

# Applicazione su un corso d'acqua appenninico di alcuni descrittori numerici operanti in ambiente GIS

**Sebastian Schweizer**

*Dipartimento di Ingegneria Agraria e Forestale, Università di Firenze - Via S. Bonaventura, 11-13 Quarcchi - 50145 Firenze - Italia.  
sebastian.schweizer@unifi.it.*

*Pervenuto il 6.2.2007; accettato il 18.1.2008*

## **Riassunto**

Scopo del lavoro è l'analisi di alcuni descrittori numerici riguardanti i mesohabitat a scala di corridoio fluviale che possono essere di supporto/integrazione per progetti di riqualificazione lungo un'intera asta fluviale o di un suo settore (valenza gestionale) e, di conseguenza, fornire parametri ecologicamente rilevanti al progettista per aiutarlo nella scelta della tipologia, distribuzione e dimensionamento delle opere di riqualificazione in alveo e sponda (valenza progettuale). In particolare, nella ricostruzione di una fascia di vegetazione riparia –uno degli interventi chiave della riqualificazione fluviale– troviamo, tra i principali problemi da affrontare, la determinazione dell'ampiezza della fascia stessa. In linea generale, infatti, la larghezza delle fasce fluviali non deve essere fissa, ma va determinata sulla base della/e funzione/i che deve assolvere e delle condizioni locali (es. pendenza, permeabilità del suolo, ecc.). Da qui l'esigenza di strumenti che consentano di calcolare tale ampiezza. In particolare sono stati analizzati un algoritmo per la delimitazione delle fasce vegetazionali riparie ed un'estensione per ArcView 9.2 per il calcolo della radiazione solare. Entrambi i descrittori sono risultati estremamente interessanti per lo scopo prefissato, pur richiedendo miglioramenti nell'elaborazione degli algoritmi e rimanendo comunque assoggettati ad un quadro d'insieme che consideri anche gli altri fattori, come ad esempio la qualità dell'habitat e della vegetazione, la sicurezza idraulica, ecc.

PAROLE CHIAVE: mesohabitat / riqualificazione fluviale / condizioni di riferimento / GIS

## **Application on an appennine stream of some numerical descriptors in a GIS environment**

The purpose of the present work consisted in analyzing some numerical descriptors for the mesohabitat at the stream corridor scale and that can be a support/integration for restoration projects at stream or reach scale (managerial valence). The aim is to supply ecologically important parameters for the planner, in order to help him in the choice of the typology, the distribution, and the dimensioning of the restoration works in the river bed and on its banks (planning valence). In particular the reconstruction of riparian buffers is often one of the major keys of the river restoration; the determination of the width of the buffer itself is one of the main problems to face for this type of intervention. In general, the width of a river buffer must not to be a fixed value but a value that has to be determined according to the functions that it has to carry out and according to the local conditions (e.g. slope, permeability of the ground, etc). From here the requirement of instruments that concur to calculate such width. In particular an algorithm for the delineation of the riparian buffers and an extension for ArcView 9.2 for the calculation of the solar radiation have been analyzed. Both the descriptors turn out to be extremely interesting for the prefixed scope but they need further improvements and corrections of their algorithms even though remaining subdued at a framework that considers other factors such as habitat quality, hydraulic safety, etc.

KEY WORDS: mesohabitat / river restoration / reference condition / GIS

## **INTRODUZIONE**

La riqualificazione fluviale è un obiettivo complesso che comincia con l'individuazione dei disturbi naturali o indotti dall'uomo a danno della struttura e delle funzioni di un ecosistema ed in grado, a volte, di impedire il ripristino/ritorno ad una condizione accettabile. Base fondamentale è una comprensione della strut-

tura e delle funzioni dei corridoi fluviali e dei processi fisici, chimici e biologici che li modellano (DUNSTER e DUNSTER, 1996).

La riqualificazione comprende una vasta gamma di azioni e misure progettate per mettere in grado i corridoi fluviali di recuperare le funzioni e l'equilibrio

dinamico, autosostenendosi. Il primo e più critico passo nell'implementazione della riqualificazione consiste, dove possibile, nel bloccare le attività di disturbo che causano degradazione o impediscono il recupero dell'ecosistema. Le azioni di riqualificazione comprendono sia approcci passivi, che comportano la rimozione o l'attenuazione di attività che creano disturbi cronici, sia approcci attivi, con interventi e misure atti a riparare i danni arrecati alle strutture dei corridoi fluviali.

I professionisti che si occupano di riqualificazione dei corridoi fluviali utilizzano generalmente uno dei tre seguenti approcci:

- *recupero indisturbato e senza interventi*: dove il corridoio fluviale è in grado di recuperare rapidamente, una riqualificazione attiva non solo non è necessaria ma può risultare addirittura dannosa;
- *intervento parziale mediante recupero assistito*: nel caso di un tentativo di recupero discontinuo e/o con tempi lunghi;
- *intervento sostanziale mediante recupero gestito*: dove il recupero delle funzioni desiderate va al di là delle capacità di riparazione dell'ecosistema e sono richieste misure di riqualificazione attiva.

Le finalità specifiche e proprie di ogni tipo di riqualificazione dovrebbero essere definite all'interno del contesto delle condizioni e dei disturbi attuali del bacino, del corridoio e dell'alveo. Anche in situazioni ottimali la riqualificazione non comporta necessariamente una restituzione del sistema alle sue condizioni precedenti od originarie: lo scopo principale è ristabilire le funzioni di autosostentamento del fiume.

In particolare, nella ricostruzione di una fascia di vegetazione riparia –uno degli interventi chiave della riqualificazione fluviale (VAUGHN *et al.*, 1995; TABACCHI *et al.*, 1998)– troviamo, tra i principali problemi da affrontare, la determinazione dell'ampiezza della fascia stessa. In linea generale, infatti, la larghezza delle fasce fluviali non deve essere fissa ma va determinata sulla base della/e funzione/i che deve assolvere e delle condizioni locali (es. pendenza, permeabilità del suolo, ecc.). Da qui l'esigenza di strumenti che consentano di calcolare tale ampiezza.

