a codului BET\_EF ce oferă probabilitățile de erupție, pe termen scurt (short-term eruption forecasting). Schema tip „event – tree” folosită în studiul hazardelor vulcanice, ne ajută să calculăm probabilitatea condițională și absolută a unui fenomen vulcanic (i.e. căderi de cenușă, bombe vulcanice, curgeri piroclastice, laharuri și avalanșe de debris) de a apărea și a afecta o anumită zonă de interes în jurul vulcanului. Acest lucru se realizează prin calcularea condițiilor de bază a unei evaluări probabilistice a hazardelor vulcanice: (i) probabilitatea de erupție, (ii) probabilitatea relativă ca acea erupție să aibă o anumită magnitudine, (iii) probabilitatea ca unele dintre fenomenele hazardoase mai sus menționate să apară, la care se adaugă (iv) probabilitatea ca un astfel de fenomen să atingă / afecteze o anumită distanță / zonă (Figura 19).

## II.4. Baza de date pentru evaluare probabilistică a hazardelor: modelarea PFs și BA la El Misti

### II.4.1. Modelarea numerică computerizată a curgerilor piroclastice (PFs)

#### II.4.1.1. Parametrii utilizați în TITAN2D

S-au efectuat 9 simulări pentru o erupție Vulcaniană / Freatomagmatică, 10 simulări pentru o erupție Subpliniană / Pliniană și 9 simulări pentru una Pliniană. Simulările s-au efectuat pe un **DEM** cu o rezoluție de **30m** care reprezintă vulcanul El Misti și orașul Arequipa (Fig. 22). Volumele simulate au fost împărțite în volume mai mici dispuse radial în jurul craterului, locația de inițiere fiind aleasă în funcție de altitudinea de generare a curgerilor piroclastice extrase din Wilson et al. (1980). S-au simulat volume: - între  $6 \times 10^6 \text{ m}^3$  și  $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$  pentru cazul unei erupții Vulcaniene / Freatomagmatice; între  $5 \times 10^7 \text{ m}^3$  și  $5 \times 10^8 \text{ m}^3$  pentru o erupție Subpliniană / Pliniană și între  $10^9 \text{ m}^3$  și  $3 \times 10^9 \text{ m}^3$  pentru o erupție Pliniană. Vitezele initiale au fost extrase cu ajutorul ecuației (1) și s-au obținut: -  $v = 98.8 \text{ m/s}$  pentru scenariul Vulcanian / Freatomagmatic;  $v = 140 \text{ m/s}$  pentru Subplinian / Plinian și  $v = 198 \text{ m/s}$  pentru cel Plinian. Unghiul de frecare internă a fost stabilit la  $(\phi_{im}) = 35^\circ$  întrucât simulările de test cât și studii precedente (e.g. Sheridan et al. 2005; Capra et al. 2008, Procter et al. 2010) au arătat că acest parametru nu are influență mare asupra simulărilor. Unghiurile de frecare cu suprafața de alunecare (bed friction) a fost stabilit prin efectuarea mai multor simulări test calibrate cu datele din teren: -  $(\phi_{bed}) = 22^\circ$  pentru curgerile tip pyroclastic flows generate de o erupție Vulcaniană / Freatomagmatică;  $(\phi_{bed}) = 14^\circ$  pentru cele Subpliniene / Pliniene și  $(\phi_{bed}) = 11^\circ$  pentru cele generate de o erupție Pliniană mare. Rezultatele

simulărilor cu aceste valori de frecare corespund și cu calculele teoretice ale raportului  $H/L$  în cazul lui El Misti (ecuația 5). Tabelul 7 prezintă un sumar al parametrilor folosiți pentru simulările efectuate.

#### II.4.1.2. Rezultatele TITAN2D

În general rezultatele se potrivesc la scară regională (Fig. 23) cu observațiile în teren ale depozitelor fostelor erupții. Deși distribuția pyroclastic flows mai mari (Subplinien, Plinien), este mai extinsă decât extensia celor prezente în teren, lipsa materialului în teren poate fi datorată eroziunii de-a lungul timpului a stratorilor sedimentate foarte fine.

Pentru o erupție *Vulcaniană / Freatomagmatică* (Figura 24 a,b,c,d,e,f,g,h,i) – simulările arată ca depozitele curgerilor de tip pyroclastic flows sunt restrânse în partea superioară a conului vulcanic, în jurul craterului și în general au urmat rețeaua de ravine ce converg în cele patru văi: Quebradas Agua Salada, Huarangal, San Lazaro și Rio Chili (asa se numesc vaile – nu te chinui sa le traduci)

Rezultatele simulărilor pentru o erupție *Subpliniană / Pliniană* (Figura 25 a,b,c,d,e,f,g,h,i,j): - În Quebradas San Lazaro, Huarangal and Agua Salada depozitele au o grosime între 10 și 100 cm chiar în suburbiile orașului aflate la 9 km depărtare de vulcan. Depozitele curgerilor piroclastice simulate în cazul scenariului Subplinian / Plinian sunt consistente cu extinderea spațială a celor generate în timpul erupției din 2030 a. B.P. (Thouret et al., 2001; Cobeñas et al., 2012).

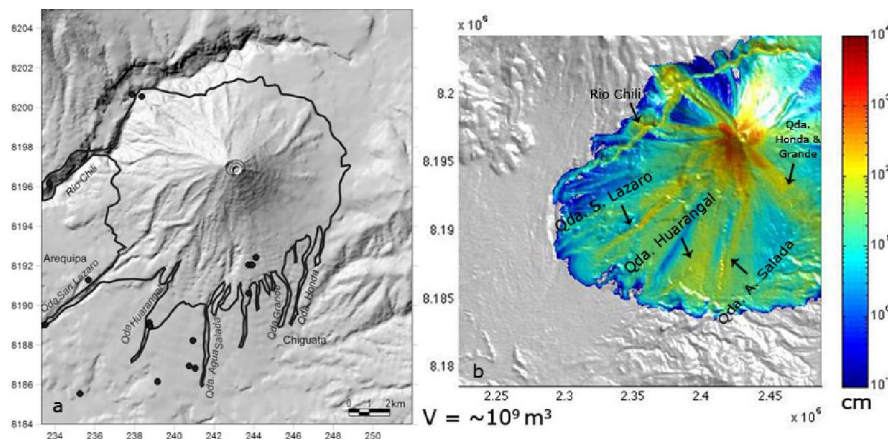


Figure 23. Comparație între a) extinderea spațială a depozitelor curgerilor piroclastice rezultate în urma erupției Subplinien din 2030 B.P. a lui El Misti (Cobenias et al. 2012) și b) o simulare TITAN2D cu un volum similar acestei erupții.

