

SATEEC과 USPED를 이용한 토양 유실량 산정 및 우선관리 유역 선정 평가

서일규 · 박윤식 · 김남원^{*} · 문종필^{**} · 류지철 · 옥용식^{***} · 김기성 · 임경재[†]

강원대학교 지역건설공학과

^{*}한국건설기술연구원

^{**}농촌진흥청 국립농업과학원

^{***}강원대학교 바이오자원환경학과

Estimation of Soil Erosion using SATEEC and USPED and Determination of Soil Erosion Hot Spot Watershed

Il Kyu Seo · Youn Sik Park · Nam Won Kim^{*} · Jong Pil Moon^{**} · Ji Chul Ryu ·
Yong Sik Ok^{***} · Ki-Sung Kim · Kyoung Jae Lim[†]

Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^{*}*Korea Institute of Construction Technology*

^{**}*National Academy of Agriculture Science*

^{***}*Department of Biological Environment, Kangwon National University*

(Received 14 January 2010, Revised 18 March 2010, Accepted 22 March 2010)

Abstract

Severe muddy water problem has been the hot issue in Korea. Because of increased nonpoint source pollutions at Kangwon province, best soil erosion management system is required to reduce inflow of nonpoint source pollutions into the waterbodies. The USLE-based SATEEC system have been developed and enhanced for soil erosion and sediment yield estimation. However, the SATEEC cannot estimate soil depositions depending on topography in the watershed, while the USPED estimates soil erosion and deposition using sediment transport capacity of the surface runoff. In this study, the SATEEC and USPED were used to determine soil erosion hot spot subbasins. For this, 54 subbasins were delineated. In general, soil erosion hot spot subbasins were identified similarly with SATEEC and USPED. However, depending on erosion and deposition patterns in each subbasin. USPED estimated soil erosion hot spot subbasins didn't match those estimated with SATEEC. For some subbasins, much deposition was expected than erosion. This indicates that SATEEC estimated soil erosion values may be overestimated for these subbasins. Thus, care should be taken when understanding soil erosion status in the watershed based on USLE-based SATEEC results. In addition, the USPED results could be used to identify the site-specific soil erosion best management practices. If the USPED and USLE-based SATEEC are combined, it would help determining soil erosion hot spot subwatersheds in economic and environmental perspectives.

keywords : SATEEC, Soil erosion, Universal Soil Loss Equation (USLE), USPED

1. 서론

본래 토양유실이란 강수, 풍화 등으로 인해 지속적으로 일어나는 자연적인 현상이다. 그러나 최근에는 토양유실 문제가 사회적·환경적 이슈로 부각되고 있다. 특히 소양강댐 유역의 경우 여러 탁수 관리의 도입에도 불구하고 고탁수 문제가 매년 반복되고 있는데, 이는 유역내 고랭지 농업이 발달한 지역에서의 집중강우로 인한 가속화된 토양유실과 산사태, 토목공사 등으로 인해 발생하고 있다. 주요 비점오염원 중 농업 비점오염은 외국과 달리 큰 침식물보다는 집약적 농업에 의한 과도한 비료사용 등에 의한 영양물질이

문제가 된다(김진호 등, 2008; 신은성 등, 2001). 이렇게 수체로 유입된 토사와 이와 함께 이동되어 온 영양염류는 하류 수체의 수질 및 생태계를 악화시키고 있다(정영상 등, 1998). 이러한 강우에 따른 유출로 인한 토양유실의 종류를 구분하면 크게 면상침식, 세류침식, 절리침식 등이 있다. 빗물의 타격으로 인해 주로 발생하는 면상침식이 심하게 진행되면 세류침식으로 발전하기 때문에 지표에 불규칙한 작은 도랑이 생겨 빗물이 도랑을 따라 흘러내리면서 토양을 운반하게 되어 토양유실이 가속화 된다. 뿐만 아니라 세류침식보다 규모가 더 큰 절리에 의한 피해를 무시할 수 없다. 이러한 강우에 의한 토양유실 문제를 해결하기 위해 지표피복, 식생대 설치, 경작 방법의 변화 등 많은 노력을 기울여 왔다. 유역 내 토양유실 문제 해결을 위해서는 많은 경제적 투자가 필요하다. 따라서 가장 경제적이고 효과

[†] To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

적인 토양유실 방지 대책을 수립하기 위해서는 우선관리 유역 선정이 필요하다. 이러한 토양유실 우선관리 유역 선정을 위해서 모델링 기법이 많이 활용되어 왔다. 여러 가지 모델 중 지난 수십 년 간 강우, 토성, 경사도, 경사장, 작물, 영농방법을 이용하여 연간 토양유실량(ton/ha/year)을 산정하는 Universal Soil Loss Equation(USLE)가 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있다(Wischmeier and Smith, 1978). USLE는 Field-scale모형으로 면상침식(Sheet erosion)과 세류침식(Rill erosion)에 대한 토양유실량을 산정한다(임경재 등, 2003). 하지만 이 USLE 모형으로는 농경지에서 유실되어 하천으로 유입되는 유사량을 산정하는데 한계가 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control(SATEEC; Lim et al., 2005) ArcView GIS 시스템이 개발되었다. SATEEC 시스템은 면상침식과 세류침식 등으로 인한 토양유실량과 유달률을 고려한 유사량을 산정하는데 활용할 수 있는 시스템으로 강우침식능인자(R), 토양침식인자(K), 식생피복인자(C), 작물경작인자(P), DEM(Digital Elevation Model)과 같은 간단한 입력 자료를 이용하여 토양유실량 및 유사량 모의가 가능하다. 그러나 SATEEC 시스템은 유역 내에서 면상침식 및 세류침식에 의해 유실된 토양이 하류하천으로 얼마나 유입되는지를 모의할 수 있을 뿐, 지형을 고려하여 유실 토양의 퇴적을 고려하지 못하는 단점이 있다. Mitasova 등(1996)은 유역의 지형을 고려하여 유역에서의 토양유실을 평가하기 위해 USLE 모형의 입력자료로 운영 가능한 Unit Stream Power-based Erosion/Deposition(USPED) 모형을 개발하였다. USPED 모형은 유출에 따른 운반능에 의한 침식과 퇴적을 모두 고려하는 시스템으로 간단하고 정상적인 조건 하에서만 강우에 의한 침식 및 퇴적을 예측한다는 단점이 있으나 USPED 모형은 지형의 요철을 고려하여 토양 침식 및 퇴적을 고려할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라, USLE/SATEEC의 입력자료만을 이용하여 토양 침식 및 퇴적을 평가할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 SATEEC 모형과 USPED 모형을 이용하여 토양유실 발생량을 분석하고, 이를 활용하여 효과적인 토양유실 방지대책을 수립하기 위한 우선관리 유역을 선정하는 데 있다.