La filosofia nel progettare opere di riqualificazione fluviale dovrebbe essere, purché applicabile nella situazione specifica, quella della comparazione tra condizioni di riferimento e condizioni da valutare. Per condizioni di riferimento ci si può ricollegare alla definizione generale per la classificazione dello stato ecologico (stato elevato) dei corpi d'acqua superficiali riportata nella direttiva 2000/60/CE: «Nessuna alterazione antropica, o alterazioni poco rilevanti, dei valori degli elementi di qualità fisico-chimica e idromorfologica del tipo di corpo idrico superficiale ri-

spetto a quelli di norma associati a tale tipo inalterato. I valori degli elementi di qualità biologica del corpo idrico superficiale rispecchiano quelli di norma associati a tale tipo inalterato e non evidenziano nessuna distorsione, o distorsioni poco rilevanti. Si tratta di condizioni e comunità tipiche specifiche». La definizione in sé implica quindi la conoscenza dei parametri di riferimento, ricavabili sia da banche dati, sia da una conoscenza profonda del territorio e della sua storia. Tornando alla comparazione questa può essere effettuata quindi:

- per valutare l'entità di un impatto già verificatosi: tra caratteristiche di tratti relativamente intatti (naturali o seminaturali) e tratti sui quali si vogliono intraprendere opere di riqualificazione, purché appartenenti entrambi alla stessa tipologia fluviale (identiche caratteristiche geomorfologiche, geologiche, climatiche, ecc.);
- per prevedere l'entità del recupero a seguito di interventi: tra lo stato di alcune caratteristiche esistenti in uno specifico tratto e quelle che si avrebbero una volta applicate delle specifiche condizioni di riferimento.

Lo scopo del presente lavoro è quindi consistito nell'analizzare due strumenti funzionanti su un Sistema Geografico Informativo in grado di fornire indicazioni su due fra le più importanti funzioni che deve assolvere un buffer vegetazionale: l'assorbimento degli inquinanti e la regolazione dell'irraggiamento solare nel corridoio fluviale (cfr. tabella I). Tali strumenti possono quindi essere utilizzati come supporto all'interno di un quadro più ampio che tenga presente gli altri fattori che devono essere considerati in sede di progettazione dei buffer vegetazionali (e delle opere di riqualificazione fluviale nel loro complesso), come ad esempio l'analisi dei tempi di ritorno, la sicurezza idraulica, la qualità della vegetazione e degli habitat, ecc.

## MATERIALI E METODI

### Area di studio

Per lo studio è stato scelto un tratto del fiume Sieve (Fig. 1), affluente di destra dell'Arno, in provincia di Firenze presso la località Balze di Vicchio.

### *Il modello Xiang-Phillips per la rimozione degli inquinanti*

Il problema di calcolare la larghezza di una fascia di vegetazione riparia necessaria a garantire la rimozione degli inquinanti (variabile nel corso di un tratto fluviale, secondo le specifiche condizioni locali) è stato affrontato da XIANG (1993) che ha proposto il seguente modello (*b-function*) per la delimitazione di un buffer a larghezza variabile:

$$L_p = p^{0,5} (L_r) \left[ \left( \frac{n_r}{n_b} \right)^{0,6} \left( \frac{K_r}{K_b} \right)^{0,4} \left( \frac{s_r}{s_b} \right)^{-0,7} \left( \frac{C_r}{C_b} \right)^{0,6} \right]^{-0,5} \quad (1)$$

Dove:

i pedici  $b$  ed  $r$  si riferiscono rispettivamente ad un buffer proposto e ad uno di riferimento: per buffer di riferimento si intende quello con un'efficienza di rimozione degli inquinanti confrontabile ad un trattamento dei reflui primario e secondario (PHILLIPS, 1989);

$L_p$  = larghezza desiderabile di un buffer vegetato;

$p$  = il rapporto di efficienza del buffer;

$n$  = coefficiente di scabrezza di Manning;

$L$  = larghezza del buffer (metri);

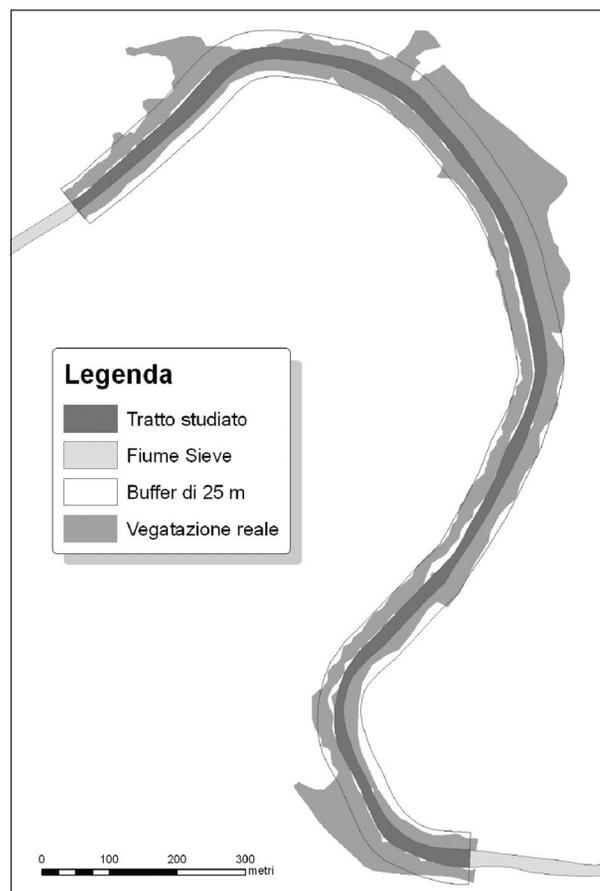
$K$  = conducibilità idraulica in condizione satura (cm/h) equivalente alla permeabilità dell'orizzonte superficiale;

$s$  = pendenza (pendenza del versante in direzione trasversale al corso d'acqua);

$C$  = capacità in acqua disponibile per tutto lo spessore di suolo considerato (cm).

