

PRAKIRAAN DISTRIBUSI EROSI DAN SEDIMENTASI DI DAS CIMANUK DENGAN MENGGUNAKAN PREDIKSI HUJAN DARI SATELIT DAN MODEL SEDIMEN DISTRIBUSI SPASIAL

PREDICTION OF EROSION AND SEDIMENTATION DISTRIBUTION IN CIMANUK RIVER BASIN BY USING SATELLITE DERIVED RAINFALL ESTIMATES AND SEDIMENT SPATIALLY DISTRIBUTED MODELS

Agung Bagiawan

Peneliti Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air,
Kementerian Pekerjaan Umum
Jl. Ir. H. Juanda, 193, Bandung, Tlp.(022) 2501083
E-mail: Bagiawan@gmail.com

Diterima: 16 April 2012; Disetujui: 01 Mei 2013

ABSTRAK

Perubahan tata guna lahan sangat berdampak pada perubahan karakteristik hidrologi, hal tersebut teramati dan terindikasi pada meningkatnya banjir, terjadinya kekeringan, menurunnya ketersediaan air, serta meningkatnya laju sedimentasi. Perubahan karakteristik aliran tersebut perlu dipelajari dan diprediksi agar dapat dilakukan antisipasi, dan mitigasinya sehingga perencanaan, pembangunan dan pengoperasian sarana dan prasarana yang telah atau sedang dibangun nantinya dapat dioperasikan secara optimal dan berkelanjutan serta berbagai kebijakan pengelolaan dapat diambil untuk mengurangi bencana yang dapat timbul karenanya. Tujuan dari penelitian ini adalah menginformasikan kondisi erosi dan sedimentasi di DAS Cimanuk sehingga langkah dan kebijakan pengelolaan dapat ditentukan. Model aliran, erosi dan sedimentasi telah berhasil dikembangkan dan diterapkan di DAS Cimanuk untuk memetakan perubahan besarnya erosi dan pergerakan aliran yang membawa sedimentasi dari lahan ke sungai. Peta yang dihasilkan dari model tersebut telah dapat menggambarkan erosi yang terjadi di DAS Cimanuk dalam skala spasial (tempat) dan temporal (waktu) yang mana hasilnya mendekati dan sesuai dengan kondisi erosi dan sedimentasi yang terjadi di lapangan pada tiap-tiap sub DAS di Cimanuk. Hasil model yang telah berhasil menggambarkan perubahan besarnya erosi dan sedimentasi untuk tiap-tiap bulan tersebut dapat memberikan masukan kepada pengelola DAS untuk mengantisipasi/ menurunkan laju erosi dan sedimentasi yang terjadi dengan menyiapkan program konservasi lahan di sub Das Cimanuk pada lokasi yang terlihat mengalami erosi yang berat.

Kata kunci: *Perubahan tata guna lahan, aliran, erosi, sedimentasi, satelit*

ABSTRACT

Changes of land-use can have a great impact on the changes of hydrological characteristics as observed and indicated by the increase of floods, drought, decrease of water availability, and increase of sedimentation rate. These changes of flow characteristics are to be studied and predicted so that anticipation and mitigation measures can be taken, and the construction design as well as optimum and sustainable operation of already constructed and facilities and infrastructure still under construction can be achieved. Several policies are also to be established to mitigate the disaster that may arise from these changes. The purpose of this research is to give information about the condition of erosion and sedimentation in Cimanuk Watershed, so the action and management policy can be determined. As evidence, a flow, erosion and sedimentation model was successfully developed and applied in the Cimanuk catchment for the mapping of erosion and flow movement changes transporting sediment into the river body. The map resulted by this model is able to illustrate the spatial and temporal erosion approximately to the actual erosion and sedimentation condition in each sub-catchment. The model results which are able to illustrate the monthly changes of erosion and sedimentation can also be used by the river management to anticipate or decrease these changes by preparing land conservation programs for locations in Cimanuk sub-catchments where serious erosion is mostly encountered.

Keywords: *Land-use change, flow, erosion, sedimentation, satellite*

PENDAHULUAN

Perubahan tata guna lahan sangat berdampak pada perubahan karakteristik hidrologi dan sangat memengaruhi dalam pengoperasian sarana dan prasarana sumber daya air. Perubahan tata guna lahan ini teramati dan terindikasi pada meningkatnya banjir, terjadinya kekeringan yang berkepanjangan, menurunnya ketersediaan air, meningkatnya laju sedimentasi dan makin tercemarnya kualitas air. Perubahan-perubahan tersebut perlu dipelajari dan diprediksi agar dapat dilakukan modifikasi formula yang ada, antisipasi, dan mitigasinya sehingga perencanaan pembangunan dan pengoperasian sarana dan prasarana atau infrastruktur yang telah/sedang dibangun nantinya dapat dioperasikan secara optimal dan berkelanjutan.

Erosi dan sedimentasi yang terjadi di DAS dan di sungai akan sangat berpengaruh pada efisiensi bangunan air yang telah/sedang dibangun dan akan dioperasikan. Untuk itu sumber erosi dan laju erosi yang terjadi di hulu dari suatu bangunan air seperti waduk perlu diketahui agar perencanaan waduk dan pengelolaan SDA dapat dioptimalkan. Pemahaman tentang besarnya dan lokasi erosi serta sedimentasi akibat perubahan tata guna lahan/meningkatnya intensitas hujan karena adanya perubahan iklim akan dapat digunakan untuk memitigasi peningkatan laju erosi melalui program kebijakan pengendalian terhadap sumber erosi dan pengamanan terhadap menurunnya umur waduk dapat dicarikan solusinya yang tepat. Untuk itu dalam penelitian ini diselidiki hubungan antara intensitas hujan, aliran, kondisi DAS dan besarnya erosi serta sedimentasi. Beberapa pendekatan dan model akan diupayakan untuk dapat mengetahui besarnya dan lokasi terjadinya erosi di DAS serta pergerakan sedimentasi di lahan dan sungai.

Tujuan dari penelitian ini adalah menginformasikan kondisi erosi dan sedimentasi di DAS Cimanuk sehingga langkah dan kebijakan pengelolaan dapat ditentukan untuk memitigasi dan melakukan konservasi tanah dan air di DAS Cimanuk.

KAJIAN PUSTAKA

Studi tentang hubungan antara hujan, erosi, longsor dan aliran serta sedimentasi telah dilakukan yang mana ambang curah hujan digunakan sebagai pemicu terjadinya erosi dan longsor (Cardinali et al. 2006; Jacob et al. 2006; Guzzetti et al. 2008). Curah hujan digunakan sebagai variabel dinamis dan faktor permukaan tanah sebagai variabel statis untuk memodelkan

hubungan antara hujan, aliran dan erosi yang terjadi. (Dai and Lee 2003; Chang et al. 2008).

Metode empiris tidak menggunakan bagaimana proses hidrologi dapat berpengaruh pada kejadian erosi dalam skala waktu dan tempat. Pada saat ini pendekatan telah dikembangkan dimana hubungan hujan, erosi, longsor dan aliran didasarkan pada proses fisik dari model hidrologi dan geoteknik dengan menggunakan curah hujan sebagai suatu input (Hong et al. 2005; Salciarini et al. 2006; Versace and Capparelli 2008; Montrasio et al. 2009).

Pada mulanya model telah sukses diaplikasikan untuk daerah aliran sungai yang cukup terjal, humid dan beriklim tropis (Sayama et al., 2003; Kim et al., 2009; Sayama and McDonnell, 2009). Dalam pembentukan modelnya, topografi dari suatu DAS dinyatakan dalam DEM (Digital Elevation Model) dan beberapa studi telah menyimpulkan bahwa proses terjadinya erosi berdampak besar pada DAS yang mempunyai kemiringan yang curam (Inverson 2000; Matsushi et al. 2006).

Erosi dan sedimentasi juga terkait erat dengan pengelolaan sungai dan usaha manusia memanfaatkan sungai sebesar-besarnya untuk kepentingan manusia dan lingkungan secara integral dan berkesinambungan tanpa menyebabkan kerusakan rezim dan kondisi ekologis sungai yang bersangkutan. Untuk itu integrasi harus dilakukan pada dua tingkat, pertama yang menyangkut faktor lingkungan, sosial, dan ekonomi dan pada sisi lain adalah sumber lainnya seperti udara, air, biota, lahan, geologi dan sumber sumber alam, sehingga pengembangan hubungan antara tata guna lahan (*land use*), air dan ekologi yang mana yang penting terhadap hubungan antara bio-fisik dan ekonomi model dari *land use* dalam suatu DAS sangatlah diperlukan. Faktor yang umum dipakai dalam mengkaitkan faktor pasar (*market forces*), hidrologi dan ekologi adalah keadaan lahan penutup (*land cover*).