본 연구의 결과는 적은 예산으로 최대의 효과를 기대할 수 있는 탁수저감 대책 사업 수립의 기초 자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 선정

본 연구의 연구 대상지역은 소양강댐 유역 내 심각한 탁수 발생이 우려되고 있는 자운리 유역이다. 자운리의 유역면적은 6,906 ha이며, 강원도 홍천군 내면에 위치하며, 산림이 82.93%를 차지하고 있고, 농경지가 12.32%, 수역이 2.02%, 초지가 1.62%, 주거지가 1.09%로 산림과 농경지가 대부분을 차지하고 있고 고랭지 농업이 성행하고 있다. 다

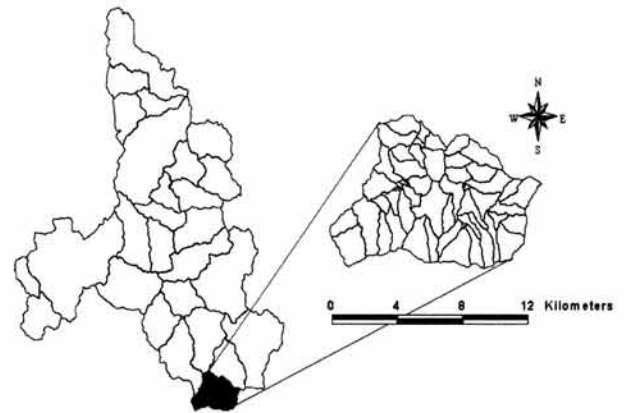


Fig. 1. Location of Jawoon-ri watershed.

음 Fig. 1은 자운리 유역의 수계 경계를 나타낸다.

2.2. SATEEC system ver. 1.6 모형의 개요

SATEEC system의 기반이 되는 USLE 모형은 면상침식(Sheet erosion)과 세류침식(Rill erosion)에 의한 토양 유실량을 모의할 수 있는 시험포(field-scale) 모형이다. 이러한 시험포 모형으로는 유역에서의 토양 유실 가능 추정치를 산정할 수 있을 뿐, 유역의 최종 유출구에서의 유사량을 모의할 수 없고, 다양한 최적관리 기법이 하류의 탁수 발생이나 수질 변화에 미치는 영향을 평가할 수 없다. 유역에서 발생한 토양 유실에 따른 하류 수계의 탁수 및 수질, 비점오염 문제를 해결하기 위해서는 유실된 토양이 얼마나 하천으로 유입되는지 평가해야 한다. 이러한 유사의 발생 및 이동을 모의하기 위하여 Universal Soil Loss Equation(USLE; Wischmeier and Smith, 1978), Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE; Foster et al., 1996), Water Erosion Prediction Project(WEPP; Flanagan and Nearing, 1995), Erosion Model(EUROSEM; Morgan et al., 1998), Soil and Water Assessment Tool(SWAT; Arnold et al., 1998) 등이 사용되어 왔으나, 이러한 모형 중에는 입력자료가 매우 방대하여 자료 구축 시 많은 시간과 비용, 인력을 필요로 하고 경우에 따라서는 산정할 수 없는 입력자료들도 있다. 그래서 개발된 모형을 실무에 직접적으로 적용하기가 매우 어려운 경우가 있다. 따라서 토양 유실 및 유사 문제를 해결하는 데 있어 입력 데이터가 타 모형에 비하여 간단하고, 또한 입력자료가 비교적 많이 구축되어 있는 USLE에 의해 토양 유실량을 모의하고 이에 의한 결과를 기초 자료로 이용하고 있다. 이에 시험포 모형의 유역 적용 시 한계를 극복하기 위해 USLE 모형의 입력자료와 유달률 모듈을 이용하여 유실된 토양이 얼마나 하천으로 유입되는지를 모의할 수 있는 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control(SATEEC) 시스템이 개발되어 이용되고 있다. SATEEC 시스템은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 USLE 모형의 입력자료(Rainfall erosivity, Soil erodibility, Crop management, Practice factor)와 DEM만을 이용하여 유역 내 토양유실 및 유사발생을 모의할 수 있는 시스템(Lim et al., 2005)이다.

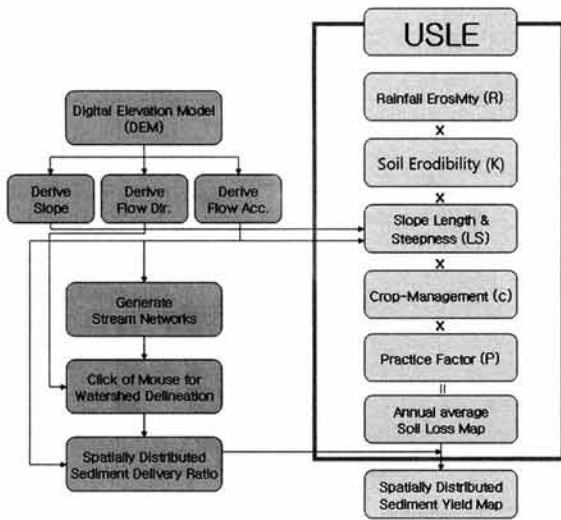


Fig. 2. Overview of the SATEEC system 1.6 (Lim et al., 2005).