Il rapporto di efficienza  $p$  è così interpretabile: un valore di  $p$  minore di 1 indica che il buffer che viene valutato è meno efficiente di quello di riferimento, mentre un valore maggiore di 1 ne indica uno più efficiente. In poche parole, la larghezza del buffer necessaria ad ottenere una determinata efficienza di rimozione degli inquinanti aumenta (in maniera non lineare) con la pendenza del sito, mentre si riduce all'aumentare della scabrezza, della conducibilità idraulica e della capacità in acqua disponibile nel sito.

Tale equazione deve essere successivamente utilizzata in una funzione di *Cost Distance* (cfr. ESRI, 2004; ADRIAENSEN *et al.*, 2003). L'algoritmo per il



**Fig. 1.** Il tratto del fiume Sieve utilizzato per le analisi del presente lavoro. È riportato anche un ipotetico buffer vegetazionale di 25 m di larghezza su entrambe le sponde del fiume.

**Tab. I.** Gli aspetti esaminati, i relativi descrittori numerici e gli aspetti funzionali ed ecologici connessi.

	<b>BUFFER DI VEGETAZIONE 1 – IRRAGGIAMENTO SOLARE</b>	<b>BUFFER DI VEGETAZIONE 2 – LA RIMOZIONE DEGLI INQUINANTI</b>
Descrittore numerico	Irraggiamento sull'area dell'alveo (Wh/m <sup>2</sup> )	Larghezza (m) ed area (m <sup>2</sup> ) del buffer di vegetazione
Tipo di comparazione	1) Tra uno stesso tratto con e senza buffer ripariali aventi diverse altezze della vegetazione; 2) Tra tratti diversi	Tra il buffer reale e quello di riferimento
Valenza ecologica	Scambi energetici e qualità dell'habitat (temperatura dell'acqua)	Scambi energetici, di materiali e qualità dell'habitat (biochimica e fisica dell'acqua e del substrato)
Funzione	1. Condotta 2. Sorgente	1. Filtro 2. Barriera
Attributo della funzione	1. Connettività 2. Larghezza	1. Connettività 2. Larghezza
Applicazione	Supporto/integrazione in sede Gestionale	1. Supporto/integrazione in sede Progettuale 2. Supporto/integrazione in sede Gestionale

calcolo della *Cost Distance* opera su formati di tipo *grid* in ambiente GIS. In pratica viene calcolato il “costo” cumulato che si ha nell’allontanarsi da una “sorgente” di origine. Nel caso specifico la sorgente di origine è data dal fiume stesso, mentre i valori ( $c_i$ ) per ogni *i-esima* cella della griglia di costo sono ottenuti ponendo nella (1)  $p = 1$  con  $c_i = 1/L_p$ , cioè il costo è dato dall’inverso della larghezza che il buffer di vegetazione dovrebbe avere in quella cella per raggiungere un’efficienza pari a quello di riferimento: in sintesi il ‘costo’ ci dice quale frazione dell’efficienza di riferimento fornirebbe la cella se fosse interamente coperta da vegetazione. I valori del buffer di riferimento  $K_r$ ,  $C_r$ ,  $s_r$  ed  $L_r$  sono riportati in tabella II, mentre  $K_b$ ,  $C_b$ , ed  $s_b$  vengono ottenuti da rilievi in campo o da analisi condotte con GIS nel caso della pendenza ( $s_b$ ). Si veda l’esempio successivo per maggiore chiarezza sul funzionamento dell’algoritmo.

*Funzionamento dell’algoritmo Cost Distance*

Nella figura 2 le celle che rappresentano il fiume hanno valore 0 (celle grigio chiare) mentre quelle bianche rappresentano il territorio circostante. Applicando la (1) per ogni cella (10 m x 10 m, nell’esempio) si ottengono i valori di larghezza che il buffer dovrebbe avere per raggiungere un’efficienza uguale a quello di riferimento date la pendenza, la conducibilità, la capacità in acqua disponibile ed il coefficiente di scabrezza per la cella (porzione di territorio) stessa. Ad esempio la cella contrassegnata con il numero 1 riporta un valore di 50 (metri), che sarebbe la larghezza che il buffer dovrebbe avere se tutto il territorio circostante fornisse come risultato della (1) un valore di 50 m.

**Tabella II.** I valori del buffer di riferimento (PHILLIPS, 1989).

Parametri del buffer di riferimento	Valore
Capacità in acqua disponibile ( $C_r$ )	17,07 cm
Conducibilità idraulica in condizione satura ( $K_r$ )	3,30 cm/h
Larghezza del buffer ( $L_r$ )	36,27 m
Coefficiente di scabrezza di Manning	0,41
Pendenza ( $s_r$ )	6 %

Nella cella contrassegnata con il numero 2 il valore riportato è 80 m: ciò vuol dire che le caratteristiche di  $K_b$  e/o di  $C_b$  e/o di  $s_b$  e/o  $n$  sono ‘peggiori’ della cella precedente.

Il passo successivo consiste quindi nel assegnare il ‘costo’ per ogni cella: i valori ( $c_i$ ) per ogni *i-esima* cella della griglia di costo sono ottenuti ponendo nella (1)  $p = 1$  con  $c_i = 1/L_p$ , cioè il costo è dato dall’inverso della larghezza che il buffer di vegetazione dovrebbe avere in quella cella per raggiungere un’efficienza pari a quello di riferimento. Nella figura 3 il costo della cella contrassegnata con il numero 1 è dato da  $c = 0,02$  (1/50) mentre nella cella numero 2 il costo è dato da  $c = 0,0125$  (1/80).