În cazul unei erupții mari, *Pliniene* (Figura 26 a,b,c,d,e,f,g,h,i) simulările arată că la volume mai mari de  $10^9 \text{ m}^3$ , curgerile piroclastice de tip pyroclastic flows vor avansa mult pe teritoriul orașului la distanțe mai mari de 12 km depărtare de crater.

#### II.4.1.3. Implicațiile rezoluției DEM-ului în simulările cu TITAN2D: exemplul curgerilor de tip block-and-ash-flows (BaFs) la El Misti

În studiul lor, Capra et al. (2010) au arătat că rezoluția DEM-ului are un rol foarte important în simularea unor curgeri piroclastice de tip block-and-ash-flows generate de

colapsul unor domuri de lavă. Pentru studiul de față, s-au efectuat simulări cu ajutorul TITAN2D pentru curgeri de tip block-and-ash-flows generate de colapsul unor domuri de lavă, pe flancul S-SW a lui El Misti, pe două DEM-uri de 20m și de 30m rezoluție.

#### II.4.1.3.1. Parametrii utilizați în TITAN2D pentru BaFs

Volumele simulate au fost compilate din alte studii întrucât pentru El Misti nu sunt disponibile date complete: -  $\sim 3 \times 10^6 m^3$ ,  $\sim 1 \times 10^6 m^3$  (Charbonnier and Gertisser 2008, 2012, Procter et al. 2010), și  $\sim 0.5 \times 10^6 m^3$  (Sulpizio et al. 2010), generate în urma colapsului unor domuri vulcanice, într-un singur puls. Unghiul de frecare internă a fost stabilit la  $\phi_{int} = 30^\circ$ , fiind în concordanță cu studiile precedente (e.g. Charbonnier and Gertisser, 2009, 2012; Procter et al., 2010, Sheridan et al., 2005). Unghiurile de frecare cu suprafața de alunecare au fost stabilite la  $\phi_{bed} = 11^\circ$  și  $\phi_{bed} = 20^\circ$ . Locația de inițiere a acestor curgeri s-a ales la cota de  $\sim 4400$  masl, cotă ce corespunde cu zona hidrotermală și o discontinuitate structurală rezultată într-unul dintre stagiile în care la El Misti s-au format caldere de colaps (Finizola et al., 2004; Tort și Finizola, 2005).

#### II.4.1.3.2. Rezultatele TITAN2D pentru BaFs

Din simulări, curgerile de tip block-and-ash-flows urmăresc văile existente pe o distanță de aproximativ 2 – 5 km. În general s-a observat că la rezoluția de 20m a DEM-ului, curgerile rămân mai canalizate în văi și parcurg distanțe mai mari, iar pe DEM-ul de 30m, acestea au parcurs distanțe mai scurte și prezintă revărsări peste marginile canalelor. Simulările acestea au evidențiat faptul că pentru o deliniere cu acuratețe ridicată a a extensiei curgerilor piroclastice, este necesară utilizarea unui DEM cu o rezoluție cât mai bună pentru simulările numerice.

### II.4.2. Modelarea numerică computerizată a bombelor vulcanice (BA)

#### II.4.2.1. Parametrii utilizați în EJECT

S-au efectuat 16 simulări cu obiecte balistice de  $0.5$  și  $1$  m diametru, expulzate la viteze inițiale de  $150$  și  $200$  m/s (Fig. 31). Alte valori utilizate pentru simulări au fost: - indicele de frecare cu atmosfera, care este atât constant cât și variabil ( $C_d = 1$ ,  $C_d = var.$ ); - unghiul de lansare al obiectului balistic a fost testat pentru  $35^\circ$  și  $45^\circ$ ; altitudinea de lansare a fost setată la  $5800$  masl deoarece codul EJECT are în calcul variațiile atmosferice la diferite altitudini (e.g. presiunea, umiditatea), iar densitatea bombelor simulate a fost setată la  $2500$  kg/m<sup>3</sup>, densitatea aproximativă a andezitului.

#### II.4.2.2. Rezultatele EJECT

Rezultatele obținute cu EJECT arată distanțe parcurse între 1.6 și 3.9 km față de crater. Aceste valori pot fi considerate apropiate de imaginea reală vulcanologică întrucât astfel de valori au fost înregistrate și la alți vulcani și consemnate în literatura de specialitate (Fudali and Melson 1972 – Arenal, Waitt et al. 1995 – mt. Spurr, Mastin



1991 – Inyo Craters, Druitt et al. 2002 – Soufriere hills, Minakami 1942, Steinberg and Lorenz 1983 - Asama).

<b>Diameter</b> ( <i>m</i> )	<b>Velocity</b> ( <i>m / s</i> )	<b>Ejection angle</b> ( $^{\circ}$ )	<b>Ejection angle</b> ( $^{\circ}$ )	<b>Distance</b> (Cd = var.) <i>m</i>	<b>Distance</b> (Cd = 1) <i>m</i>	<b>Maximum height</b> (Cd = var.) <i>m</i>	<b>Maximum height</b> (Cd = 1) <i>m</i>
0.5	150	35	-	<b>2077</b>	<b>1678</b>	370	328
0.5	150	-	45	<b>2203</b>	<b>1735</b>	560	489
0.5	200	35	-	<b>3565</b>	<b>2585</b>	184	134
0.5	200	-	45	<b>3770</b>	<b>2642</b>	974	789
1	150	35	-	<b>2107</b>	<b>1881</b>	372	350
1	150	-	45	<b>2235</b>	<b>1969</b>	565	526
1	200	35	-	<b>3689</b>	<b>3065</b>	657	593
1	200	-	45	<b>3903</b>	<b>3182</b>	995	885

Tabelul 10. Parametrii utilizați ca și input și distanțele parcurse de blocurile balistice simulate (coloanele 5 și 6).

## II.5. Evaluarea probabilistică a hazardelor generate de PFs și BA la El Misti

### II.5.1. Un Event – Tree pentru El Misti

După cum s-a prezentat în secțiunile anterioare, pentru analiza probabilistică a hazardelor cu ajutorul codului BET\_VH, se vor folosi atât date de natură geologică, stratigrafică sau teoretică numite *past data* și datele obținute cu ajutorul simulărilor TITAN2D și EJECT ca și *prior models*. Conform schemei propuse în Figura 18, analiza BET\_VH se va efectua într-un cadru de tip „Event – Tree”. Acest event – tree pentru El Misti a fost propus de Sandri et al. (2012 – în pregătire) și prezentat în figura 35. Din acest event – tree, pentru analiza de față se vor calcula probabilitățile pentru curgerile de tip **pyroclastic flows (PFs)** și a bombelor vulcanice/ **volcanic ballistics (Ba)**.