2.3. SATEEC system ver. 1.6 모형의 입력자료

2.3.1. 강우침식능인자(Rainfall erosivity factor)

본 연구에서 SATEEC ver. 1.6은 정영상 등(1999)의 행정 구역별 강우침식능인자를 이용하였다. Table 1은 연구에 의한 계산으로 얻어진 값으로 해당지역 마다 일정한 하나의 값이 적용된다. Table 1은 강원도 지역의 행정구역별 강우인자(R)를 나타낸다. 본 연구에서 SATEEC ver. 1.6에서는 정영상 등(1999)에서 제안한 홍천군의 R factor 417을 사용하였다(Fig. 3).

Table 1. USLE R factor administrative districts in Gangwon province (Jung et al., 1999)

Administrative district	R factor	Administrative district	R factor
Kangnung	297	Kosung	250
Samchok	215	Sokcho	255
Yangyang	255	Yongwol	350
Wonju	578	Inje	294
Cheolwon	400	Chuncheon	464
Hwacheon	450	Hongcheon	417
Yanggu	350	Pyongchang	269
Chongsong	250	Hoengsung	400

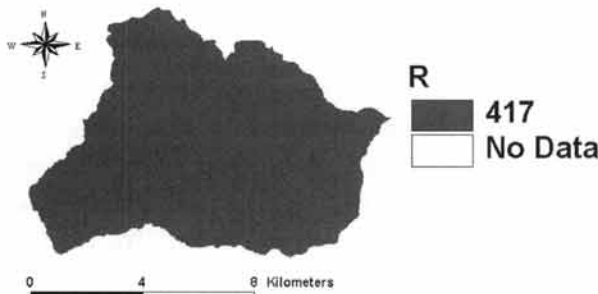


Fig. 3. R factor of Jawoon-ri Watershed.

2.3.2. 토양 침식 인자(Soil erodibility factor)

토양침식인자(K)는 어떤 토양의 고유한 침식성을 정량적

으로 표시한 것으로 유실량은 토양 침식에 영향을 끼치는 인자가 동일한 경우 토양 특성의 차이로 인하여 달라진다. Williams(1975)는 K값을 정할 수 있는 Monograph를 제시하였는데 우리나라 토양에 적용성 검토 결과 타당한 것으로 보고된 바 있다(정영상 등, 1976). 본 연구에서는 MUSLE 공식에서 K값을 구하였다. 적용한 방법은 다음 식 (1)과 같다.

$$K = (0.2 + 0.3 \exp(-0.0256 SAN(1 - \frac{SIL}{100})) \times (1.0 - \frac{0.25 CLA}{CLA + \exp(3.72 - 2.95 C)}) \times (1.0 - \frac{0.7 SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9 SN1)}) \quad (1)$$

여기서 SAN, SIL, CLA는 모래, 실트, 점토 함량(%)이며, SN1은 1-SAN/100이다. 본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 농촌진흥청에서 발행한 1:25000 정밀토양도의 점토, 실트, 모래의 함량의 구성비를 통해 K factor 값을 구하였다(Fig. 4).

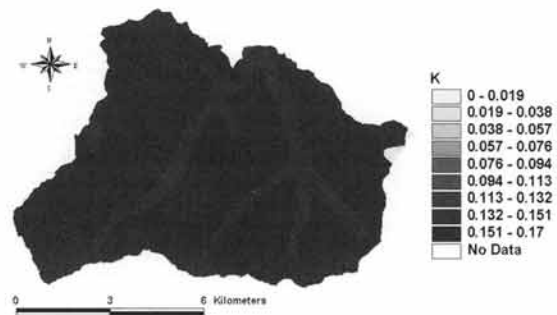


Fig. 4. K factor of Jawoon-ri Watershed.

2.3.3. 식생 피복 인자(Crop management factor)

식생은 유출수의 유속과 강우의 타격력을 감소시키는 한편, 뿌리에 의한 토양구조의 발달 및 공극률 증가로 강우의 침투율을 증가시킴으로써 토양 유실량을 감소시키는 효과를 갖는다(정필균 등, 1984). 지표를 피복하고 있는 이 식생은 시간에 따라 다른 조건을 갖기 때문에 이에 의한 영향을 고려하기 위해서는 기상 등을 비롯한 시간에 따라 변하는 조건에 의한 식생의 상태를 고려하여야 식생에 의한 지표 피복 상태에 따른 합리적인 토양 유실 및 유사량을 모의 할 수 있다. SATEEC 시스템에서의 작물 인자는 작물에 따라 Julian-day 별로 구축되어 있는 값을 이용하여 시간에 따라 변하는 값으로 모의한다. 그러나 본 연구에서는 연평균 C 값을 이용하여 우선관리 구역 선정의 입력자료로 활용하였다. 식생피복인자는 특정한 조건 하에서 식생 지역의 토양 유실량과 나지의 토양 유실량과의 비로 나타낸 값으로 정의 되므로, 그 값은 나지에서 1이고 식생지역에서는 1이하로 된다(Fig. 5). Table 2는 토지 이용에 따른 C값을 보여주고 있다.

2.3.4. 작물 경작 인자(Practice factor)

작물경작인자는 보전농업시설과 경작방법 등에 의한 토양 침식량의 감소를 설명하는 값이다. 본 연구에서는 박철

Table 2. C factor for Various Land Uses (Jung et al., 1984)

Land use	WATR.	FRST.	PAST.	AGRL.	URLD.	Bare Ground
C factor	0.0	0.001	0.01	0.26	0.01	1

WATR: Water, FRST: Forest, PAST: Pasture, AGRL: Agricultural land, URLD: Urban residential low density

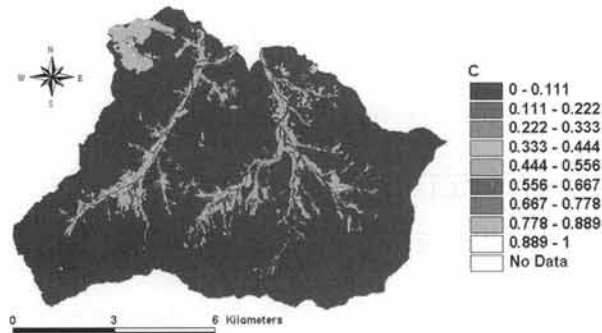


Fig. 5. C factor of Jawoon-ri Watershed.