Il passaggio finale consiste nel calcolare il ‘costo di spostamento’ da una cella all’altra partendo da una sorgente, rappresentata in questo caso dalle ‘celle fiume’. Viene applicato l’algoritmo di *Cost Distance* vero e proprio. Nella figura 3 ad esempio per spostarsi dalla cella A (con costo  $a = 0,02$ ; cfr. fig. 2) verso la cella B (con costo  $b = 0,02$ ; cfr. fig. 2) il costo è dato da:

$$\frac{ar + br}{2} = 0,1$$

80	80	80	80	50	50	50	0	100	100	100	100	100	80	80	80	80
80	80	80	50	50	50	50	0	100	100	100	100	100	80	80	80	80
60	80	80	<b>2</b> 80	<b>1</b> 50	50	50	0	100	100	100	100	100	80	80	80	80
60	80	80	80	50	50	50	0	0	100	100	100	80	80	80	80	50
60	80	80	80	50	50	50	50	0	100	100	80	80	80	50	50	50
80	80	80	50	50	50	50	50	0	100	80	50	50	50	50	50	80
50	50	50	50	50	50	50	50	0	100	100	100	80	80	80	80	80

**Fig. 2.** Rappresentazione raster di un fiume (celle grigie, 10 m x 10 m) e del suo territorio circostante (celle bianche, 10 m x 10 m). I numeri all’interno delle celle sono i valori (in metri) assunti dalla (1). Per il significato dei numeri 1 e 2 in nero si veda il testo.

dove  $r$  è la risoluzione della cella in metri (10 m); per spostarsi da A a C (con costo  $c = 0,02$ ; cfr. fig. 3) il costo è dato da:

$$1,4142 \left( \frac{ar + cr}{2} \right) = 0,14$$

Nelle iterazioni successive per spostarsi ad esempio nella cella D (con costo  $d = 0,02$  – cfr. fig. 3) lo spostamento avviene dalla cella C con costo:

$$c_c + \left( 1,4142 \left( \frac{cr + dr}{2} \right) \right) = 0,42$$

( $c_c = 0,14$  è il costo cumulato della cella C; cfr. fig. 4): si noti che nelle iterazioni successive alla prima bisogna aggiungere al calcolo il costo cumulato assegnato alla cella dalla quale ci si sposta) e non dalla cella F il cui costo di spostamento verso D sarebbe di:

0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,02	0,02	0,02	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
0,0125	0,0125	0,0125	0,02	0,02	0,02	0,02	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
0,016667	0,0125	0,0125	<b>2</b> 0,0125	<b>1</b> 0,02	0,02	0,02	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
0,016667	0,0125	0,0125	0,0125	0,02	0,02	<b>B</b> 0,02	<b>A</b> 0	0	0,01	0,01	0,01	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,02
0,016667	0,0125	0,0125	0,0125	0,02	<b>G</b> 0,02	<b>C</b> 0,02	0,02	0	0,01	0,01	0,0125	0,0125	0,0125	0,02	0,02	0,02
0,0125	0,0125	0,0125	0,02	0,02	<b>D</b> 0,02	<b>F</b> 0,02	0,02	0	0,01	0,0125	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,0125
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0	0,01	0,01	0,01	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125

Fig. 3. La griglia di ‘costo’. I numeri all’interno delle celle sono il ‘costo’ (cioè quale frazione dell’efficienza di riferimento fornirebbe la cella se fosse interamente coperta da vegetazione) ottenuto calcolando l’inverso della (1). Per il significato delle lettere e dei numeri in grassetto si veda il testo.

<b>ND</b>	0,91	0,79	0,66	0,5	0,30	0,10	0	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,56	0,69	0,81	0,94
<b>ND</b>	0,96	0,84	0,70	0,5	0,30	0,10	0	0,05	0,15	0,21	0,31	0,41	0,52	0,65	0,77	0,90
<b>ND</b>	0,91	0,79	0,66	0,5	0,30	0,10	0	0,05	0,07	0,17	0,27	0,37	0,48	0,61	0,73	0,86
<b>ND</b>	0,91	0,79	0,66	0,5	0,30	<b>B</b> 0,10	<b>A</b> 0	0	0,05	0,15	0,25	0,36	0,49	0,61	0,74	0,90
<b>ND</b>	0,95	0,83	0,70	0,54	<b>G</b> 0,34	<b>C</b> 0,14	0,10	0	0,05	0,15	0,26	0,39	0,51	0,67	0,84	0,97
<b>ND</b>	<b>ND</b>	0,88	0,82	0,62	<b>D</b> 0,42	<b>F</b> 0,30	0,10	0	0,05	0,16	0,32	0,46	0,59	0,72	0,84	0,91
<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	0,90	0,70	0,5	0,30	0,10	0	0,05	0,15	0,25	0,36	0,49	0,61	0,74	0,86

Fig. 4. La griglia dei ‘costi’ cumulati – I numeri all’interno delle celle sono il ‘costo’ che viene cumulato durante lo spostamento da una sorgente (le celle rappresentanti il fiume) verso la periferia. Le celle “ND” sono quelle celle per le quali il costo cumulato è > 1 e rappresentano il limite del buffer stesso.

$$f_c + \left( \frac{fr + dr}{2} \right) = 0,5$$

(dove  $f_c = 0,3$  = costo cumulato di F; cfr. fig. 4): viene cioè assegnato il valore con costo minore (*i.e.* lo spostamento che costa meno). Se ad esempio in un' iterazione successiva lo spostamento dalla cella G avesse un costo minore di 0,42 il nuovo valore cumulato verrebbe automaticamente sostituito nella cella D. L' algoritmo viene reiterato finché lo spostamento da ogni cella verso le sue limitrofe è stato calcolato ed il costo cumulato sia  $\leq 1$  (il valore 1 viene impostato manualmente dall'utente, che se desidera un buffer ancora più efficiente di quello di riferimento può scegliere un valore  $> 1$ ). Le celle contrassegnate da "ND" rappresentano le celle con valori  $> 1$  e di conseguenza rappresentano i limiti del buffer stesso.

Il buffer così delineato risulterà quindi di larghezza variabile a seconda delle caratteristiche fisico-chimiche e morfologiche del terreno, al contrario di modelli che propongono, ad esempio, buffer a larghezza costante per l'intera area considerata (SPAROVEK *et al.*, 2002) o una larghezza minima localmente ampliabile al variare di determinate condizioni (NARUMALANI *et al.*, 1997).