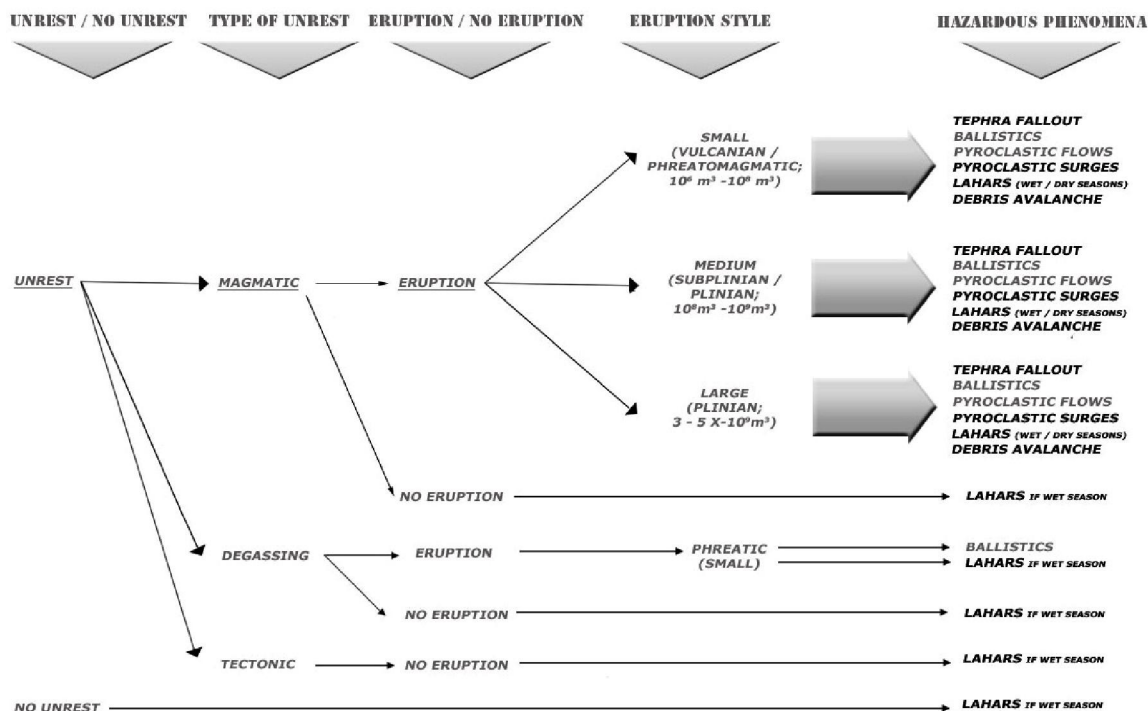


Figura 35. „Event – tree” –ul propus pentru vulcanul El Misti de grupul Sandri et al. 2012. Cu gri – deschis sunt reprezentate hazardele și evenimentele propus în acest studiu.

## II.5.2. Nodurile 1 – 6 pentru El Misti

### II.5.2.1. Nodul 1-2-3

Probabilitățile de erupție calculate la N 1 -2 -3 au fost obținute luându-se în considerare frecvența erupțiilor la El Misti în ultimii 35,000 de ani, frecvența episoadelor de intruziune magmatică, episoade tectonice sau freatice, cât și frecvența erupțiilor rezultate din aceste cauze la vulcani analog. Întrucât hazardele vulcanice sunt condiționate de iminența unei erupții, probabilitatea obținută la Nodul 1-2-3 este produsul probabilităților (N1) de a avea unrest, de origine magmatică (N2) care să producă o erupție (N3). Astfel, probabilitatea actuală de a avea o erupție la El Misti a fost calculată la  $P_e_{1-2-3} = 0.0039 / an$ . Ca și *prior model* se consideră o șanse egale de a avea sau nu o erupție dacă este detectat un unrest de origine magmatică. Pentru Nodul 1-2-3, s-a folosit ca și *past data* **14 episoade de unrest înregistrate în ultimii 110 ani**. Aceste episoade de unrest, în caul lui El Misti, s-a stabilit a fi fie de natură **tectonică (12 episoade** - Pacheco and Sykes, 1992), fie de natură **magmatică (0 episoade)** fie datorate unei **degazeificări** puternice și explozive (**2 episoade**) ca și cele din anii 1985 și 1985 Chávez Chávez, 1992.

### II.5.2.2. Nodul 4

În continuare, pentru Nodul 4 se definesc probabilitățile de deschidere a unui nou crater (vent) de erupție, care poate fi oriunde pe flancurile conului sau în craterul existent. Dată fiind existența unor discontinuități structurale la nivelele de 4400 masl și 4800 masl (Finizola et al. 2004, Tort and Finizola 2005) s-au ales 5 posibile venturi. Astfel, ca și *prior model* s-au considerat: - un **vent central** cu o probabilitate de **90%**; un vent pe

flancul NE cu o probabilitate de **1%**; pe flancurile SE și SW la o altitudine de 4400 masl cu o probabilitate de **2%** și respectiv **1%**; un vent pe flancul NW cu o probabilitate de **6%**. La acest nod nu se folosește *past data*.

### II.5.2.3. Nodul 5

La N -5 se definesc tipurile de erupție. Având în vedere activitatea lui El Misti în ultimii 35,000 de ani, s-au desemnat 3 tipuri de erupție magmatică și un tip de erupție freatică. În concordanță cu scenariile eruptive definite pentru simulările numerice și cu cele propuse de Thouret et al. (2001) și Delaite et al. (2005), pentru Nodul 5 s-au definit:

(1) o erupție de magnitudine **mică / small (Vulcaniană / Freatomagmatică, VEI <3)** cu un volum total de tephra între  $10^6 \text{ m}^3$  și  $10^8 \text{ m}^3$ .

(2) o erupție de magnitudine **medie / medium (Subpliniană / Pliniană, VEI 3- 4)** cu un volum total de tephra între  $10^8 \text{ m}^3$  și  $10^9 \text{ m}^3$ .