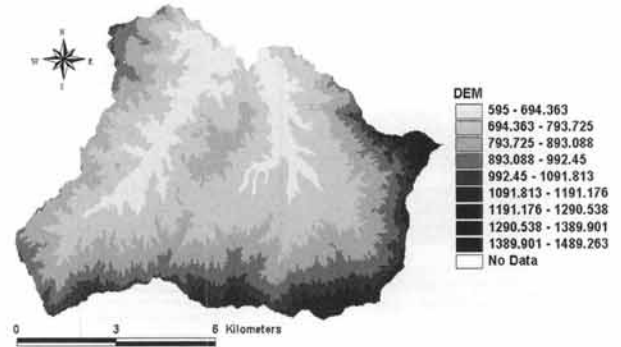


Fig. 7. DEM factor of Jawoon-ri Watershed.

Table 3. USLE P factors for different land uses and slopes

Land use	P factor	
Paddy land	0.2	
Upland	Slope	P factor
	0% ~ 2%	0.60
	2% ~ 7%	0.50
	7% ~ 12%	0.60
	12% ~ 18%	0.80
	18% ~ 24%	0.90
	24% ~ 30%	0.95
>30%	1.00	

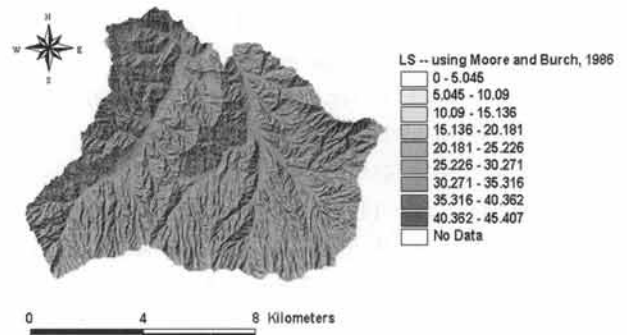


Fig. 8. LS factor of Jawoon-ri Watershed.

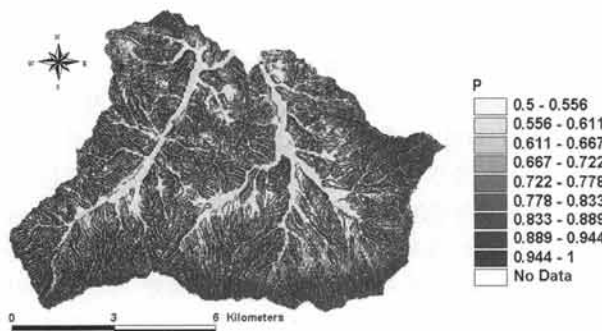


Fig. 6. P factor of Jawoon-ri Watershed.

수(1999)에 의해서 제안한 작물경작인자를 토지이용과 경사도에 따라 이용하였다(Fig. 6). Table 3은 토지이용별 작물경작인자 값을 나타내고 있으며, 밭의 경우 등고선 경작 방식을 택한다는 가정 하에 경사도에 따른 작물경작인자 값을 나타낸 것이다.

2.3.5. 지형자료(DEM)와 경사도 경사장 인자(LS factor)

경사장과 경사도는 USLE에서 경사장 인자(L)과 경사도 인자(S)로 표기되는 지형 인자(LS)로 알려져 있다. 경사장은 USLE 모형의 단일 경사장을 의미하며 표준 시험포에서의 길이(22.13 m)의 비로 나타내어진다. 경사도는 표준 시험포에서의 경사도(9%)와의 비로 나타내어진다.

SATEEC 시스템은 경사장과 경사도 인자를 DEM(Digital Elevation Model; Fig. 7)을 이용하여 Moore and Burch (1986a, 1986b)의 방법 식 (2)을 이용하여 계산한다. 일반적인 경사장 길이는 10.7 m(35 ft)에서 91.4 m(300 ft)이나 본 연구에서는 RUSLE Users' Guide(Foster et al., 1996)에 제시되어 있는 자연 상태에서 세류가 일어나기 시작하는 최대 경사장 122 m(400 ft)를 최대 허용경사장으로 선정하여 LS 인자값(Fig. 8)을 산정하였다.

$$LS = \left(\frac{A}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3} \tag{2}$$

2.4. USPED의 개요

USPED는 정상 조건에서의 강우시에 유출에 의한 토양의 침식과 퇴적을 예측하는 모형(Mitasova et al., 1996; Mitas and Mitasova, 1998)이다. USPED는 각 지역에서 최근까지 꾸준히 연구가 진행(Alimohammadi et al., 2006; Blanco and Nadaoka, 2006; Pistocchi et al., 2002; Warren et al., 2005; Zaluski et al., 2003)되고 있다. USPED는 Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE)과는 다르게 2차원의 토양유실량을 산정하는 모형이다. 만약 토양입자가 강우에 의해 분리되었다고 가정했을 때 지형적인 요소와 작물인자 등에 의해 충분한 유출이 있지 않으면 토양입자를 이동 시

킬 수 없기 때문에 실제 침식되는 양은 상당히 감소한다. RUSLE는 주로 강우로 인한 토양 유실량을 예측하는 반면에 USPED는 주로 유출에 따른 운반능에 의한 침식과 퇴적을 예측하는 모형이다.

2.5. USPED의 입력자료

2.5.1. 운반능(sediment transport capacity)

토양의 작물 피복인자와 물의 압력 수심 및 경사에 따라 운반능이 결정 된다(식 (3)).

$$T = K_t (ph \sin b)^n \tag{3}$$

여기서, T는 운반능, K_t 는 작물인자와 토양인자에 따른 계수(transportability coefficient determined by soil type and vegetation cover), p는 수압(unit depth water pressure), h는 수심(water depth), b는 경사(terrain slope), n은 경험지수(empirical exponent)를 나타낸다.