#### Il buffer vegetazionale e la radiazione solare

La vegetazione riparia è riconosciuta come uno dei fattori principali nel ridurre il riscaldamento delle acque dei fiumi di ordine inferiore (BROWN e KRYGIER, 1970); l'azione rinfrescante, oltre che all'ombreggiamento, è dovuta anche all'evapotraspirazione dell'acqua contenuta nel suolo e nella parte superficiale della falda (BESCHTA, 1984). STANFORD *et al.* (1994) hanno dimostrato che la temperatura del fiume può essere mode-

rata anche dalle acque che fluiscono lateralmente nel fiume come conseguenza della risalita da falde freatiche profonde o della risalita dalla zona iporreica. Da qui è nata l'esigenza di studiare modelli in grado di prevedere la temperatura delle acque correnti superficiali che tengano conto dell'effetto schermante della vegetazione nei confronti della radiazione solare. Nel corso degli ultimi anni, quindi, con il forte sviluppo dei GIS sono stati studiati a loro volta diversi modelli per il computo della radiazione solare che giunge a terra. HOFIERKA e SURI (2002), sviluppatori di un modello per la radiazione solare per il GIS *open source* GRASS, hanno definito il modello sviluppato da FU e RICH (2000) come "un modello adatto per studi a scala di dettaglio". Il *Solar Analyst* (FU e RICH, 2000), un'estensione per ArcView 3.3 e ArcView 9.2, è infatti un modello in grado di computare l'irraggiamento per una determinata area geografica calcolando l'orientamento delle superfici (esposizione) e gli effetti dell'ombreggiamento partendo da un modello digitale del terreno (DEM). I passaggi effettuati dal programma sono i seguenti:

- 1 calcolo del profilo dell'orizzonte: viene calcolato per ogni cella di un modello digitale del terreno. Il profilo dell'orizzonte è definito dalla distribuzione fra cielo visibile ed ostruito e viene computato analizzando un set di direzioni intorno ad una posizione specifica e determinando il massimo angolo di cielo ostruito (angolo dell'orizzonte effettivo) in ogni direzione (Fig. 5);
- 2 calcolo della mappa solare: l'ammontare della radiazione solare diretta originata da ogni direzione del cielo viene rappresentata creando una mappa solare nella stessa proiezione emisferica del profilo dell'orizzonte (Fig. 6);

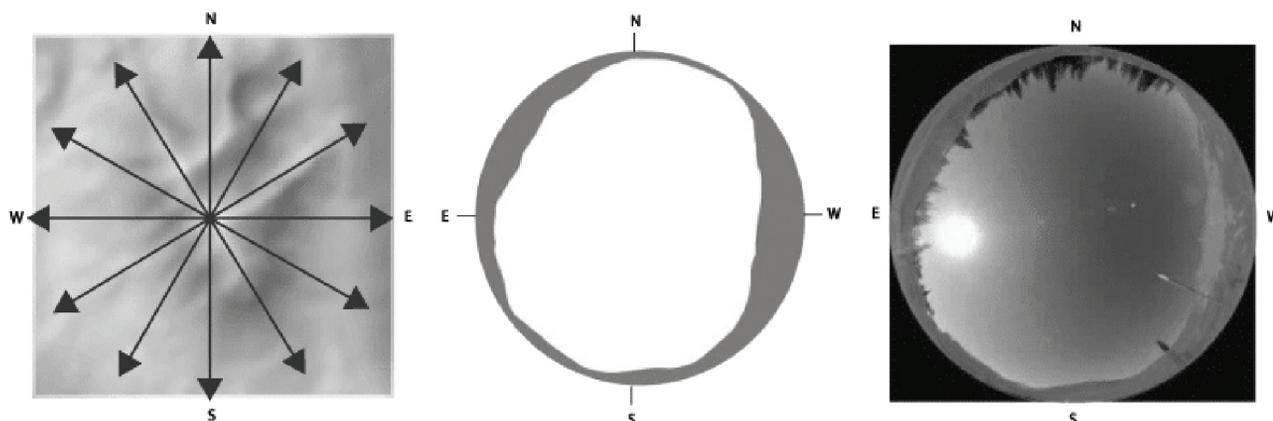
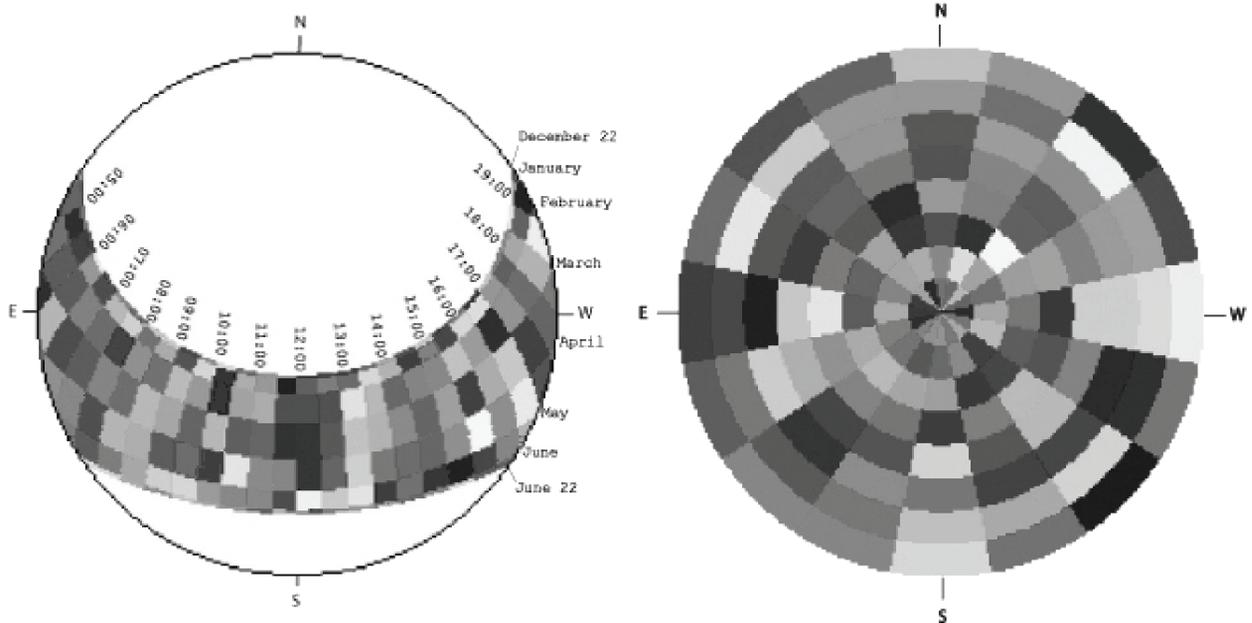