(3) și o erupție de magnitudine **mare / large (Pliniană, VEI > 4)** cu un volum total de tephra între 3 și  $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

Ca și *past data* se folosesc date doar din ultimii 10,000 de ani. Se consideră că depozitele eruptiilor mai vechi de atât pot fi înșelătoare, favorizând evenimentele mari și defavorizând erupții mici, Vulcaniene, a căror depozite se pot pierde ușor în secțiunea stratigrafică. În ultimii 10,000 de ani la El Misti au fost **4 erupții Vulcaniene** (Thouret et al., 2001), **1 Subpliniană / Pliniană** (Thouret et al., 2001; Cobeñas et al., 2012) și **0 Pliniene** (Thouret et al., 2001). Ca și *prior models* se consideră o distribuție de tip „power – law” în care erupțiile mici au o probabilitate de ocurență cu un ordin de magnitudine mai mare decât cele mari (Marzocchi et al., 2004), astfel obținându-se:

### II.5.2.4. Nodul 6

Analiza acestor hazarde se va face pe un DEM (în loc de DEM, în franceza este MNT) cu rezoluție de 30m care acoperă o suprafață de 32 x 31 km ce cuprinde vulcanul El Misti și orașul Arequipa. Această suprafață a fost împărțită într-un grid de 960 de celule (locații de interes) cu dimensiunea de 1 x 1 km (Fig. 33).

*Past data* nu se consideră la acest nod. Ca și *prior models* se consideră o probabilitate de **100%** ca **bombele vulcanice** să apară în cazul producerii oricărui tip de erupție. În cazul curgerilor piroclastice de tip pyroclastic flows, s-au folosit date compilate de Newhall și Hoblitt (2002) care au stabilit că o erupție **Vulcaniană** are o probabilitate de **10%** să producă acest tip de curgeri piroclastice, o erupție **Subpliniană 50%** iar una **Pliniană 70%**. În Tabelul 11 este prezentat un sumar al datelor folosite (*past data* și *prior models*) pentru a se obține hărțile probabilistice.

## II.6. Rezultatele evaluării probabilistice a PFs

### II.6.1. Nodurile 7 și 8

La Nodurile 7 și 8 se calculează probabilitatea ca o locație de interes (una din cele 960 de celule prestabilite) să fie afectată de o curgere piroclastică, și probabilitatea ca aceasta să depășească limitele prestabilite. Ca și *past data* s-au folosit extensia spațială a depozitelor de curgeri piroclastice de la erupții din trecutul lui El Misti, în concordanță cu

scenariile eruptive propuse. În Figura 36 a,b și c sunt reprezentate depozitele erupțiilor: a) Vulcaniene (11,300 B.P), b) Subpliniene / Pliniene (2030 B.P.) și c) Pliniene (~ 34,000 B.P. și ~ 21,000 B.P.). Cele 28 de simulări efectuate cu TITAN2D sunt considerate *prior models* în analiza BET la acest nod.

## II.6.2. Hărțile probabilistice obținute pentru PFs

Rezultatele BET\_VH sunt ilustrate sub formă de hărți ale probabilităților, care, în cadrul interfeței programului sunt interactive, dar și sub formă de tabele care afișează probabilitățile cerute pentru fiecare locație de interes din jurul vulcanului (cele 960 celule).

**Hărțile probabilităților condiționale:** - Hărțile probabilităților condiționale prezintă probabilitatea ca o locație de interes din jurul vulcanului să fie atinsă de curgerile piroclastice generate de un anumit tip de erupție. Din hărțile rezultate (Fig. 37 a,b,c) se observă că probabilitățile cele mai ridicate sunt în dreptul văilor majore Quebradas Agua Salada, Huarangal și San Lazaro cât și în valea Rio Chili. În general probabilitățile scad o dată cu distanța față de crater, în afara de văile principale.

**Harta probabilității absolute:** - Harta probabilităților absolute (Fig. 38) prezintă probabilități mai scăzute decât cele condiționale deoarece în calculul absolut, se ia posibilitatea ca orice tip de erupție luat în considerare să se întâmple.

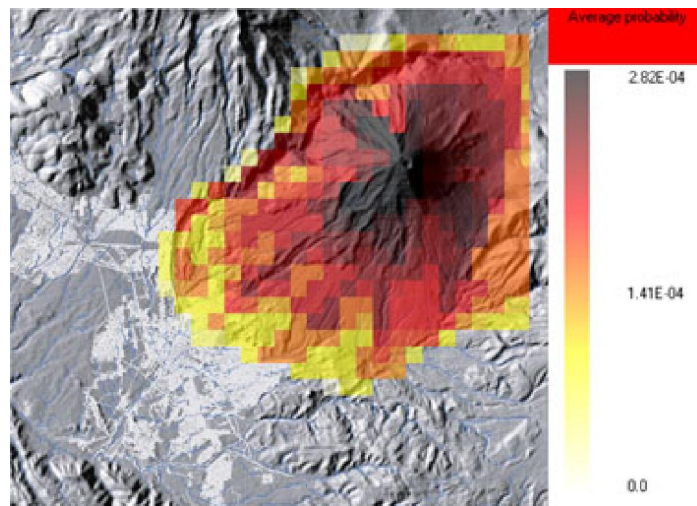


Figura 38. Harta probabilităților absolute de a avea curgeri piroclastice rezultate în urma oricărui tip de erupție analizat.

## II.7. Rezultatele evaluării probabilistice a BA

### II.7.1. Nodurile 7 și 8

În cazul lui El Misti nu există informații publicate ale unor eventuale măsurători de bombe vulcanice, astfel ca și *past data* nu s-a folosit nici o informație la acest nod. Ca și *prior models* s-au folosit traiectoriile obținute în cele 16 simulărcu EJECT. Aceste traiectorii au fost proiectate pe grid-ul utilizat pentru analiza probabilistică (Fig. 33) și

informațiile astfel obținute au fost transformate în limbaj binar pentru utilizarea în BET\_VH.

## II.7.2. Hărțile probabilistice obținute pentru BA

**Hărțile probabilităților condiționale:** - Hărțile probabilităților condiționale (Fig. 36 a,b,c) prezintă probabilitatea ca o anumită locație de interes, să fie atinsă de un bloc balistic expulzat de o erupție Vulcaniană, Subpliniană sau Pliniană.

**Hărțile probabilităților absolute:** - Spre deosebire de probabilitățile condiționale, hărțile probabilităților absolute arată probabilitatea ca o anumită locație de interes din jurul vulcanului să fie atinsă de un bloc balistic, indiferent de ce tip de erupție avem.