Dengan menggunakan model simulasi yang menggunakan parameter yang terdistribusi dalam ruang dan waktu diharapkan dapat dibuat berbagai skenario yang menghasilkan berbagai komposisi penggunaan lahan yang harmonis seperti hutan, perkebunan, pertanian dan pemukiman, sehingga didapat kondisi tata air yang normal yang mana banjir, erosi dan sedimen dapat terkendali.

Penerapan model hidrologi erosi sedimentasi dapat disederhanakan dengan cara mengurangi parameter dan skala model agar dapat dianalisa karena tidak begitu kompleks. Strategi yang dilakukan dalam pemodelan, adalah dengan mengadakan pendekatan fenomena sifat fisik DAS.

Model distribusi secara teoritis mengasumsikan bahwa DAS dibangun menjadi terstruktur dalam elemen-elemen homogen yang tidak begitu luas setara dengan titik-titik di dalam DAS. Model distribusi berusaha menguraikan proses fisik dan mekanismenya dalam ruang dan waktu. Model ini dapat digunakan untuk mengantisipasi perubahan fungsi tata guna lahan yang berubah dengan cepat.

Secara umum, model hidrologi dapat diklasifikasikan dalam tiga kategori yaitu model empiris, model konseptual dan model fisik. Model empiris dan model konseptual telah banyak digunakan untuk melihat hubungan antara hujan dan debit serta analisis stabilitas dari kemiringan DAS (Hong et al. 2005; Versace and Capparelli 2008; Montrasio et al. 2009). Permasalahan dari tipe model-empiris dan konseptual ini adalah struktur dan parameter model tidak dapat ditentukan tanpa pemilihan model yang tepat dan proses kalibrasi yang membutuhkan periode observasi data yang panjang (Wegener et al. 2004). Sedangkan model hidrologi yang didasarkan pada proses fisik sering kali cocok diaplikasikan untuk mengetahui proses fisik dari siklus hidrologi.

Model-model tipe fisik ini nilai parameter modelnya dapat ditentukan dari karakteristik DAS dengan mempertimbangkan kondisi topografi dan sifat tanah dan penutup lahannya. Jadi model ini cocok untuk memperkirakan pengaruh dinamis dari variabel hidrologi pada lokasi yang tidak mempunyai data di dalam DAS tersebut. Model fisik ini telah sering digunakan untuk memodelkan hubungan antara hujan, aliran dan sedimentasi (Nunos et al., 2005; Apip et al., 2008a,b). Meskipun demikian dengan perkembangan teknologi, model ini terus dikembangkan untuk dapat mengevaluasi proses hidrologi pada DAS yang mempunyai kemiringan yang curam dan mekanisme terjadinya erosi, longsoran pada skala DAS yang melibatkan suatu proses realistik yang didasarkan pada respons dari model distribusi.

Penelitian telah dilakukan terhadap model fisik dan distribusi untuk memperkirakan besarnya erosi, longsoran dan sedimentasi yang terangkut aliran (Takahashi, 2007; Simoni et al., 2008). Apip et al., 2010, telah mengaplikasikan model ini untuk DAS Citarum. Akurasi hubungan antara besarnya/intensitas curah hujan, erosi dan sedimentasi sangat dipengaruhi oleh ketersediaan jaringan data curah hujan di permukaan tanah atau dari pengamatan radar secara tepat waktu.

Permasalahan yang umum terjadi adalah pada minimnya pos pengamatan hujan di DAS. Namun dengan meningkatnya teknologi satelit untuk pengamatan hujan dan meningkatnya resolusi pengamatan satelit maka memungkinkan untuk mengembangkan suatu prediksi secara tepat

waktu. Menilik akan berkembangnya teknologi pemodelan dan pengamatan hujan dengan menggunakan pengamatan satelit National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA), USA. Teknologi CMORPH yang merupakan suatu teknik satelit untuk memperkirakan hujan coba diaplikasikan pada DAS Cimanuk.

METODOLOGI

Pemodelan DAS untuk mensimulasikan hubungan antara hujan, aliran, erosi dan sedimentasi adalah merupakan suatu model *distributed*. Konsep dari model ini adalah suatu DAS dibagi menjadi *grid-grid* bujur sangkar. Suatu unit yang berbentuk bujur sangkar merupakan suatu simpul dalam DEM diasumsikan sebagai suatu sub DAS yang disebut sebagai sub sel. Grid sel tersebut dihubungkan dengan alur drainase dengan delapan arah aliran.

Model mensimulasikan tiga aliran lateral yang terdiri dari aliran bawah permukaan melalui pori kapiler, aliran bawah permukaan melalui bukan pori kapiler, dan melalui aliran permukaan di atas lapisan tanah. Pada tiap grid sel, ketika ketebalan air lebih rendah dari kedalaman air ekuivalen untuk aliran tak jenuh ($0 \leq h \leq d_m$), aliran disimulasikan berdasarkan pada hukum Darcy dengan koefisien *konduktivitas* k_m , dan nilai rata-rata kecepatan aliran dalam arah aliran dari porositas kapiler V_m dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$V_m = -k \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad 1)$$

Berikut ini adalah suatu asumsi sederhana untuk kurva kelengasan air tak jenuh dinyatakan sebagai:

$$k = k_m S_e^{\frac{\beta m}{e}}$$

dengan k_m = hidrolis konduktivitas pada kondisi jenuh pada zone kapiler .

Selanjutnya persamaan 1 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_m &= k_m S_e^{\beta} \left(i - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = k_m \left(\frac{\theta}{\theta_m} \right)^{\beta} \left(i - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \\ &\cong k_m \left(\frac{\theta}{\theta_m} \right)^{\beta} i = k_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^{\beta} i \end{aligned} \quad 2)$$

H adalah suatu ketinggian aliran, x adalah absis dari sel di atasnya dari suatu *grid* sel. k_m adalah hidrolis *konduktivitas* dari lapisan jenuh dari kapasitas pori.

Besarnya debit lateral dari suatu *grid* sel per unit q untuk kondisi tak jenuh ($0 < h < d_m$):

$$q = d_m k_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta i \quad 3)$$

Kecepatan dalam arah aliran pada zona nonkapiler adalah:

$$V_a = k_a i \quad 4)$$

Total debit dari suatu *grid* sel per unit lebar (q) untuk kondisi jenuh diperkirakan dengan menjumlah aliran bawah permukaan pada zone kapiler jenuh dan tak jenuh

$$q = d_m k_m i + (h - d_m) k_a i \quad 5)$$

Untuk menjaga persamaan kontinuitas, debit aliran pada kondisi $h = d_m$, diferensi persamaan 3 dan 5, dh/dq dapat di ubah sama sehingga didapat hubungan sebagai berikut:

$$k_m = k_a / \beta \quad 6)$$

Rata rata kecepatan disimulasikan dengan persamaan Manning sbb:

$$V_s = k_a i + \frac{\sqrt{i}}{n} (h - d_a)^{m-1} \quad 7)$$

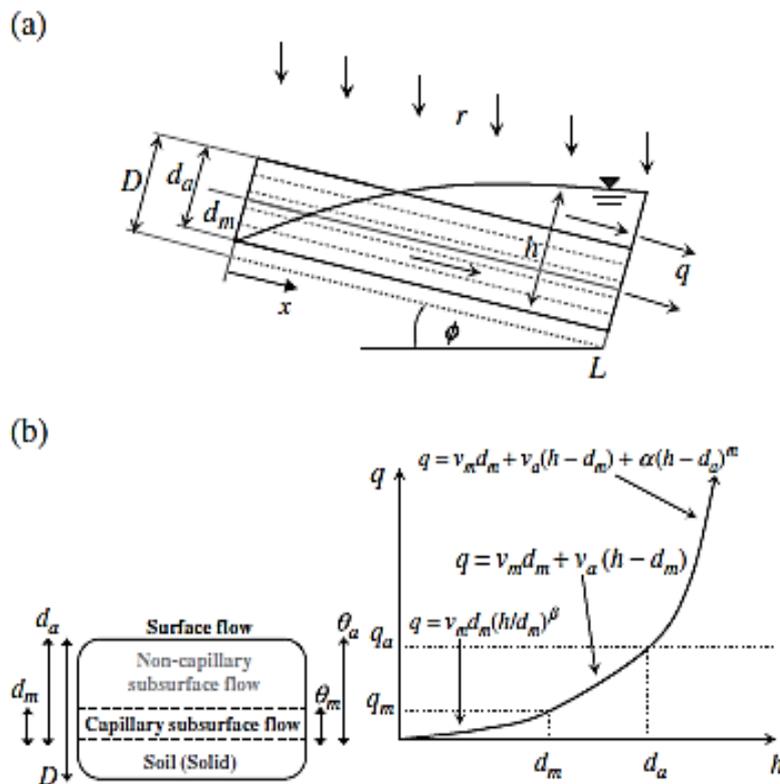
Total debit q dihitung dari jumlah aliran pada permukaan dan bawah permukaan

$$q = d_m k_m i + (h - d_m) k_a i + \frac{\sqrt{i}}{n} (h - d_a)^m \quad 8)$$

Proses dari ketiga aliran diwakili oleh suatu hubungan antara muka air dan debit :

$$q = \begin{cases} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta, & 0 < h \leq d_m \\ v_m d_m + v_a (h - d_m), & d_m < h \leq d_a \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \frac{\sqrt{i}}{n} (h - d_a)^m, & d_a < h \end{cases} \quad 9)$$

Persamaan kontinuitas mengambil laju aliran dari setiap *grid* sel. Persamaan berkesinambungan dari laju aliran pada masing-masing *grid* dinyatakan seperti terlihat pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1 (a) Diagram aliran permukaan dan bawah permukaan pada bagian hulu dan (b) hubungan antara debit per satuan lebar dengan kedalaman aliran (hubungan q vs h)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \cos \phi \quad 10)$$

Untuk menyimulasikan pergerakan sedimen, proses tanah yang tererosi dan terdeposit disimulasikan sebagai proses pergerakan sedimen sehingga komponen pergerakan sedimen dimasukkan dalam persamaan kontinuitas aliran permukaan dan persamaan dasar modelnya menjadi persamaan yang mengandung komponen konsentrasi sedimen.