2.5.2. 침식과 퇴적인자(erosion/deposition of sediment)

유출에 의한 침전물의 침식과 퇴적은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ED = \text{div}(T) = K_t \{ \text{grad}(h) \cdot s \cdot \sin(b) - h(K_p + K_t) \} \tag{4}$$

여기서, s는 가장 가파른 경사의 벡터 값(unit vector in the steepest slope direction), K_p 는 측면곡률(profile curvature), K_t 은 접선곡률(tangential curvature)을 나타낸다. ED값은 양수(퇴적) 및 음수(침식)가 될 수 있다.

2.5.3. 정적 운반능(static sediment flow)

식 (3)에서 실제 수심은 복잡하고 정교한 데이터가 요구되기 때문에 USPED에서는 근사치로 대신한다(식 (5)).

$$T = K_t \cdot q^m (\sin b)^n \tag{5}$$

여기서, q는 식 (3)의 h 항을 대체하는 값으로 유출수의 총량, m은 경험지수를 나타낸다.

2.5.4. 침식과 퇴적인자의 대체 식

USPED모형에 들어가는 운반능 식이 단순해졌다고 해도, 발산량의 계산은 여전히 유지되고 있다. K_p 와 K_t 값에 따라 ED 값의 음양이 정해지는데 이 값들은 DEM으로 계산될 수 있다. Mitas and Mitasova(1998)에 따르면 식 (4)는 식 (6)을 이용하면 같은 값으로 대체할 수 있다.

$$ED = d(T \cos \alpha) / dx + d(T \sin \alpha) / dy \tag{6}$$

여기서, a는 표면의 각, $dx = dy$ 이면 격자는 선명하다.

2.5.5. RUSLE식

USPED에서 K_t 값은 RUSLE의 3가지 매개변수에 따라 결정된다(식 (7)).

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{7}$$

여기서, R = rainfall-runoff erosivity factor, K = soil erodibility factor, L = slope length factor, S = slope steepness factor, C = cover management factor, P = support practice factor를 나타낸다.

USPED와 RUSLE의 관계는 식 (8), 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$K_t = K \cdot C \cdot P \tag{8}$$

그리고

$$LS = A^m \cdot (\sin b)^n \tag{9}$$

여기서, A는 비탈면을 나타낸다.

결론적으로 USPED에서 운반능은 식 (10)과 같이 계산된다.

$$T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A^m \cdot (\sin b)^n \tag{10}$$

2.5.6. USPED식

결론적으로 USPED는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$USPED = \text{div}(T \cdot s) = \frac{\partial (T \cos \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial (T \sin \alpha)}{\partial y} \tag{11}$$

여기서, s는 유동방향의 벡터 값이고 α 는 지형의 각도(degree)이다.

2.6. SATEEC 시스템과 USPED 시스템의 예측치 비교

본 연구에서는 비점오염원 관리지역 우선순위 선정에 있어서 어떠한 시스템을 사용하는 것이 적합한지를 알아보기 위해 침식만을 고려하여 토양유실량을 산정하도록 개발된 SATEEC 시스템을 이용한 우선관리 구역 결정과 침식과 퇴적을 모두 고려한 USPED 모형을 이용한 우선관리 구역 결정을 비교 분석하였다.

효율적인 비교를 위해 자운리 유역을 54개의 소유역(Fig. 9)으로 나누고 SATEEC시스템과 USPED모형 각각에 결과값에 따른 소유역별 토양유실량 값을 총 합산한 후 유역면적(Table 4)으로 나눈 값으로 우선관리 유역을 선정하였다. 본 연구에서는 1 ha 미만의 소유역(33번 소유역 0.24 ha)은 우선 관리 소유역 선정시 제외시켰다.

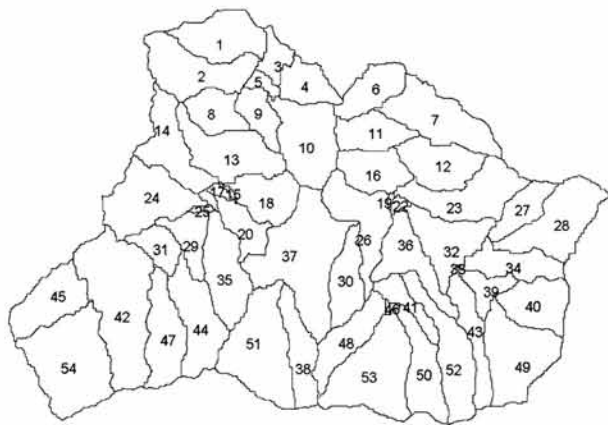


Fig. 9. Location of 54 subbasins at Jawoon-ri Watershed.

3. 결과 및 고찰

3.1. SATEEC system ver. 1.6에 의한 결과

본 연구에서는 자운리 지역을 대상으로 SATEEC 시스템과 USPED에 의한 54개 소유역에 따른 우선관리유역 선정 결과를 비교하였다. 이에 사용된 SATEEC system ver. 1.6에 의한 우선관리유역 선정 결과는 Table 5와 같다. 우선관리유역 선정의 비교결과 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 2번, 1번, 25번, 21번, 17번 소유역의 순서로 비점오염원 관리시 우선으로 해야 할 소유역으로 나타났는데, 이 소유역들의 공통점은 경사가 급하고 농업이 성행하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 SATEEC system ver. 1.6은 퇴적은 고려하지 않고

Table 4. Area of 54 subbasins at Jawoon-ri Watershed

Subbasin	Area (ha)	Subbasin	Area (ha)
1	151.72	28	199.56
2	187.80	29	77.88
3	47.36	30	109.08
4	88.92	31	65.72
5	21.60	32	152.32
6	104.36	34	110.72
7	202.72	35	159.28
8	92.28	36	134.08
9	74.56	37	340.76
10	199.16	38	115.80
11	110.28	39	55.48
12	141.08	40	129.20
13	185.64	41	60.28
14	152.64	42	346.76
15	4.12	43	104.00
16	114.48	44	169.20
17	9.60	45	146.44
18	117.48	46	5.52
19	3.20	47	151.00
20	76.84	48	118.88
21	8.88	49	215.16
22	9.56	50	132.64
23	192.08	51	256.92
24	201.60	52	173.36
25	5.96	53	255.24
26	159.64	54	293.32
27	82.36		

모든 소유역에 토양유실이 발생한다고 모의한다는 단점이 있다.