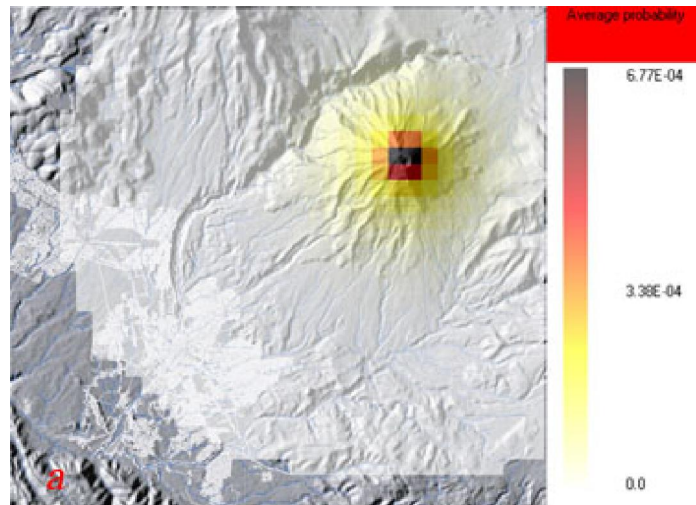


Figura 40 a. Harta probabilităților absolute. Reprezintă probabilitatea ca zona superioară a conului să fie afectată de bombe vulcanice rezultate în urma unor erupții magmatice Vulcaniene, Subpliniene sau Pliniene la El Misti.

## PARTEA a III - a: Implicațiile modelării numerice și a analizei probabilistice

### III.1. Implicațiile modelării numerice computerizate a PFs în evaluarea vulnerabilității fizice

#### III.1.1. Aspecte ale vulnerabilității fizice în fața PFs

În general pagubele materialele și victimele curgerilor piroclastice sunt supuse temperaturilor ridicate ale acestora ( $< 100 < 900^{\circ}$  C). Presiunea dinamică laterală exercitată de masa unei curgeri piroclastice poate duce la colapsul peretilor clădirilor, la infiltrații ce produc incendii și coroziune intensă (Pomonis et al., 1999). Integritatea structurală a clădirilor este un factor cheie în evaluarea pagubelor și pierderilor de vieți omenești datorate impactului unei curgeri piroclastice cu o zonă populată.

#### III.1.2. Caracteristici generale ale clădirilor din suburbiile orașului Arequipa și expunerea la PFs



Datorită gradului ridicat de sărăcie, clădirile din suburbiile Arequipa nu prezintă caracteristicile structurale ale celor din zonele mai bogate (Fig. 41). Un lucru mai important de luat în considerare este localizarea clădirilor. Multe dintre aceste clădiri sărăcăcioase sunt situate chiar în albia văilor Quebradas Huarangal și San Lazaro (Fig. 38), iar în aceste văi, Thouret et al. (2001) au identificat depozite extinse ale unor fose curgeri piroclastice. După cum se poate observa din simulările cu TITAN2D, în cazul unor PFs generate de o erupție Vulcaniană, acestea vor acoperi doar partea superioară a conului, neafectând orașul (Fig. 39). Pe de altă parte, o erupție Pliniană ce va produce PFs cu volume de peste  $1\text{km}^3$  va atinge suburbiile situate la 9 km distanța de crater, iar în cazuri excepționale PFs vor înainta chiar și 15 km acoperind cele două conuri aluviale (Fig. 40). Deși studiul vulnerabilității fizice este subiectul unor alte studii, din datele obținute din Vargas et al. (2010) este posibil de a efectua o interpretare calitativă a efectelor posibile rezultate în urma impactului curgerilor piroclastice în suburbiile orașului. Vargas et al. (2010) și Martelli (2011) au efectuat studii de vulnerabilitate fizică asupra clădirilor din Quebrada Huarangal și valea Rio Chili și au identificat trei clase principale de materiale de construcție: - cărămidă și ciment, cărămidă simplă și cărămidă cu sillar (o varietate de tuf vulcanic din regiune). Pe lângă aceste tipuri de materiale de construcții, în albiile văilor există și multe locuințe improvizate, făcute din materiale necorespunzătoare găsite la dispoziție (e.g. panouri de lemn și plastic).

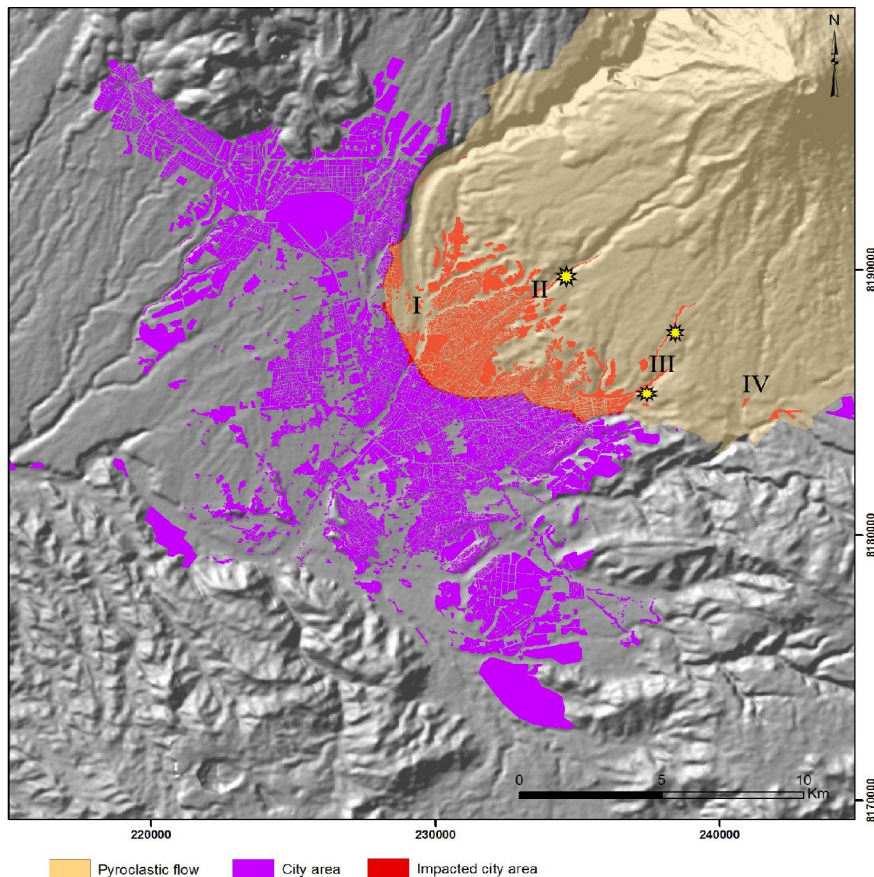


Figura 43. Extinderea spațială a depozitelor unor curgeri piroclastice rezultate în urma unei erupții Pliniene la El Misti. Cu roșu este reprezentată zona orașului potențial acoperită de aceste curgeri piroclastice, însumând  $16\text{km}^2$ .