Proses erosi disimulasikan (seperti terlihat ada Gambar 2) ketika tetesan hujan jatuh ke permukaan tanah mengakibatkan terjadinya penggerusan. Persamaan dasarnya adalah persamaan dasar sedimen dan volume aliran ketika terjadi aliran permukaan, sehingga pergerakan kapasitas aliran permukaan diperkirakan untuk menyimulasikan proses pergerakan sedimen melayang.

Penggerusan dan terdepositnya serta terangkutnya sedimen dinyatakan dalam persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$\frac{\partial (h_{ws}c)}{\partial t} + \frac{\partial (q_{ws}c)}{\partial x} = e(x, t) \quad 11)$$

$$e(x,t) = d_r + d_f$$

yang mana C adalah konsentrasi sedimen pada aliran permukaan, h_{ws} adalah kedalaman aliran, q_{ws} adalah debit dari aliran permukaan, e adalah net erosi, d_r adalah tanah yang terkelupas/ tergerus akibat tetesan hujan dan d_f adalah net tanah yang terkelupas akibat aliran.

Energi kinetis dari tetesan hujan dinyatakan sbb:

$$k_e = a r \quad 12)$$

dengan

a , kemiringan dari persamaan linier regresi

r , adalah intensitas hujan

k_e , total enersi dari tetesan hujan

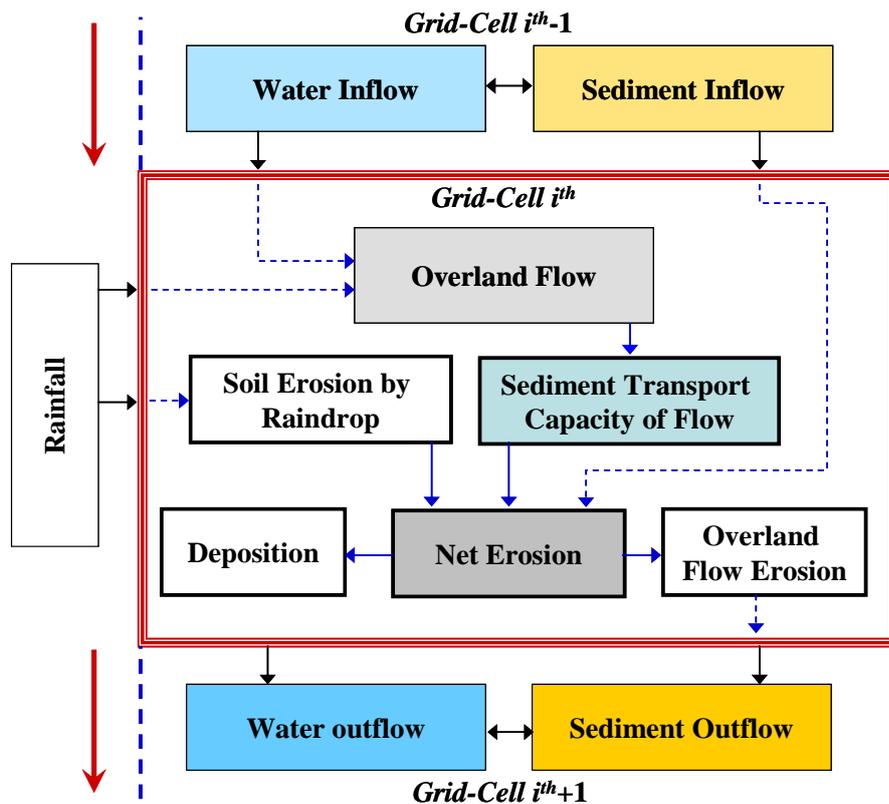
Suatu hubungan empiris yang sederhana untuk menghubungkan prakiraan pengelupasan tanah, d_r dapat dinyatakan dengan persamaan

$$d_r = \mu k k_e = \mu k 56.48 r \quad 13)$$

dengan:

μ , erodibilitas tanah

k , adalah parameter yang umumnya diambil 1



Gambar 2 Proses erosi dan sedimentasi yang terjadi di suatu grid

Beberapa peneliti menyatakan bahwa penggerusan atau deposit yang diakibatkan oleh aliran adalah linear proporsional ke perbedaan antara kapasitas pergerakan sedimen dari aliran dengan muatan sedimen aktual sebagai berikut:

$$d_f = \alpha (T_c - c)h_{ws} \tag{14}$$

dengan:

d_f , pengendapan sedimen yang terbawa aliran
 α , parameter dari efisiensi pengendapan

Pada sungai utama, material halus dari hulu bergerak ke hilir, membutuhkan waktu konsentrasi (ppm) yang diperkirakan oleh sebagai berikut:

$$T_c = \log\{i + j \log[(v_i - v_a i)/\omega]\} \tag{15}$$

Persamaan 15) adalah parameter yang nirdimensi yang menggambarkan karakteristik aliran dan sedimentasi:

dengan:

$$i = 5.435 - 0.386 \log\left(\frac{\omega d_{50}}{v}\right) - 0.457 \log\left(\frac{U^*}{\omega}\right)$$

$$j = 1.799 - 0.409 \log\left(\frac{\omega d_{50}}{v}\right) - 0.314 \log\left(\frac{U^*}{\omega}\right)$$

dengan

$$\omega = F \left[g d_{50} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \right]^{1/2} \tag{16}$$

Besarnya parameter F dinyatakan sbb:

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)g d_{50}^3} \right]^{1/2} - \left[\frac{36v^2}{(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)g d_{50}^3} \right]^{1/2}$$

Dasar asumsi dari suatu "lump model" adalah memodelkan proses jatuhnya hujan ke DAS mencapai suatu kondisi tetap dengan input hujan yang tidak merata. Dari asumsi ini debit aliran dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian antara intensitas curah hujan dan kemiringan dari area.

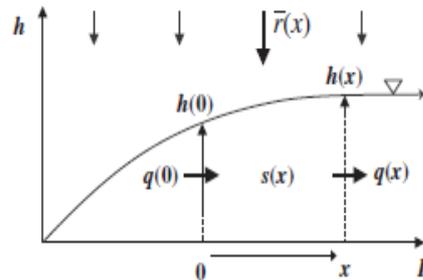
Pada kondisi tetap, debit aliran per unit lebar dari suatu grid dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q(x) = \frac{Q(x)}{w} = q(0) + \frac{\bar{r} \int_0^x dx = \bar{r} A_{up}}{w} + \bar{r} x \tag{17}$$

volume air pada suatu grid dapat dinyatakan sebagai integrasi dari suatu area penampang, A

$$s = \int_0^L A(x) dx = w \int_0^L h(x) dx \tag{18}$$

L adalah jarak horizontal dari suatu grid. Persamaan kinematik dapat dinyatakan $q = g(h)$, dan selanjutnya diintegrasikan dengan h, sehingga persamaan (9) dapat didefinisikan oleh $h = f(q)$.