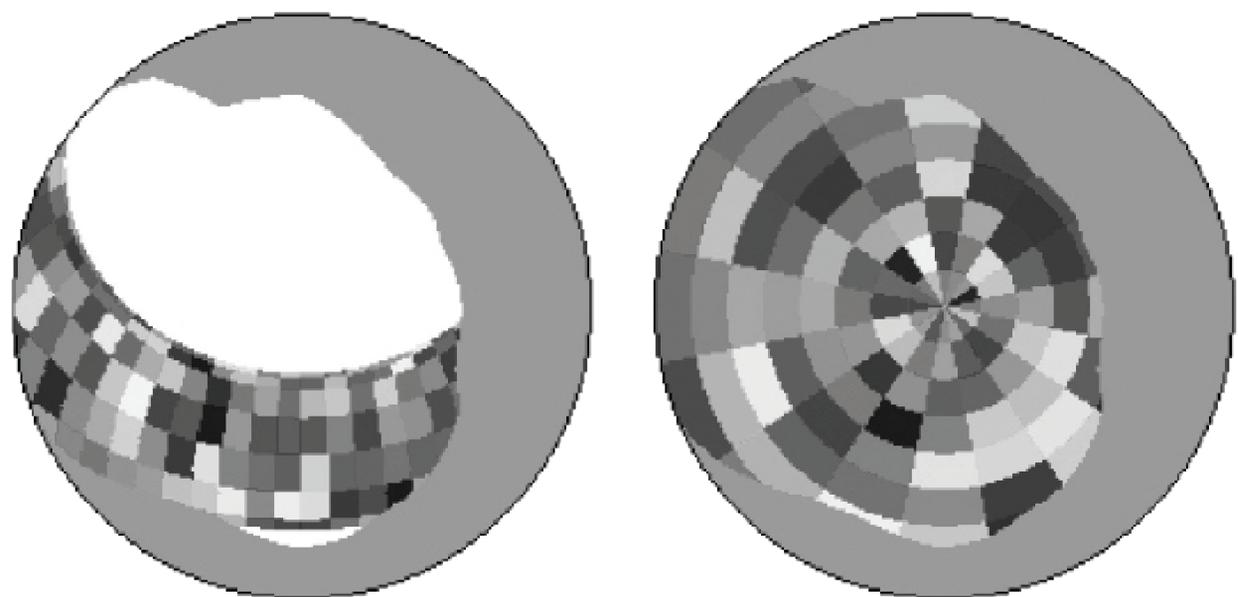
Fig. 5. La figura mostra il calcolo del profilo (o linea) dell'orizzonte per una cella del DEM. Gli angoli orizzontali sono calcolati lungo uno specificato numero di direzioni (figura a sinistra) ed utilizzati per creare una rappresentazione emisferica del cielo. Il risultante profilo indica quali parti dell'orizzonte sono ostruite (parte in grigio nella figura centrale) e quali parti sono libere (parti in bianco). Nella figura a destra lo stesso orizzonte fotografato con un obiettivo *fish-eye*. FU e RICH (2000), modificato.

- 3 effetti di penombra: gli effetti di penombra si riferiscono alla decresciuta radiazione dei raggi diretti al margine dell'ombra a causa del parziale oscuramento del disco solare;
- 4 calcolo della mappa celeste: la radiazione solare diffusa può originarsi da qualsiasi direzione del cielo. Le mappe del cielo sono mappe *raster* (cioè una griglia a maglie quadrate dove ogni quadrato rappre-

- senta una parte della volta celeste) costruite dividendo il cielo in una serie di settori celesti definiti da divisioni zenitali ed azimutali (Fig. 6);
- 5 sovrapposizione della linea dell'orizzonte con le mappe solari e celesti: la linea dell'orizzonte viene sovrapposta sulla mappa solare e su quella celeste per rendere possibile il calcolo delle radiazioni dirette e diffuse ricevute da ogni direzione del cielo (Fig. 7);



**Fig. 6.** A sinistra la mappa solare: ogni settore colorato rappresenta la posizione del sole ad intervalli di ½ ora nell'arco del giorno e gli intervalli mensili nel corso di un anno dal solstizio d'inverno al solstizio d'estate (l'immagine è nella stessa proiezione emisferica del profilo dell'orizzonte). A destra la mappa celeste: ogni colore rappresenta un settore del cielo dal quale si origina la radiazione diffusa (nell'esempio 8 divisioni zenitali e 16 divisioni azimutali). FU e RICH (2000), modificato.



**Fig. 7.** Sovrapposizione del profilo dell'orizzonte con la mappa solare e la mappa celeste. FU e RICH (2000), modificato

la frazione di cielo libero (l'area di cielo non ostruita in ogni settore della mappa celeste o solare) viene calcolata dividendo il numero di celle non ostruite per il numero totale di celle del singolo settore.

Per i calcoli della radiazione solare si utilizzano formule classiche riportate in letteratura (cfr. FU e RICH, 2000)

Con questo procedimento è stata confrontata la radiazione ricevuta da un tratto del fiume Sieve simulando, tramite modellazione della vegetazione riparia nel DEM, diverse altezze e larghezze del buffer vegetazionale (cfr. tabella IV).