### **III.1.3. Implicații pentru evaluarea vulnerabilității fizice**

Din datele compilate din Vargas et al. (2010) și din caracteristicile curgerilor piroclastice pertinente studiilor de vulnerabilitate fizică, putem trage următoarele concluzii: (1) distanța la care se află primele construcții este de 9 km față de crater. Deoarece viteza curgerilor scade odată cu distanța și grosimea stratelor nu pare să depășească 0.3 m, este posibil să se conchidă faptul că presiunea dinamică a curgerilor piroclastice va fi mai mică de 1kPa la 9 km depărtare. (2) considerând faptul că majoritatea clădirilor din regiune sunt construite din ciment și cărămidă alături de studiile lui Baxter et al. (2005), nu se așteaptă pagube însemnate asupra integrității clădirilor din zona inundată de curgeri piroclastice. (3) cele mai însemnate pagube se așteaptă asupra clădirilor din materiale improvizate aflate în albiile văilor San Lazaro și Huarangal.

### **III.2. Implicații ale evaluării probabilistice în evaluarea riscului**

În general, „riscul, ca și funcție a hazardului și a vulnerabilității, este raportat la pierderi materiale și de vieți omenești. Perceperea riscului presupune și managementul acestuia într-un proces unitar de analiză și proiecție teritorială a efectelor prin intermediul hărților de risc (Irimuş, 2005). Dată fiind complexitatea erupțiilor vulcanice cât și a faptului că acestea reprezintă mai mult fenomene rare raportându-ne la scara temporală umană, o abordare probabilistică Bayesiană poate fi eficientă în evaluarea riscului vulcanic deoarece permite estimarea probabilităților fiecărui pas dintr-o erupție vulcanică, bazându-se atât pe date geologice cât și pe modele numerice și computerizate. Utilizarea mai multor surse de informații face ca incertitudinile epistemice și aleatorii să fie calculate cu acuratețe reflectând calitatea datelor utilizate.

Din hărțile depozitelor fostelor curgeri piroclastice cât și din simulările cu TITAN2D, se poate spune că o erupție Plinienă la El Misti poate fi considerată drept cel mai rău scenariu pentru Arequipa. Deoarece în acest caz suburbiile orașului sunt cele mai amenințate atât în cazul erupțiilor trecute cât și în cazul simulărilor numerice, BET\_VH a alocat probabilități ridicate în aceste văi. În cazul lui El Misti, riscul poate scădea dacă autoritățile vor considera măsuri de prevenire. Deși în prezent există legi care să nu permită oamenilor să ocupe văile expuse la curgeri piroclastice, un număr însemnat de locuitori încă este prezent.

### **III.3. Discuții: limitările simulărilor numerice utilizând studiul de caz El Misti**

Pentru studiul de față s-au efectuat simulări numerice cu ajutorul TITAN2D pentru a putea avea o idee asupra extinderii spațiale a curgerilor piroclastice tip pyroclastic flows în cazul unor erupții viitoare la El Misti. Deși s-au efectuat mai multe simulări pentru o calibrare cât mai bună a parametrilor simulați cu datele din teren, în final tot nu există o corelare a acestor date cu acuratețe de 100%. Pentru creșterea eficacității simulărilor numerice și pentru scăderea incertitudinii din analiza probabilistică, se poate menționa îmbunătățirea unor anumiți factori: (1) obținerea unui DEM cu o rezoluție cât mai mare care să reprezinte cât mai fidel terenul cu toate caracteristicile topografice; (2) completarea unui catalog ce conține informații cu acuratețe cât mai ridicată despre distribuția curgerilor de material vulcanic din trecutul

eruptiv, cât și date exacte asupra volumelor și dimensiunii domurilor de lavă; (3) creșterea numărului de simulări numerice și utilizarea mai multor programe de simulare ce rezolvă pentru diferite aspecte ale comportamentului curgerilor de material vulcanic.

## **Concluzii**

### **IV.1. Sumar și concluzii generale ale studiului**

Studiul de față a arătat cum diferite tehnici cum ar fi modelarea numerică și metodele probabilistice pot fi combinate pentru a evalua hazardele generate de curgerile piroclastice tip pyroclastic flows și de bombele vulcanice la vulcanul El Misti.

Primul obiectiv al studiului a fost obținerea distribuției curgerilor piroclastice și a bombelor vulcanice în jurul conului vulcanic, folosind simulări numerice cu programele TITAN2D și EJECT. Rezultatele acestor coduri s-au folosit alături de alte informații (e.g. date stratigrafice, geologice; frecvența magnitudine / recurență) într-o schemă de tip Event – Tree în cadrul softului BET\_VH pentru a putea elabora hărțile probabilităților.

Al doilea obiectiv al studiului de față a fost elaborarea unei analize probabilistice ale acestor două hazarde cu ajutorul unei scheme de tip Event – Tree în cadrul softului BET\_VH. Datorită faptului că acest soft facilitează o abordare probabilistică Bayesiană, pentru elaborarea hărților probabilităților s-au putut utiliza diferite surse de informații, de la date geologice și stratigrafice și rezultatele unor alte metode de simulare numerică.

BET\_VH a atribuit probabilitățile având în vedere atât extensia depozitelor curgerilor piroclastice din trecutul eruptiv al vulcanului cât și simulările numerice efectuate. Cele mai mari probabilități au fost obținute în zonele în care amândouă sursele (past data și prior models) au evidențiat inundarea de către curgeri piroclastice.