Table 5. SATEEC estimated soil loss at 54 subbasins

Subbasin	Soil loss (ton/yr)	Soil loss per area (ton/ha/yr)	Subbasin	Soil Loss (ton/yr)	Soil loss per area (ton/ha/yr)
2	49,844	265.41	34	4,012	36.24
1	30,299	199.71	13	6,431	34.64
25	996	167.18	9	2,505	33.59
21	1,359	153.05	27	2,735	33.21
17	843	87.82	46	182	32.97
7	17,692	87.27	4	2,883	32.42
19	276	86.30	47	4,872	32.26
3	3,860	81.50	18	3,742	31.85
31	5,243	79.78	51	8,079	31.45
22	649	67.90	23	6,013	31.31
41	3,827	63.48	38	3,429	29.61
20	4,661	60.66	14	4,022	26.35
30	6,576	60.29	52	4,509	26.01
35	8,865	55.65	43	2,688	25.84
37	18,450	54.14	6	2,529	24.24
5	1,145	53.00	53	5,954	23.33
29	4,018	51.59	54	6,110	20.83
32	7,760	50.95	8	1,877	20.34
11	5,530	50.15	40	2,317	17.93
36	6,677	49.80	15	74	17.91
16	5,136	44.86	50	2,367	17.85
26	7,074	44.31	24	3,569	17.70
12	6,087	43.15	48	2,053	17.27
10	8,402	42.19	28	3,409	17.08
44	6,913	40.86	49	3,626	16.85
39	2,212	39.88	45	2,358	16.10
42	13,044	37.62			

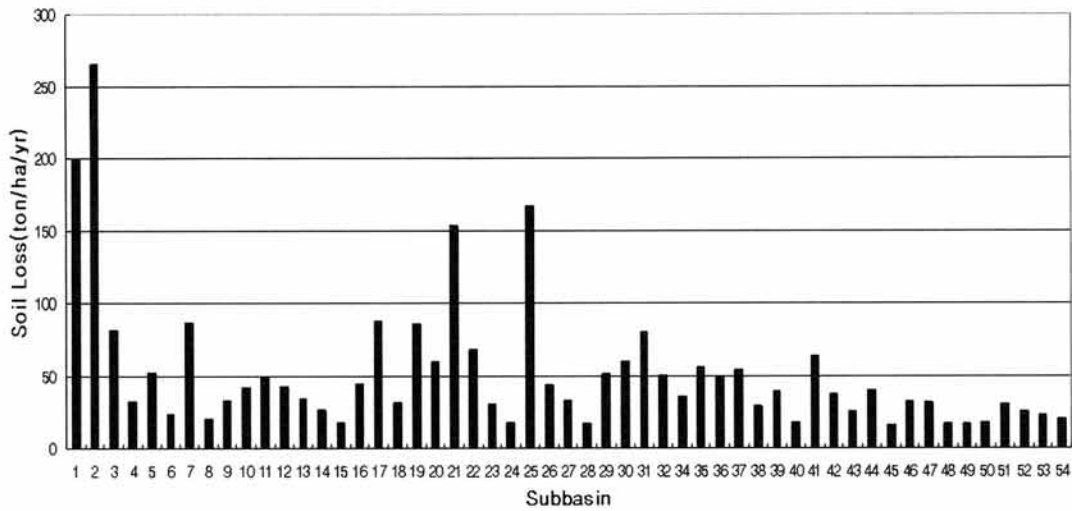


Fig. 10. SATEEC estimated soil loss at 54 subbasins.

3.2. USPED에 의한 결과

USPED에 의한 산정된 토양 침식 및 퇴적 특성 분석결과는 Table 6과 같이 나타났다. 9번, 15번, 21번, 25번 이렇게 4개 소유역에서는 결과적으로 퇴적량이 침식량에 비해 더 많았고, 단위면적당 침식과 퇴적을 모두 고려한 우

선관리구역 선정 결과에서는 2번, 1번, 7번, 35번, 39번 소유역의 관리가 우선시 되어야 하는 것으로 분석되었다. 하지만 침식량만 고려한 우선관리구역 선정결과에서는 Table 7에서 보이는 바와 같이 46번, 2번, 3번, 1번, 17번 소유역의 순서로 관리가 우선시 되어야 한다고 나타났다. Fig. 11(a),(b)

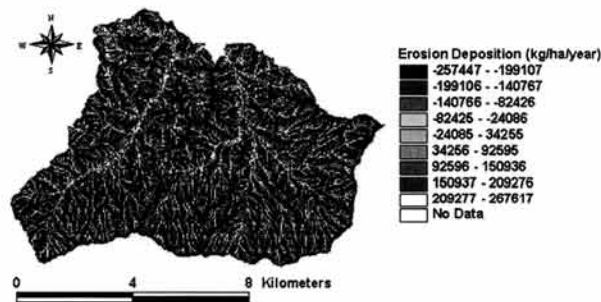
Table 6. USPED estimated soil loss at 54 subbasins