## RISULTATI

### Il modello Xiang-Phillips

Dal momento che per la zona in studio non erano disponibili dati sulla permeabilità e sulla capacità in acqua disponibile, sono state comunque eseguite a) un'analisi della sensitività del modello ricorrendo ad una serie di simulazioni che hanno comportato la variazione di un parametro alla volta della *b-function* fra due estremi (assegnati rispettivamente a delle ipotetiche rive destra e sinistra), uguagliando poi i restanti parametri a quelli del buffer di riferimento (Tab. III) e b) una simulazione su GIS cercando di assegnare parametri, il più verosimili possibile (previa consultazione con un geologo ed un pedologo), utilizzando le informazioni riportate sulla carta litotecnica scaricabile dal sito internet dello Sportello Cartografico della Regione Toscana. Nell'analisi di sensibilità sono stati utilizzati i seguenti valori: per la conducibilità idraulica è stato assegnato un valore minimo di 0,03 cm/h per le argille ed un valore massimo di 11,78 cm/h per la sabbia; per

la capacità in acqua disponibile un minimo di 1 cm ed un massimo di 40 cm; per la pendenza un minimo dello 0,1% ed un massimo del 50%; per il coefficiente di Manning si è scelto un valore minimo di 0,05 per i campi a maggese (senza residui) ed un massimo di 0,80 per boschi con sottobosco denso (CHOW, 1959). Guardando alla tabella III risulta subito evidente che la sensitività del modello è assai ridotta rispetto alla conducibilità idraulica e alla pendenza (un incremento della *K* di 392,6 volte comporta un incremento della larghezza del buffer di sole 3,3 volte; un aumento di *s* di 500 volte comporta un incremento della larghezza del buffer di sole 8,4 volte), mentre è elevata rispetto a *C* e al coefficiente di Manning *n* (un incremento di *C* di 40 volte comporta un incremento della larghezza del buffer di 6,3 volte; un incremento di *n* di 16 volte comporta un incremento della larghezza del buffer di 2,3 volte). A tal proposito si rimanda all'ultima colonna della tabella, dove il quoziente tra i rapporti delle variazioni (ultima colonna della tabella) illustra chiaramente il grado di sensitività (sensitività crescente al decrescere del valore di tale rapporto).

Per quanto riguarda i risultati dell'analisi con il GIS i valori per i parametri di conducibilità idraulica e capacità in acqua disponibile sono stati assegnati come riportato in tabella IV.

I valori per il coefficiente di Manning sono stati assegnati secondo le definizioni di CHOW (1959) al CORINE *Landcover* di terzo livello come riportato in tabella V.

La pendenza è stata ricavata dal DEM grazie ad un apposito strumento del GIS. I risultati dati dall'algoritmo *Cost Distance* sono riportati nella figura 8. Si noti che dalla modellizzazione delle pendenze con il GIS

Tab. III. Variazione dei parametri della *b-function* fra intervalli estremi.

Parametro analizzato	Riva	$K_b$ (cm/h)	$C_b$ (cm)	$s_b$ (%)	$n_b$	$B_{wi}$ (m)	$R_p = P_{max}/P_{min}$	$R_B = B_{max}/B_{min}$	$R_p/R_B$
Con parametri uguali al buffer di riferimento	DX	3,30	17,07	6	0,41	36	1	1	1
	SX	3,30	17,07	6	0,41	36			
K	DX	11,78	17,07	6	0,41	28	392,6	3,3	119
	SX	0,03	17,07	6	0,41	93			
C	DX	3,30	40,0	6	0,41	24	40	6,3	6,3
	SX	3,30	1,0	6	0,41	150			
s	DX	3,30	17,07	0,1	0,41	9	500	8,4	59,5
	SX	3,30	17,07	50	0,41	76			
n	DX	3,30	17,07	6	0,80	30	16	2,3	7
	SX	3,30	17,07	6	0,05	68			

$B_{wi}$  = larghezza che il buffer dovrebbe raggiungere per avere un'efficienza pari a quella di riferimento (36,27m);  $P_{max}$  e  $P_{min}$  = valori massimo e minimo (sulle due sponde) del singolo parametro analizzato;  $B_{max}$  e  $B_{min}$  = valori massimo e minimo assunti da  $B_{wi}$  al variare dei valori estremi dei singoli parametri.

alcune zone risultavano essere a pendenza zero ma nella (1) nessun parametro al denominatore può assumere di per sé il valore zero per una questione matematica, per cui si sono fatte tre simulazioni sostituendo alle aree con valore 0 % i seguenti valori: 0,001 % ; 0,1 %; 1 %.

### La radiazione solare

Riguardo all'analisi della radiazione solare, il confronto tra i tratti è basato sul calcolo della radiazione globale per tutta la giornata del solstizio d'estate (Tab. VI). I valori sono stati espressi in Wh/m<sup>2</sup>. Per ottenere i Wh/m<sup>2</sup> medi per il tratto è stata adottata la seguente formula:

$$VM = \frac{\sum vcr}{s} \quad (2)$$

dove:

VM = valore medio per il tratto considerato (Wh/m<sup>2</sup>);

v = valore della radiazione globale (Wh/m<sup>2</sup>);

c = numero di celle a cui è assegnato un certo valore;

r = area di una cella (m<sup>2</sup>);

s = superficie del tratto considerato (m<sup>2</sup>).

**Tab. V.** Coefficienti di scabrezza di Manning (n) assegnati agli usi del suolo CORINE *Landcover*.

Codice CORINE	Descrizione	n
231	Prati stabili	0,15
242	Sistemi colturali e particelle complesse	0,12
311	Boschi di latifoglie	0,7
324	Aree a vegetaz. boschiva e arbustiva in evoluz.	0,8

**Tab. IV.** Valori di conducibilità idraulica in condizione saturata (Ks) e capacità in acqua disponibile (C) dedotti dalle definizioni della carta litotecnica della Regione Toscana.