### **IV.2. Recomendări pentru studii viitoare la El Misti**

Pentru abordarea unei analize probabilistice multi-hazard în cazul lui El Misti, este nevoie de mai multe studii care să acopere aspecte multidisciplinare. În urma studiului de față se pot trage concluzii asupra îmbunătățirii unor anumite aspecte în cadrul unor viitoare cercetări asupra vulcanului El Misti: (1) completarea unui catalog cu informații despre erupțiile din trecut; (2) datorită faptului că erupțiile minore nu pot fi întotdeauna ușor identificate, pentru o analiză statistică a raportului frecvență / magnitudine care să îmbunătățească calculele probabilistice, sunt necesare studii tefrostratigrafice (tephrastratigraphie – e în franceza) cât mai amănunțite; (3) studii de laborator asupra materialelor de pe flancurile vulcanului pot duce la deducerea unor parametri de frecare cât mai buni pentru simulările numerice, îmbunătățind astfel calibrarea modelelor și testarea unor condiții care pot apărea în viitorul eruptiv al vulcanului; (4) pentru a reduce incertitudinile aleatorii și epistemice în cadrul calculului probabilistic, se recomandă testarea și utilizarea mai multor modele numerice care să rezolve anumite aspecte ale curgerilor de material vulcanic; (5) rezoluția DEM-ului este foarte importantă în simulările numerice a curgerilor piroclastice; (6) din punct de vedere al evaluării riscului, este propusă analiza multi-hazard care să acopere toate fenomenele posibile în cazul unei erupții la El Misti. O astfel de analiză multi-hazard este deja în derulare ca și colaborare între Laboratoire Magmas et Volcans (Universitatea Blaise – Pascal, Franța) și INGV



Bologna (Istituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia, Bologna, Italia) (Sandri L., Thouret J.C., Constantinescu R., Biass S., Tonini R., 2012 – în pregătire); (7) pentru o evaluare cât mai bună a vulnerabilității fizice a clădirilor din zona potențial afectată, se recomandă un studiu în teren care să încorporeze ingineri civili care pot recomanda mult mai ușor îmbunătățirile necesare clădirilor.

### **Lista selectivă a referințelor**

1. Alatorre-Ibargüengoitia M.A. (2011) *A model of volcanic explosions at Popocatepetl volcano (Mexico): Integrating fragmentation experiments and ballistics analysis*. PhD thesis. LMU, Munich, Germany.

2. Biass S., Bonadonna C. (2012) *A fast GIS – based risk assessment for tephra fallout: the example of Cotopaxi volcano, Ecuador- Part I*. Natural Hazards online DOI: 10.1007/s11069-012-0378-z

3. Blong R.J. (2000) *Volcanic hazards and risk assessment*. In H. Sigurdsson et al. (eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press: p. 1215-1224.

4. Blong R.J. (1984) *Volcanic Hazards – A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press, Sydney, Australia

5. Bonadonna C. (2006) *Probabilistic modelling of tephra dispersal*. In: Mader H, Cole S, Connor CB (eds) *Statistics in Volcanology*. IAVCEI Series Volume 1, Geological Society of London: p. 243-259

6. Capra L., Manea V.C., Manea M., Norini G. (2010) *The importance of digital elevation model resolution on granular flow simulations: a test case for Colima volcano using TITAN2D computational routine*. Natural Hazards DOI 10.1007/s11069-011-9788-6.

7. Charbonnier S.J., Gertisser R. (2009), *Numerical simulations of block-and-ash flows using Titan2D flow model : examples from the 2006 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia*. Bulletin of Volcanology 71:p. 953 – 959

8. Chester K. (2005) *Volcanoes, society and culture*. In Marti J. and Ernst G.J. (eds) *Volcanoes and the environment*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. p.404 – 439.

9. Cobeñas G., Thouret J.C., Bonadonna C., Boivin P., (2012), *The c.2030 yr. BP-old Plinian eruption of El Misti, Peru: characteristics of the fallout and pyroclastic flows, and eruption dynamics*. Journal of Volcanology and Geothermal Research Online 12 June : doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.006

10. Constantinescu R., Thouret J.C., Sandri L., Irimuş I.A., Stănescu R. (2012) *BET\_VH probabilistic assessment of pyroclastic flows hazard at El Misti volcano, Southern Peru, based on stratigraphic record and numerical simulations with Titan2D*. Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU 2012 – 8997 -1

11. Constantinescu R., Thouret J.C., Sandri L. (2011) *Volcanic hazard assessment for El Misti volcano (South Peru) based on BET\_VH (Bayesian Event Tree for Volcanic Hazard) software*. Geophysical Research Abstracts Vol. 13. EGU 2011 – 8628 – 1

12. Constantinescu R., Thouret J.C., Irimuş I.A. (2011) *Computer modeling as tool for volcanic hazards assessment: an example of pyroclastic flows modeling at El Misti volcano, Southern Peru*. Geographia Technica 2: p. 1 - 14

13. Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M. F., Stinton, A., Labazuy, P., Souriot, T., and van Westen, C., (2005) *Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars*. Zeitschrift für Geomorphology N.F., suppl.140: p. 209-231
14. Druitt T.H. (1998), *Pyroclastic density currents*. In Gilbert J.S and Sparks R.S. J (eds) *The physics of explosive volcanic eruptions*. Geological Society of London, Special Publication No. 145: p. 145 – 182
15. Fagents S.A., Wilson L. (1993) *Explosive volcanic eruptions- VII. The ranges of pyroclasts ejected in transient volcanic explosions*. Geophys. J. Int. 113. p. 359-370.
16. Finizola A., Lénat J-F., Macedo O., Ramos D., Thouret J-C., Sortino F., (2004) *Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements*: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 135, 4, p. 343-360.
17. Fisher R.V. (1995) *Decoupling of pyroclastic currents: hazard assessment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 66: p. 257 - 263
18. Fudali R.F., Melson W.G. (1972) *Ejecta velocities, magma chamber pressure and kinetic energy associated with the 1968 eruption of Arenal volcano*. Bulletin of Volcanology 35: p. 383- 401
19. Irimuş I.A. (2006) *Hazarde și riscuri asociate proceselor geomorfologice în aria cutelor diapire din Depresiunea Transilvaniei*. Ed. Casa Cărții de știință, Cluj – Napoca. p. 286
20. Irimuş I.A., Vescan I., Man,T. (2005) *Tehnici de cartografiere, monitoring și analiză GIS*, Ed. Casa Cărții de știință, Cluj – Napoca. p. 250
21. Kelfoun K., Samaniego P., Palacios P., Barba D. (2009) *Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well – constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador)*. Bulletin of volcanology 71: p. 1057 – 1075
22. Legros F. (2001) *Tephra stratigraphy of Misti volcano, Peru*. J. South Ame. Earth. Sciences 14: p. 15 – 29
23. Lindsay J.M., Marzocchi W., Jolly G., Constantinescu R., Selva J., Sandri L. (2010) *Towards real-time eruption forecasting in the Auckland Volcanic Field: application of BET\_EF during the New Zealand National Disaster Exercise ‘Ruaumoko’*. Bulletin of volcanology 72: p. 185 – 204
24. Martelli K. (2011) *The physical vulnerability of urban areas facing the threat of inundation from lahars and flash floods: application to the case study of Arequipa, Peru*. Unpublished PhD thesis, Univ. Blaise – Pascal, LMV, France
25. Marzocchi W., Sandri L., Selva J. (2008) *BET\_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting*. Bulletin of Volcanology 70: p. 623–632
26. Marzocchi W., Sandri L., Selva J. (2010) *BET\_VH: a probabilistic tool for long-term volcanic hazard assessment*. Bulletin of Volcanology 72: p. 705 – 716
27. Mastin L.G. (2001) *A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions*. USGS open – file report 01 – 45, version 1.2 online November 2009
28. Nakada S. (2000) *Hazards from pyroclastic flows and surges*. In Sigurdsson H. (ed) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press. p. 945 - 955