Subbasin	Erosion (ton/yr)	Deposition (ton/yr)	Soil loss (ton/yr)	Soil loss per area (ton/ha/yr)	Subbasin	Erosion (ton/yr)	Deposition (ton/yr)	Soil loss (ton/yr)	Soil loss per area (ton/ha/yr)
2	3,190	2,541	649	3.46	27	541	446	95	1.15
1	2,017	1,521	497	3.27	49	1,854	1,607	247	1.15
7	2,019	1,519	500	2.47	16	872	748	124	1.09
35	1,345	1,026	319	2.00	47	862	700	161	1.07
39	557	447	110	1.99	42	2,468	2,112	356	1.03
10	1,586	1,246	340	1.70	32	1,141	988	154	1.01
34	1,019	845	174	1.57	26	1,240	1,082	157	0.99
51	2,501	2,116	385	1.50	31	524	460	65	0.98
48	773	596	177	1.49	41	472	414	58	0.96
50	1,201	1,004	197	1.49	45	810	670	140	0.95
18	941	767	174	1.48	24	926	738	188	0.93
3	591	521	70	1.47	36	974	849	125	0.93
23	1,449	1,168	280	1.46	20	680	611	68	0.89
12	1,113	907	205	1.46	6	649	557	92	0.89
37	2,930	2,443	487	1.43	28	1,253	1,087	166	0.83
30	1,105	952	153	1.40	5	159	142	17	0.79
40	993	815	178	1.38	14	700	586	114	0.75
43	863	720	143	1.38	11	782	703	79	0.72
38	1,103	945	158	1.37	13	1,258	1,129	129	0.69
53	1,977	1,630	347	1.36	17	111	106	5	0.51
44	1,283	1,054	229	1.35	22	25	22	4	0.38
29	570	465	105	1.35	19	10	9	1	0.23
54	1,951	1,580	371	1.26	9	250	255	5*	0.07*
52	1,699	1,482	217	1.25	15	31	34	3*	0.72*
8	547	435	112	1.22	21	54	67	13*	1.48*
46	104	97	7	1.21	25	49	60	11*	1.89*
4	512	408	104	1.17					

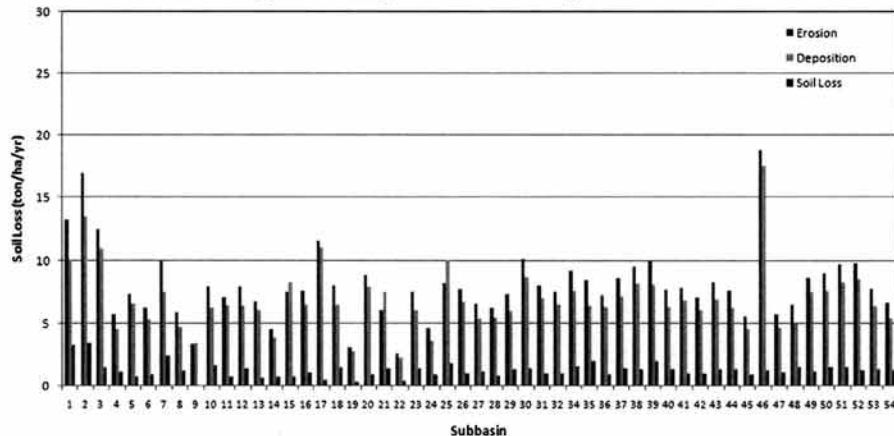
* Deposition

Table 7. USPED estimated soil erosion at 54 subbasins

Subbasin	Erosion (ton/yr)	Soil loss per area (ton/ha/yr)	Subbasin	Erosion (ton/yr)	Soil loss per area (ton/ha/yr)
46	50,436	28.29	32	14,252	10.90
2	79,751	24.50	29	27,624	10.83
3	14,775	18.75	23	13,105	10.79
1	12,810	18.70	26	28,537	10.78
17	3,971	18.15	53	35	10.74
30	50,482	14.56	5	25,464	10.70
39	13,676	14.51	40	33,637	10.54
7	6,260	14.21	44	24,352	10.51
25	39,649	13.75	36	73,255	10.50
52	19,554	13.74	42	27,580	9.94
51	27,818	13.56	13	13,934	9.87
34	31,446	13.46	21	24,836	9.83
38	17,511	13.23	28	11,789	9.43
50	764	12.85	6	61,698	9.25
20	21,799	12.54	54	21,584	9.22
49	2,777	12.29	48	32,080	8.78
37	23,515	12.04	27	20,253	8.72
31	255	11.85	4	2,603	8.68
35	16,988	11.56	8	21,538	8.43
43	1,356	11.50	47	19,326	7.81
10	631	11.49	45	46,352	7.61
16	36,222	11.34	19	30,027	7.29
41	23,149	11.26	14	62,532	6.46
11	1,224	11.14	24	42,470	6.29
18	30,992	10.99	9	49,422	5.14
12	13,518	10.96	22	48,785	4.48
15	31,313	10.91			



(a) Erosion/Deposition estimated by USPED



(b) Erosion/Deposition, Soil Loss at 54 subbasins

Fig. 11. USPED estimated soil loss at 54 subbasins.

에서 보이는 바와 같이 침식과 퇴적을 모두 고려한 우선관리구역 선정은 지형의 요철을 고려하여 퇴적을 고려했기 때문에 침식량만 고려한 우선관리구역 선정결과와 다른 것을 알 수 있다.

3.3. USPED모형과 SATEEC 모형의 우선관리구역 선정 비교

SATEEC system ver. 1.6을 바탕으로 선정된 우선관리 구역과 USPED 모형을 바탕으로 선정된 우선관리 구역을 비교한 결과, SATEEC시스템은 2번, 1번, 25번, 21번, 17번 소유역의 순서로 비점오염원 관리시 우선으로 해야 할 소유역으로 나타난 반면, USPED모형에 의한 침식과 퇴적을 모두 고려한 우선관리구역 선정 결과에서는 2번, 1번, 7번, 35번, 39번 소유역의 순서로 관리가 우선시 되어야 한다고 나타났다. 또한 각 소유역별 토양유실량 값을 비교해본 결과 SATEEC시스템이 USPED모형보다 토양유실량을 과하게 산정하는 것으로 나타났으며, USPED모형에 의한 결과에서 5개 소유역에서는 침식보다 퇴적이 더 많이 일어난 것으로 나타났다.