Dengan menyubstitusikan dan mengintegrasikan dari x ke q dengan menggunakan hubungan yang diberikan pada persamaan (17), $dq \approx \frac{1}{4} r dx$ dan dengan mengganti $h = f(q)$ dengan $q = g(h)$, maka persamaan (18) menjadi

$$s = \frac{w}{\bar{r}} \int_{q(0)}^{q(L)} f(q) dq = \frac{w}{\bar{r}} [F(q(L)) - F(q(0))] \tag{19}$$

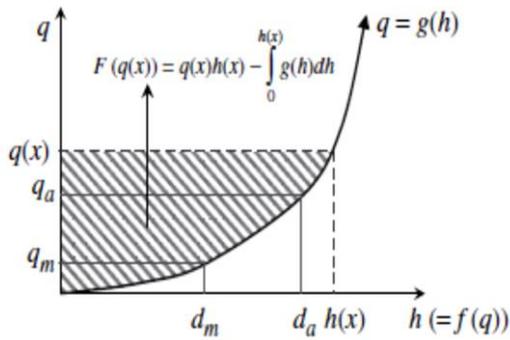
Jika persamaan q diketahui dari persamaan (17), dan h didapatkan dari persamaan (9), lalu $F(q(x))$ dapat dihitung. $F(q(x))$ dapat diperkirakan dan sangat tergantung pada kejenuhan dari tanah dan hubungan antara q-h pada ketiga lapisan sebagai berikut:

Untuk suatu kondisi aliran yang tidak jenuh ($q(x) \leq v_m d_m$):

$$\begin{aligned} F(q(x)) &= q(x)h(x) - \int_0^{h(x)} g(h) dh \\ &= q(x)h(x) - \int_0^{h(x)} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta dh \tag{20} \\ &= v_m h^2 \left(\frac{h}{d_m}\right)^{\beta-1} - \frac{v_m h^2}{\beta+1} \left(\frac{h}{d_m}\right)^{\beta-1} \end{aligned}$$

Untuk kondisi aliran jenuh ($q(x) \leq v_m d_m + v_a(d_a - d_m)$):

$$\begin{aligned} F(q(x)) &= q(x)h(x) - \int_0^{d_m} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta dh \\ &\quad - \int_{d_m}^{h(x)} (v_m d_m + v_a (h - d_m)) dh \\ &= \frac{1}{2v_a h^2} + \left(v_m - \frac{v_a}{2}\right) d_m^2 - \frac{v_m d_m^2}{\beta+1} \tag{21} \end{aligned}$$



Untuk suatu kondisi yang jenuh, aliran permukaan dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned}
 & (q(x) > v_m d_m + v_a(d_a - d_m)) \\
 & F(q(x)) = q(x)h(x) - \int_0^{d_n} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta dh \\
 & - \int_{d_m}^{d_a} (v_m d_m + v_a(h - d_m)) dh \\
 & - \int_{d_m}^{d_a} (v_m d_m + v_a(h - d_m)) \alpha (h - d_a)^m dh \\
 & = \frac{1}{2v_a h^2} + \left(v_m - \frac{v_a}{2}\right) d_m^2 - \frac{v_m d_m^2}{\beta+1} \\
 & + \alpha h(h - d_a)^m - \frac{\alpha(h-d_a)^2}{m+1} \quad (22)
 \end{aligned}$$

Air yang tertampung pada suatu skala DAS, Sw, dapat dihitung dengan asumsi dari menjumlahkan tampungan dari s (persamaan 18)) dari masing-masing gridnya sebagai berikut:

$$S_w = \sum_{i=1}^N S_i \quad (23)$$

Total dari area yang jenuh (Aws) dan volume tampungan aliran permukaan (Sws) dari DAS dihitung dengan menjumlahkan volume aliran air permukaan pada masing-masing grid (Sws) untuk menjadi aliran permukaan pada kondisi (h>d_a), dapat dinyatakan dalam persamaan sbb:

$$S_{ws} = \sum_{i=1}^{N_s} S_{ws} = \sum_{i=1}^{N_s} (s - (d_a x Lxw))_i \quad (24)$$

$$A_{ws} = \sum_{i=1}^{N_s} (Lxw)_i \quad (25)$$

Kapasitas maksimum sedimen yang akan terangkut dari DAS diperkirakan dari hasil penjumlahan tampungan sedimen yang terdistribusi sebagai berikut:

$$S_s^{max} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (T_c S_{ws})_i}{S_{ws}} \quad (26)$$

Konsentrasi sedimen dalam aliran permukaan (c) dari hulu dapat diselesaikan dengan persamaan sbb:

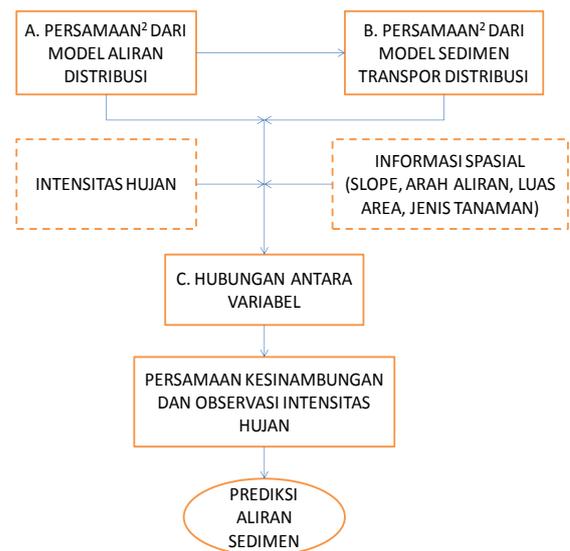
$$c = \frac{S_s}{\sum_{i=1}^{N_s} (S_{ws})_i} = \frac{S_s}{S_{ws}} \quad (27)$$

Persamaan kesinambungan dari aliran dan sedimen dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{dS_w}{dt} = A(r) - Q \quad (28)$$

$$\frac{dS_w}{dt} = A(d_r + d_f) - Q_s \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_s}{dt} &= A[\mu k k_e + \alpha(S_s^{max} - c)h_{ws}] - Q_s \\
 &= A[\mu k 56.48 \bar{r} + \alpha(S_s^{max} - c)h_{ws}] - Q_s \quad (30)
 \end{aligned}$$



Gambar 3 Diagram untuk Prediksi Aliran Sedimen di DAS dan di Sungai

Untuk membandingkan dua model antara observasi data, maka, "the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) memilih fungsi objektifnya sbb:

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{j=1}^M (O_j - S_j)^2}{\sum_{j=1}^M (O_j - \bar{O})^2} \quad (31)$$

M adalah nilai jumlah koordinat dari kejadian observasi dan simulasi, \bar{O} adalah rata-rata dari nilai observasi. Untuk grafik sedimen, kesalahan relatif dari puncak konsentrasi sedimen (RE|Q_{psc}) digunakan sebagai dasar dalam fungsi objektifnya. Kelayakan dari model untuk simulasi sedimen dinyatakan dalam persamaan sbb:

$$RE|Q_{psc} = \frac{(S - O)_{psc}}{O_{psc}} \quad (32)$$

dengan S, sedimen hasil model
O, sedimen hasil observasi

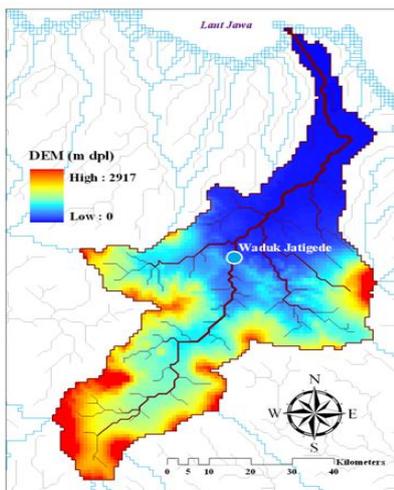
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pada model yang telah teruraikan di atas maka selanjutnya dilakukan persiapan input data dan peta untuk menunjang pemodelan di DAS Cimanuk. Berbagai peta dan data yang perlu disiapkan untuk kebutuhan model ini adalah sebagai berikut:

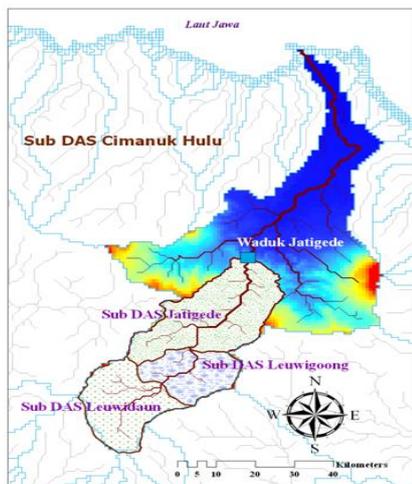
- 1 Peta DEM
- 2 Peta penggunaan lahan atau land use
- 3 Data curah hujan (jam-jaman atau harian, distribusi curah hujan)
- 4 Data debit aliran (jam-jaman atau harian)
- 5 Data hubungan muka air dan debit
- 6 Data hasil pengukuran dan pengamatan sedimentasi di Leuwidaun, Leuwigoong, dan Jatigede)
- 7 Data hasil Laboratorium tentang konsentrasi sedimen, berat jenis dan analisis butir
- 8 Data penampang memanjang sungai

Pada tahap awal disiapkan peta DEM (Digital Elevation Model) sehingga kontur atau ketinggian dari DAS Cimanuk dapat terpetakan (Gambar 4). Kemudian dari peta landuse maka areal dari masing-masing tutupan lahan untuk tiap sub DAS atau DAS dapat dihitung dan ditentukan.