29. Newhall C.G., Hoblitt R.P. (2002) *Constructing event trees for volcanic crises*. Bulletin of Volcanology 64: p. 3–20
30. Parfitt E.A., Wilson L. (2008) *Fundamentals of physical volcanology*. Blackwell Publishing Ltd. p. 172
31. Patra A., Bauer A., Nichita C.C., Pitman E.B., Sheridan M.F., Bursik M.I., Rupp B., Webber A., Stinton A.J., Namikawa L., Renschler C. (2005) *Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 139: p. 1–21
32. Pitman E.B., Patra A., Bauer A., Sheridan M.F., Bursik M. (2003) *Computing debris flows and landslides*. Physics of Fluids 15 (12): p. 3638–3646.
33. Procter J.N., Cronin S.J., Platz T., Patra A., Dalbey K., Sheridan M.F., Neall Vince (2010) *Mapping block-and-ash flow hazard based on Titan 2D simulations: a case study from Mt. Taranaki, NZ*. Natural Hazards 53: p. 483 – 501
34. Ruprecht P., Wörner G. (2007) *Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti stratovolcano and Andahua monogenetic cones*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 165: p.142-162.
35. Sandri L., Jolly G., Lindsay J., Howe T., W. Marzocchi (2012) *Combining long- and short-term probabilistic volcanic hazard assessment with cost-benefit analysis to support decision making in a volcanic crisis from the Auckland Volcanic Field, New Zealand*. Bulletin of Volcanology 74: p. 705–723
36. Sandri L., Guidoboni E., Marzocchi W., Selva J. (2009) *Bayesian Event Tree (BET) for eruption forecasting at Vesuvius, Italy: a retrospective forward application to 1631 eruption*. Bulletin of volcanology 71: p. 729 - 745
37. Sheridan M. F., Patra A., Dalbey K., Hubbard B. (2010) *Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using TITAN2D*, Geological Society of America Special Papers 464: p. 281-291
38. Simkin T., Siebert L. (1994) *Volcanoes of the World, 2nd edition*: Smithsonian Institution, Geosciences Press, Inc., 349 p.
39. Ștefănescu E.R., Bursik M. I., Cordoba G., Patra A.K., Pieri D.C., Sheridan M.F. (2010) *Impact of DEM uncertainty on TITAN2D flow model output, Galeras Volcano, Colombia*. 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software. Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada.
40. Sulpizio R., Capra L., Sarocchi D., Saucedo R., Gavilanes – Ruiz J.C., Varley N.R. (2010) *Predicting the block-and-ash flow inundation areas at Volcan de Colima (Colima, Mexico) based on the present day (February 2010) status*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 193: p. 43 – 66
41. Thouret J.C. Nemeth K. (2012) *Special issue on volcano geomorphology 'Landforms, processes and hazards': Introduction*. Geomorphology 136 – 1; p. 1-5.
42. Thouret J.C. (2010) *Volcanic Hazards and Risks: a geomorphological Perspective*. In Alcantara-Ayala I. and Goudie A. (eds.) *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention, Chapter 3*. Cambridge University Press. p. 13-32.
43. Thouret J.C., Rivera M., Wörner G., Gerbe M.C., Finizola A., Fornari M.,cGonzales K. (2005) *Ubinas: the evolution of the historical most active volcano in southern Peru*. Bulletin of Volcanology 67: p. 557-589.

44. Thouret J.C., Dávila J., Juvigné E., Gourgaud A., Boivin P. (2002) *Reconstruction of the AD 1600 explosive eruption at Huaynaputina volcano, Peru, based on geologic evidence and Spanish chronicles*: Journal of Volcanology and Geothermal Research 115, 3-4: p. 529-570.
45. Thouret J.C., Finizola A., Fornari M., Legeley-Padovani A., Frechen M., (2001) *Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru*. Geological Society of America 113/12: p. 1593–1610.
46. Thouret J.C., Suni J., Eissen J-Ph., Navarro P. (1999a) *Assessment of volcanic hazards in the Arequipa area bases on the eruptive history of Misti volcano, southern Peru*. Zeitschrift für Geomorphologie 114: p. 89-112.
47. Thouret J.C., Davila J., Eissen J.-Ph. (1999b) *Largest historic explosive eruption in the Andes at Huaynaputina volcano, south Peru*: Geology, v. 27, 5, p. 435 - 438.
48. Thouret J.C., Legros F., Gourgaud A., Macedo M.L. (1996) *El Misti stratovolcano, South Peru: Eruptions history and implications for hazard assessment*. Andean Geodynamics Extended Abstracts. Third ISAG meeting 17 – 19 Sept. 1996, p. 251 – 254.
49. Tilling R.I. (2009) *Volcanism and associated hazards: the Andean perspective*. Adv. Geosciences 22: p. 125 – 137.
50. Tort A., Finizola A. (2005) *Structural survey of Misti volcanic cone (southern Peru) combining elliptical Fourier function analysis of the volcano morphology and self-potential measurements*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 141: p. 283-297
51. Vargas R.F., Thouret J.C., van Westen C., Sheridan M.F., Siebe C., Marino J., Souriot T., Stinton A. (2010) *Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru*. Geological Society of America Special Paper 464: p. 265 – 280
52. Widiwijayanti C., Voight B., Hidayat D., Schilling S.P. (2009) *Objective rapid delineation of areas at risk from block-and-ash pyroclastic flows and surges*. Bulletin of Volcanology 71: p. 687 – 703
53. Wilson L., Sparks R.S.J., Walker G.P.L. (1980) *Explosive volcanic eruptions – IV. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behavior*, Geophys. J. R. astr. Soc. 63: p. 117 – 148
54. Zuccaro G., Ianniello D. (2004) *Interaction of pyroclastic flows with building structures in an urban settlement: a fluid-dynamic simulation impact model*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 133: p.345–352