4. 결론

최근에 이상강우와 기후적 특성으로 인한 탁수발생은 지역경제에도 많은 부정적인 영향을 미치는 것은 물론 소양강댐의 수질악화의 주요요인으로 인식되어 오고 있기 때문에 더 이상 간과할 수 없다. 이처럼 구역 상류에서 발생한 토양유실로 인한 경제적, 환경적 문제는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 발생하는 문제이다. 이러한 호우에 의한 탁수 발생 시 과학적이고 효율적인 탁수 관리를 위해 토양 유실량을 정확히 모의할 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 강원도 홍천군 내면 자운리 유역을 대상으로 SATEEC system ver. 1.6과 USPED모형을 이용한 우선관리구역 선정 결과를 비교 분석하여 평가한 결과, SATEEC 시스템은 2번, 1번, 25번, 21번, 17번 순서로, USPED 모형은 2번, 1번, 7번, 35번, 39번 순서로 각 모의 결과에 차이를 보였다. SATEEC 시스템을 이용하여 5개 소유역을 비점오염원 우선관리 지역으로 선정한다면, 2개 소유역은 USPED의 결과와 공통적으로 포함되나, 3개 소유역은 침식이 많이 발생하지만, 퇴적 또한 많이 발생하기 때문에 실제로 우선순위에서 제외되어야 한다. 이는 퇴적의 고려 여부에 따라 우선관리 구역을 선정하는데 순위의 차이가 있다는 것을 보여준다. 또한, USPED 결과에서 일부 소유역에서는 퇴적량이 침식량에 비해 더 많게 나타났다. 이는 침식만을 고려함에 따라 토양유실량 및 유사량이 과대평가 될 수 있다는 것을 보여준다.

보다 정확한 토양유실 우선관리 소유역 선정을 위해서는 모형의 보정 및 검증 작업이 필요할 것으로 판단된다. 현재 토양유실량을 모의하는데 USLE 기반의 예측모델을 사용하고 있으나, 이는 퇴적을 고려하지 못하는 단점이 있다. 비점오염원 관리지역 우선순위 선정에 있어서 그 순위가

정확하지 않다면, 경제적인 손실은 물론이고 환경적으로도 문제를 해결하는데 어려움이 있기 때문에, 향후 USPED와 SATEEC시스템을 결합한다면, 경제적이면서 친환경적인 탁수저감 사업 우선순위 구역 결정에 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 “수자원의 지속적 확보기술개발 사업단”(과제번호 : 2-2-3) 및 강원대학교 농업생명과학연구원의 지원으로 수행되었습니다. 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 김진호, 한국현, 이종식(2008). 농촌유역의 강우사상별 농업 비점오염물질 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(1), pp. 69-77.
- 박철수(1999). 울문천 소유역에서 토지이용에 따른 불특정 오염 Monitoring. 석사학위논문, 강원대학교.
- 신은성, 최지용, 이동훈(2001). 농업지역의 비점오염물질 유출특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, 17(3), pp. 299-311.
- 임경재, 최중대, 김기성, 사공명, Engel, B. A. (2003). 소유역의 효과적인 침식조절을 위한 유사평가 툴(SATEEC)의 개발. *한국농공학회지*, 45(5) pp. 85-96
- 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의(1999). 강원도 경사지 토양 유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수 인자와 토양 침식성 인자의 검토. *韓土肥誌*, 32(1), pp. 31-38.
- 정영상, 신재성, 신용화(1976). 경사지 토양의 침식인자에 관하여. *한국토양비료학회지*, 9(2), pp. 107-113.
- 정영상, 양재의, 박철수, 권영기, 주영규(1998). 북한강 울문천 소유역에서 수질 변화와 농업활동에 의한 N,P 부하량. *韓土肥誌*, 31(2), pp. 170-176.
- 정필균, 고문환, 엄기태(1984). 토양유실량 예측을 위한 작부인자 검토. *한국토양비료학회지*, 18(1), pp. 7-13.
- Alimohammadi, A., Sheshangosht, S., and Soltani, M. J. (2006). Evaluation of relations between DEM-Based USPED Model Output and Satellite-based spectral indices. Conference Proceedings of Map India 2006. <http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2006/index.htm/>.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large are hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Blanco, A. C. and Nadaoka, K. (2006). A comparative assessment and estimation of potential soil erosion rates and patterns in Laguna Lake watershed using three models: Towards development of an erosion index system for integrated watershed-lake management.
- Flanagan, D. C. and Nearing, M. A. (1995). USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-1194.

- Foster, G. R., Renard, K. G., Yoder, D. C., McCool, D. K., and Weesies, G. A. (1996). *User's guide*, Soil & Water Cons. Soc.
- Lim, K. J., Sagong, M., Eigel, B. A., Zhenxu, T., Choi, J. D., and Kim, K. S. (2005). GIS-based sediment assessment tool, *Catena*, **64**, pp. 61-80.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., and Iverson, L. R. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int. Journal of Geographical Information Science*, **10**(5), pp. 629-641. (reply to a comment to this paper appears in 1997 in *Int. Journal of Geographical Information Science*, **11**(6).
- Mitas, L. and Mitasova, H. (1998). Distributed erosion modeling for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, **34**(3), pp. 505-516.
- Moore, I. and Burch, G. (1986a). Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, **50**, pp. 1294-1298.
- Moore, I. and Burch, G. (1986b). Modeling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *TRANS of the ASAE*, **29**(6), pp. 1624-1630, 1640.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., and Styczen, M. E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, pp. 527-544.
- Pistocchi, A., Cassani, G., and Zani, O. (2002). Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices, In A. E. Rizzoli and A. J. Jakeman (eds.), *Integrated Assessment and Decision Support, Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, **1**, pp. 163-168. iEMSs, 2002.
- Warren, S. D., Mitasova, H., Hohmann, M. G., Landsberger, S., Iskander, F. Y., Ruzycki, T. S., and Senseman, G. M. (2005). Validation of a 3-D enhancement of the Universal Soil Loss Equation for prediction of soil erosion and sediment deposition. *Catena*, **64**, pp. 281-296.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A Guide to Conservation Planning. *The USDA Agricultural Handbook* No. 537.
- Williams, J. R. (1975). Sediment Yield Prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor, *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, U.S Department of Agriculture, Washington, D.C., pp. 244-252.
- Zaluski, M. H., Consort, J. J., and Antonioli, S. B. (2003). Soil Erosion and Deposition Modeling in ArcGIS. In *Business and Industry Symposium*, 108-113. The Society for Modeling and Simulation International (SCS).