Untuk kegiatan ini dicoba untuk mengetahui dan melakukan kajian terhadap sub-sub DAS di Cimanuk hingga ke hilir Cimanuk. Untuk itu telah dibuat peta masing-masing sub DAS nya yang terdiri dari sub DAS Leuwidaun, Sub DAS Leuwigoong, Sub DAS Jatigede dan sub DAS Cimanuk Hilir. Pembagian dan pemetaan sub DAS tersebut berdasarkan pada titik pengamatan pos duga air di lokasi-lokasi tersebut (Gambar 5).

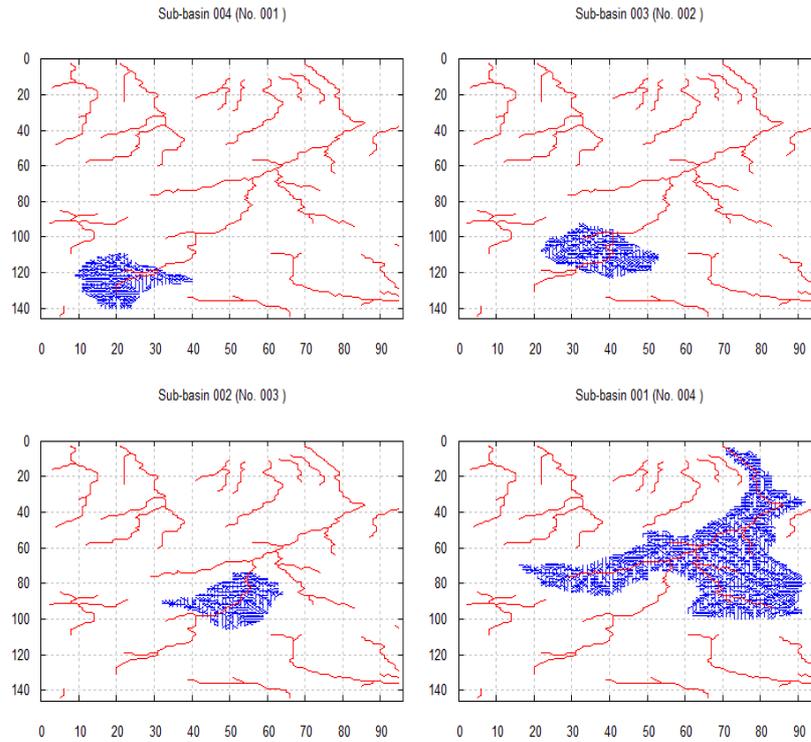


Gambar 4 Peta DEM DAS Cimanuk

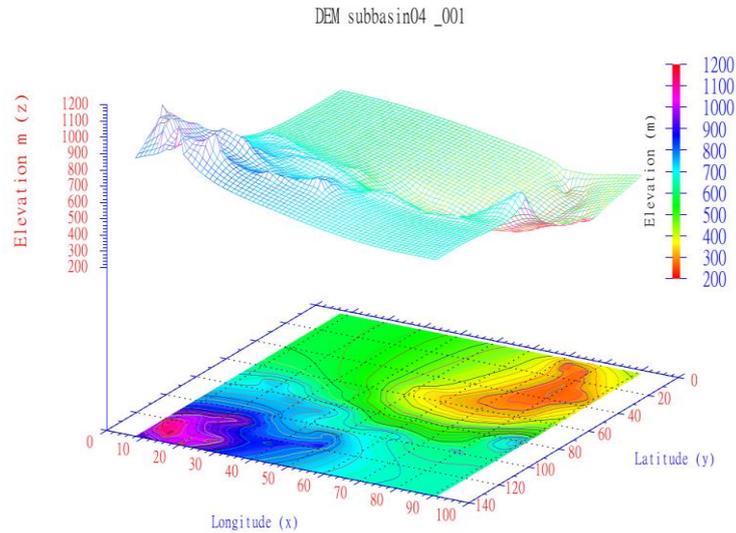


Gambar 5 Peta sub DAS Cimanuk untuk Kajian Erosi dan Sedimentasi, 2011

Perkiraan Distribusi Erosi dan Sedimentasi di DAS Cimanuk dengan Menggunakan...(Agung Bagiawan)



Gambar 6 Gambaran dari area masing-masing sub DAS di Cimanuk

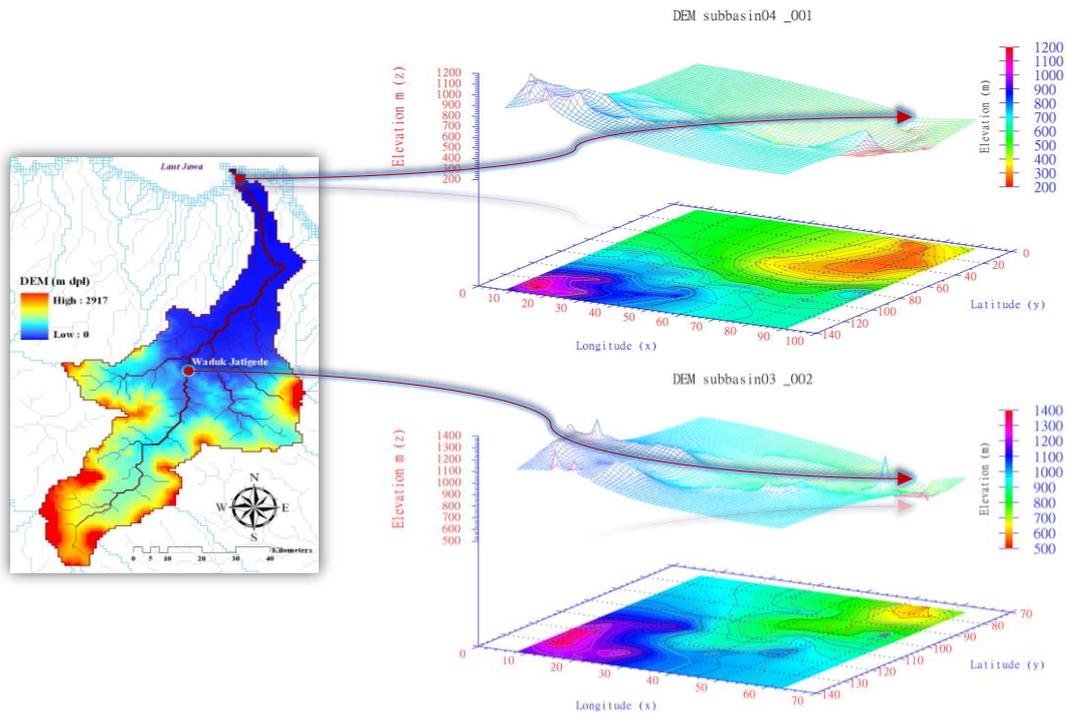


Gambar 7 Peta Ketinggian dari Sub DAS Leuwidaun

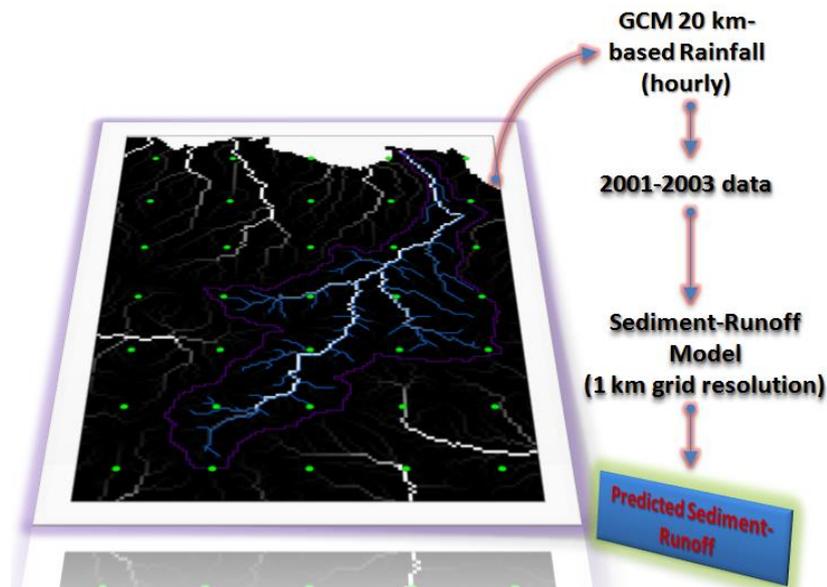
Masing-masing sub Das diberikan penomoran dari hulu ke hilir (Gambar 6) dimana,

- sub DAS 001 adalah sub DAS Leuwidaun
- sub DAS 002 adalah sub DAS Leuwigoong
- sub DAS 003 adalah sub DAS Jatigede
- sub DAS 004 adalah sub DAS Cimanuk Hilir,

Masing-masing subbasin tersebut di atas dapat dipetakan ketinggiannya dari DAS berdasarkan pada peta DEM yang dimiliki pada sub DAS tersebut dengan menggunakan model GIS. Adapun peta ketinggian dari Sub DAS Leuwidaun dan Cimanuk secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 8 Hasil pengeplotan kondisi topografi dari masing-masing sub DAS Leuwigoong, Jatigede dan Cimanuk Hilir dengan Model GIS



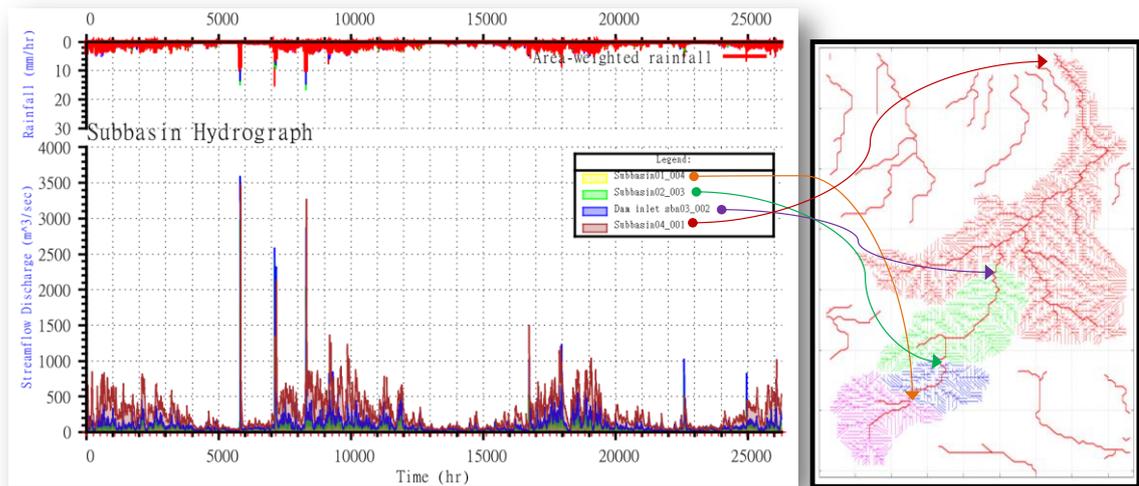
Gambar 9 Pembagian diagram *grid* dalam pengambilan data hujan dari satelit

Menilik akan keterbatasan data curah hujan jam-jaman maka untuk tahap awal ini digunakan pendekatan dengan menggunakan data dari satelit untuk mempersiapkan besaran curah hujan yang terjadi di masing-masing sub DAS diasumsikan sejenis dengan data yang teramati di DAS Cimanuk dari Tahun 2001 – 2003 (Lihat Gambar 9).

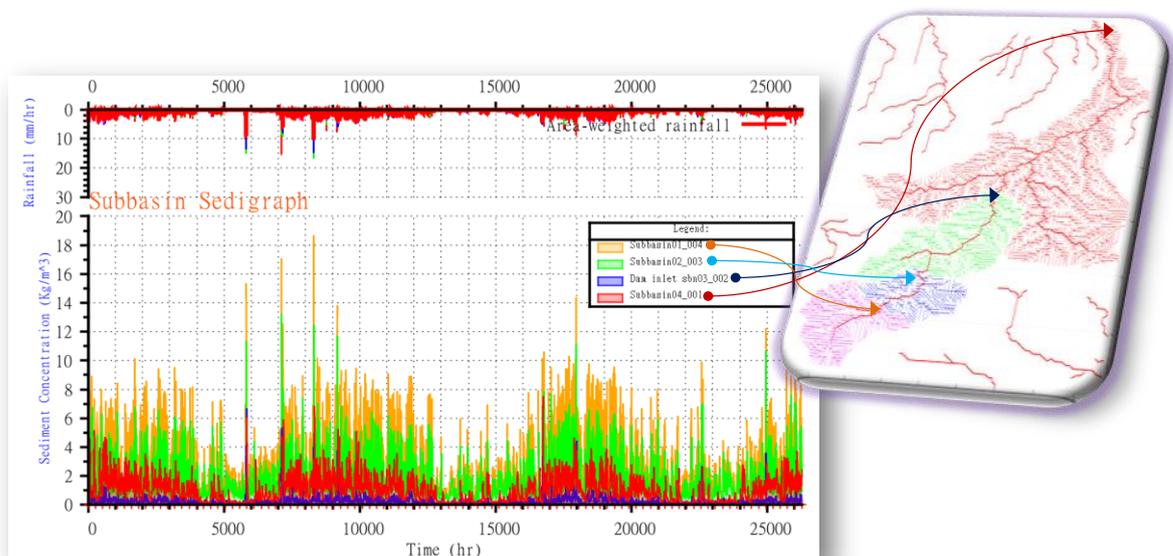
Berdasarkan data dari hasil pemantauan/pengamatan debit pada sub DAS 1, Sub DAS 2 dan

Sub Das 3 dan Sub Das 4, dapat diplot besarnya aliran dan curah hujan rata-rata yang terjadi pada DAS Cimanuk tersebut. Pengeplotan tersebut dapat dilihat pada Gambar 10.

Dari pengamatan dan pengukuran konsentrasi sedimen yang dilakukan pada sub DAS 1 s/d Sub DAS 4 dapat memberikan gambaran seperti terlihat pada Gambar 11.



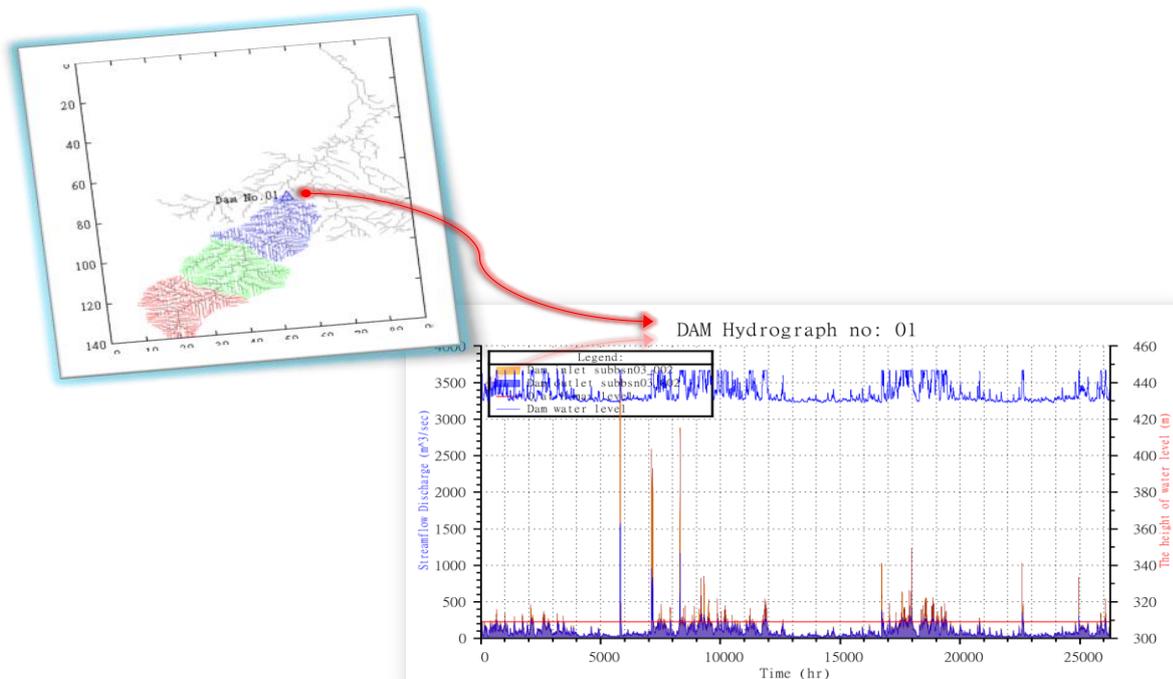
Gambar 10 Pengeplotan Data pengamatan hujan, dan aliran Tahun 2011 pada masing-masing sub DAS



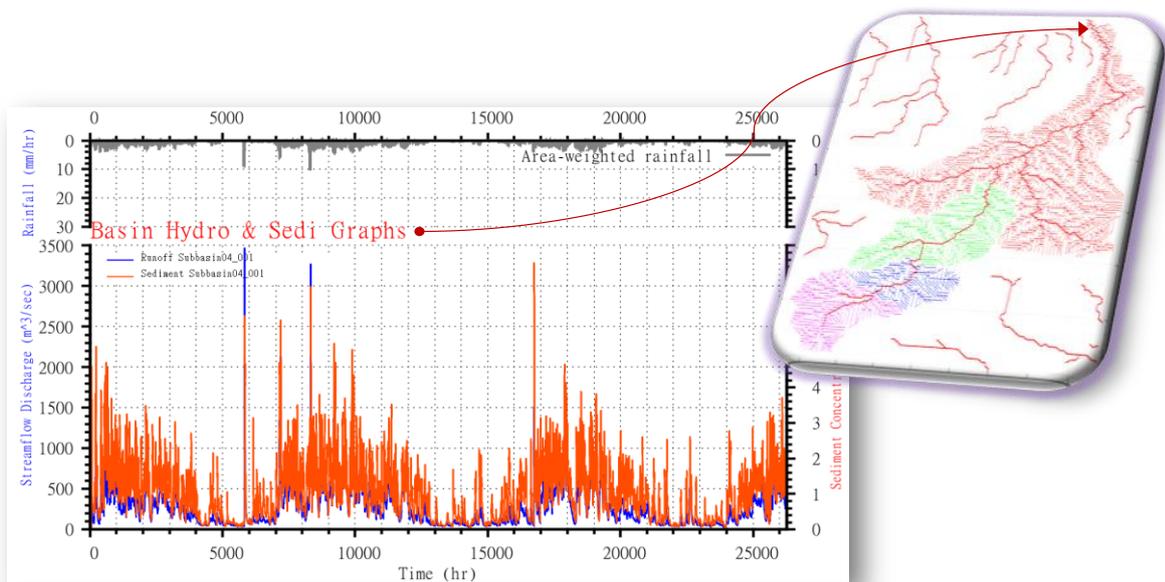
Gambar 11 Plot Hubungan antara Hujan, dan Konsentrasi Sedimen

Gambar 12 menunjukkan hubungan antara curah hujan yang teramati dan besarnya aliran di DAS 01. Dari hasil analisis model dan simulasi yang dilakukan untuk setiap bulan diperoleh gambaran tentang besarnya hujan, aliran, konsentrasi sedimen dan debit sedimen yang terbawa oleh aliran pada basin di DAS Cimanuk dapat dilihat pada Gambar 13.

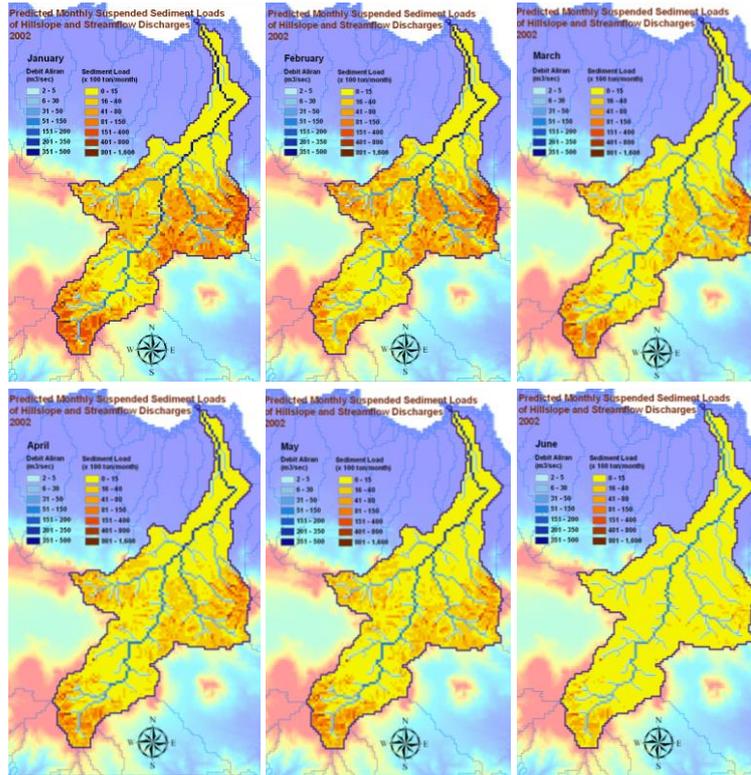
Berdasarkan pada data yang tersedia dan model hubungan antara aliran erosi dan sedimentasi maka dapat disimulasikan pergerakan sedimennya, dan bila diplot akan dapat dibuat peta untuk setiap kejadian hujan atau untuk kondisi sedimentasi tiap bulannya. Peta dari angkutan sedimen yang terjadi di sungai dan di DAS untuk DAS Cimanuk ini dapat dilihat pada Gambar 14 sampai dengan 15.



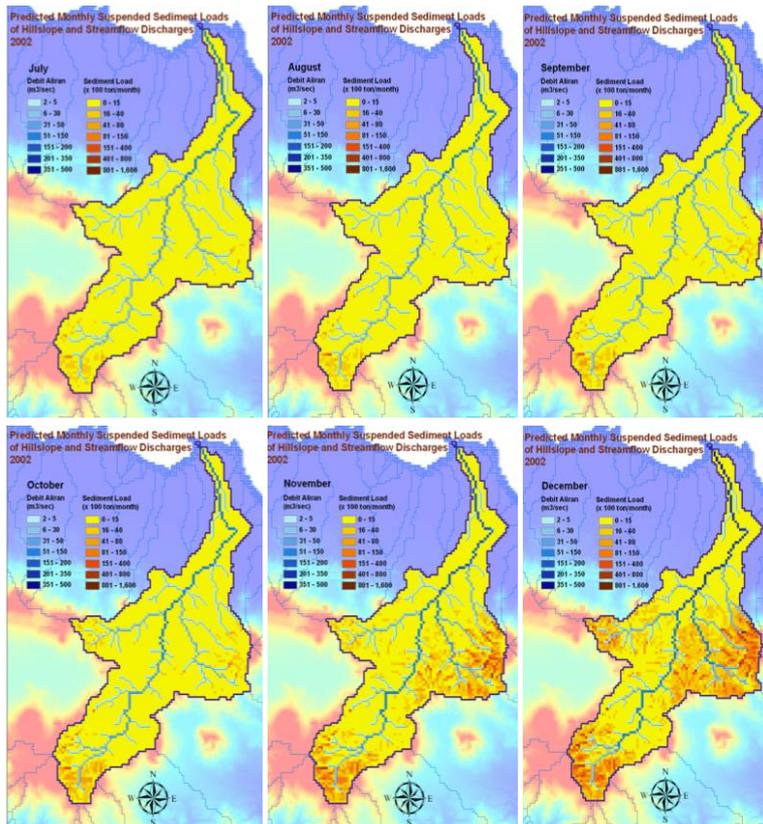
Gambar 12 Hubungan antara curah hujan, muka air dan aliran untuk suatu sub DAS di DAS Cimanuk



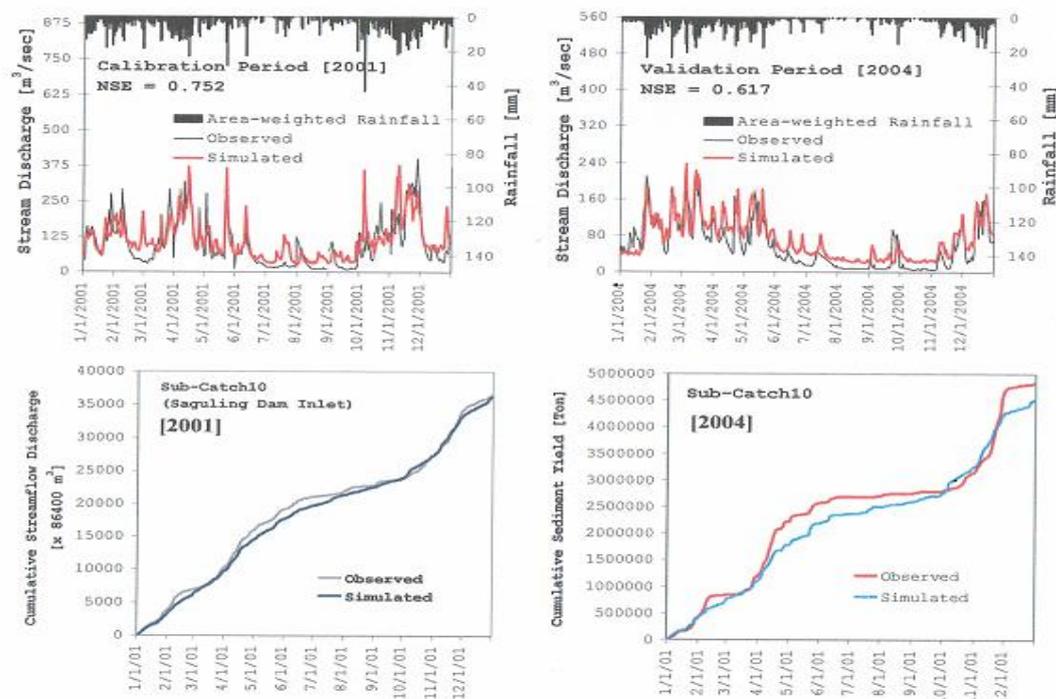
Gambar 13 Hubungan antara aliran, konsentrasi sedimen dan besarnya curah hujan yang terjadi di DAS di Cimanuk



Gambar 14 Peta angkutan sedimen dan distribusi beban sedimen di Das Cimanuk untuk bulan Januari – Juni 2011



Gambar 15 Peta angkutan sedimen dan distribusi beban sedimen di Das Cimanuk untuk bulan Juli – Desember 2011



Gambar 16 Validasi Model pada DAS Citarum Nanjung

Dari hasil analisis peta tersebut terlihat bahwa untuk bulan-bulan basah yang mempunyai curah hujan lebat seperti Januari, Februari, Maret dan Desember terlihat sedimentasi yang cukup besar pada Sub DAS Cimanuk Hulu, Sub DAS Cilutung Hulu, Sub DAS Cipeles Hulu dan Sub DAS Cikeruh.

Hasil ini menunjukkan bahwa pada lokasi-lokasi tersebut telah terjadi erosi yang cukup besar. Untuk membuktikan bahwa model ini layak digunakan untuk memprediksi hubungan antara hujan, aliran dan sedimen pada suatu sub-sub DAS tersebut diatas, dilakukan pengecekan dengan melakukan pemantauan lapangan. Kalibrasi pada sub-sub DAS Cimanuk akan dilakukan pada tahun mendatang setelah data curah hujan otomatis, pengamatan aliran serta pengukuran sedimentasi memadai untuk suatu periode waktu yang bersamaan.

Dengan tersedianya data pengamatan hujan otomatis dan sedimentasi pada beberapa sub DAS, dapat digunakan sebagai bahan perbandingan/gambaran secara spasial dan temporal beban sedimen yang terjadi di DAS Cimanuk akibat data hujan yang diperoleh dari satelit dan data hujan hasil observasi. Akurasi model dengan mengaplikasikan data satelit ini juga telah dibuktikan dengan diaplikasikannya - pada DAS Citarum - Nanjung.

Model berhasil diterapkan pada DAS Citarum di mana telah dilakukan kalibrasi dan verifikasi sedimen dan debit aliran di outlet Nanjung seperti terlihat pada Gambar 16.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian erosi dan sedimentasi di DAS Cimanuk dapat di simpulkan bahwa data curah hujan yang diperoleh dari pengamatan satelit telah berhasil digunakan sebagai input ke dalam model hubungan antara hujan-erosi-aliran dan sedimentasi di DAS Cimanuk, dan telah dapat memberikan gambaran yang sesuai dengan kondisi erosi yang terjadi dilapangan pada sub-sub DAS Cimanuk. Model juga telah terverifikasi pada DAS Citarum - Nanjung.

Model Hubungan Hujan Erosi Aliran Sedimen telah berhasil dikembangkan dan diaplikasikan di DAS Cimanuk

Besarnya dan lokasi erosi yang terjadi di DAS Cimanuk untuk tiap bulan dapat diketahui dalam skala tempat dan waktu

Output dari model ini dapat digunakan sebagai masukkan ke pengelola untuk dapat menyusun program untuk konservasi dengan cara memitigasi erosi dan sedimentasi yang terjadi di Sub-Sub DAS Cimanuk.

Model yang dikembangkan saat ini selanjutnya akan dianalisis dan dievaluasi dengan menggunakan data curah hujan aktual yang teramati di DAS Cimanuk dan dibandingkan dengan data yang diperoleh dari pengamatan satelit. Bilamana hasil korelasi yang diperoleh dengan menggunakan data hujan dari satelit dan data hujan yang teramati di lapangan cukup baik, maka model akan coba untuk diaplikasikan pada DAS-DAS lainnya di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Aksoy H, Kavvas ML. 2005. *A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models*. *Catena* 64: 247–271. DOI:10.1016/j.catena.2005.08.008.
- Arabi M, Govindaraju RS, Hantush M. 2007. *A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices*. *Journal of Hidrologi* 333: 459–471. DOI: 10.1016/j.hydrol.2006.09.12.
- Canfield HE, Goodrich DC. 2006. *The impact of parameter lumping and geometric simplification in modeling runoff and erosion in the shrublands of southeast Arizona*. *Hydrological Processes* 20: 17–35. DOI: 10.1002/hyp.5896.
- Carpenter TM, Georgakakos KP. 2006. *Discretization scale dependencies of the ensemble flow range versus catchment area relationship in distributed hydrologic modeling*. *Journal of Hidrologi* 328: 242–257. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.12.008.
- FAO. 2003. *The digital soil map of the world and derived soil properties, version 3.6*. FAO/UNESCO: Rome, Italy.
- Ferro V, Porto P. 2000. *Sediment delivery distributed (SEDD) model*. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 5(4): 411–422.
- Hepner CS, Loague K. 2008. *A dam problem: simulated upstream impacts for a Searsville-like watershed*. *Ecohidrologi* 1: 408–424. DOI: 10.1002/eco.34.
- Jarritt NP, Lawrence DSL. 2007. *Fine sediment delivery and transfer in lowland catchments: modeling suspended sediment concentrations in response to hydrological forcing*. *Hydrological Processes* 21: 2729–2744. DOI: 10.102/hyp.6402.
- Kalin L, Govindaraju RS, Hantush MM. 2003. *Effect of geomorphic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentgraph over small watersheds*. *Journal of Hidrologi* 276: 89–111.
- Kim S, Tachikawa Y, Sayama T, Takara K. 2009. *Ensemble flood forecasting with stochastic radar image extrapolation and a distributed hydrological model*. *Hydrological Processes* 23: 597–611.
- Kojima T, Takara K. 2003. *Grid-cell based distributed flood-runoff model and its performance, weather radar information and distributed hydrological modeling*. IAHS Publications 282: 234–240.
- Lenhart L, Rompaey AV, Steegan A, Fohrer N, Frede HG, Govers G. 2005. *Considering spatial distribution and deposition of sediment in lumped and semi-distributed models*. *Hydrological Processes* 19: 785–794. DOI: 10.1002/hyp.5616.
- Liu Z, Martina MLV, Todini E. 2005. *Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment*. *Hidrologi and Earth System Sciences* 9(4): 347–364.
- Lu H, Moran CJ, Sivapalan M. 2005. *A theoretical exploration of catchment- scale sediment delivery*. *Water Resources Research* 41: 1–15. DOI:10.1029/2005WR004018.
- Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Auerswald, K, Chisci G, Torri D, Styczen ME, Folly, AJV. 1998a. *The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide*. Silsoe College: Cranfield University, UK.
- Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Chisci G, Torri D. 1998b. *The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. *Earth Surface Process and Landforms* 23:527–544.
- Nakagawa H, Satofuka Y, Oishi S, Muto Y, Sayama T, Takara K, Sharma RH. 2008. *Observations and modeling of rainfall and sediment runoff in the Lesti River basin, tributary of the Brantas River, Indonesia*.
- Nunos JP, Viera GN, Seixas J, Goncalvas P, Carvalhais N. 2005. *Evaluating the MEFEDIS model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events*. *Catena* 61: 210–228. DOI: 10.1016/j.catena.2005.03.005.
- Oishi S, Sayama T, Nakagawa H, Satofuka Y, Muto Y, Sisinggih D, Sunada K. 2005. *Development of estimation method for impact energy of raindrop considering raindrop size distribution and the relationship between the impact energy and local sediment yield*. *JSCE* 49: 1087–1092.

- Sayama T, McDonnell JJ. 2009. A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale. *Water Resources Research* 45: 1–14. DOI: 10.1029/2008WR007549.
- Sayama T, Takara K, Tachikawa Y. 2003. Reliability evaluation of rainfall-sediment-runoff models. *IAHS Pub.* 279: 131–141.
- Shirmohammadi A, Chu TW, Montas HJ. 2008. *Modeling at catchment scale and associated uncertainties.* *Boreal Environment Research* 13:185–193. ISSN 1797-2469.
- Singh PK, Bhunya PK, Mishra SK, Chaube UC. 2008. A sediment graph model based on SCS-CN method. *Journal of Hidrologi* 349: 244–255. DOI: 10.1016/j.hydro.2007.11.004.
- Sivapalan M, Takeuchi K, Franks SW, Gupta VK, Karambiri H, Lakshmi V, Liang X, McDonnell JJ, Mendiondo EM, O'Connell PE, Oki T, Pomeroy JW, Schertzer D, Uhlenbrook S, Zehe E. 2003. *IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2013: shaping an exciting future for the hydrological sciences.* *Hydrological Sciences Journal* 48(6): 857–880.
- Tachikawa Y, Nagatani G, Takara K. 2004. *Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism.* *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE* 48: 7–12.
- Takara K, Nakayama D, Tachikawa Y, Sayama T, Nakagawa H, Satofuka Y, Egashira S, Fujita M. 2001. *A rainfall-sediment-runoff model in the upper Brantas River, East Java, Indonesia.* *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan* 44(B-2): 247–257.
- Takasao T, Shiiba M. 1988. *Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its application to runoff system lumping.* *Journal of Hidrologi* 102: 301–322.
- Wegener T, Wheeler SH, Gupta VK. 2004. *Rainfall-runoff modelling-a review. In Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments.* Imperial College Press: London; 1–8.
- Xu ZX, Pang JP, Liu CM, Li JY. 2009. *Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model.* *Hydrological Processes* 23: 3619–3630. DOI: 10.1002/hyp.7475.