NOME	LITOTECNICA	TIPOLOGIA LITOLOGICA	PERMEABILITÀ	TIPOLOGIA PERMABILITÀ	Ks (cm/h)	C (cm/m)
ARENARIE DI MONTE SENARIO	Materiale lapideo plurilitologico stratificato fratturato	LITOTIPI COERENTI	media	SECONDARIA (per fratturazione e/o carsismo)	4	8,1
ARGILLE E CALCARI	Unità pre-neogeniche prevalentemente argillose; terreni eterogenei ad assetto caotico	LITOTIPI SEMICOERENTI	da bassa a molto bassa	SECONDARIA (per fratturazione e/o carsismo)	0,12	18,8
Deposito alluvionale	Materiale granulare sciolto o poco addensato a granulometria non definita	LITOTIPI INCOERENTI	media	PRIMARIA (per porosità)	4	8,1
Deposito colluviale e eluviale	Materiale granulare sciolto o poco addensato a prevalenza fine	LITOTIPI INCOERENTI	medio-bassa	PRIMARIA (per porosità)	1,25	13,5
Deposito di frana in evoluzione	Materiale detritico eterogeneo ed eterometrico (depositi di versante s.l.)	LITOTIPI INCOERENTI	medio-bassa	PRIMARIA (per porosità)	1,25	13,5
Deposito di frana quiescente	Materiale detritico eterogeneo ed eterometrico (depositi di versante s.l.)	LITOTIPI INCOERENTI	medio-bassa	PRIMARIA (per porosità)	1,25	13,5
MARNE DI VICCHIO	Materiale coesivo sovraconsolidato	LITOTIPI SEMICOERENTI	da bassa a molto bassa	SECONDARIA (per fratturazione e/o carsismo)	0,12	18,8
Membro di Montalto	Materiale lapideo plurilitologico stratificato fratturato	LITOTIPI COERENTI	medio-bassa	SECONDARIA (per fratturazione e/o carsismo)	1,25	13,5
olistostroma	Unità pre-neogeniche prevalentemente argillose; terreni eterogenei ad assetto caotico	LITOTIPI SEMICOERENTI	impermeabile	impermeabile	0,008	25
Sub-sistema di Luco di Mugello	Materiale granulare sciolto o poco addensato a prevalenza grossolana	LITOTIPI INCOERENTI	medio-alta	PRIMARIA (per porosità)	9	4,9
Sub-sistema di Sagginale	Materiale granulare sciolto o poco addensato a prevalenza grossolana	LITOTIPI INCOERENTI	alta	PRIMARIA (per porosità)	18,5	4,4

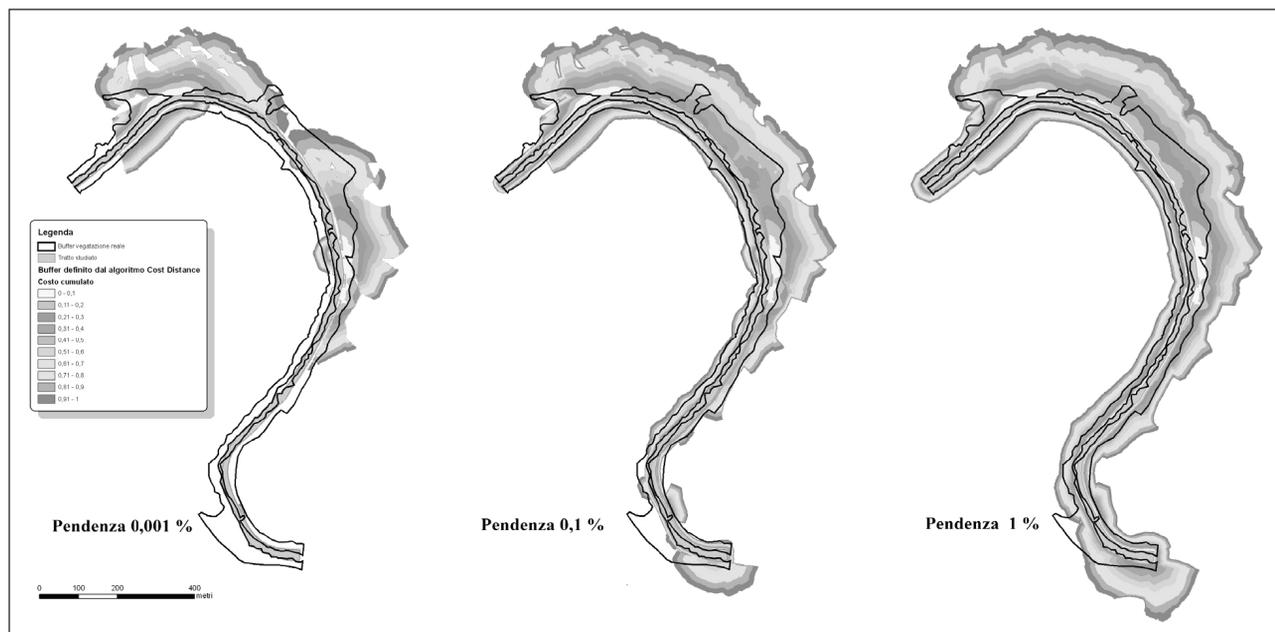


Fig. 8. I buffer delineati per il tratto di fiume utilizzando l’algoritmo *cost distance* sostituendo alla pendenza 0 i valori di 0,001 %, 0,1 % e 1 %; gli altri valori (K, C ed *n*) sono quelli riportati nelle tabelle IV e V.

Come prevedibile, il massimo della radiazione lo si ha con un buffer assente (5932 Wh/m<sup>2</sup>, figura 9) mentre le variazioni (diminuzioni) più grosse si hanno non tanto con l’aumentare della larghezza del buffer (valori simili per buffer di uguale altezza ma con diversa larghezza) quanto con l’aumentare della sua altezza (si passa da una diminuzione della radiazione solare di poco più del 7 % per un buffer alto 3 m fino ad una diminuzione quasi del 25 % per un buffer alto 10 m).

**DISCUSSIONE E CONCLUSIONI**

La seguente discussione ha come scopo l’analisi tecnica dei due descrittori numerici; il loro utilizzo ai fini della progettazione/gestione fluviale è un’opportunità da verificare e comunque da combinare con il complesso delle altre succitate verifiche (qualità degli habitat, tempi di ritorno, ecc.) da effettuare.

**La radiazione solare**

Dall’analisi della radiazione solare tramite modellazione della vegetazione nel DEM è risultato che la vegetazione realmente presente –delineata tramite fotointerpretazione ed alla quale è stata assegnata una altezza media di 10 m– è meno efficiente di un buffer teorico di pari altezza ma di larghezza costante su entrambe le rive: in questo caso sarebbe sufficiente ‘colmare’ le interruzioni nella continuità del buffer vegetato ed eventualmente ‘allargarlo’ nei punti in cui risulta di larghezza esigua (cfr. figura 1).

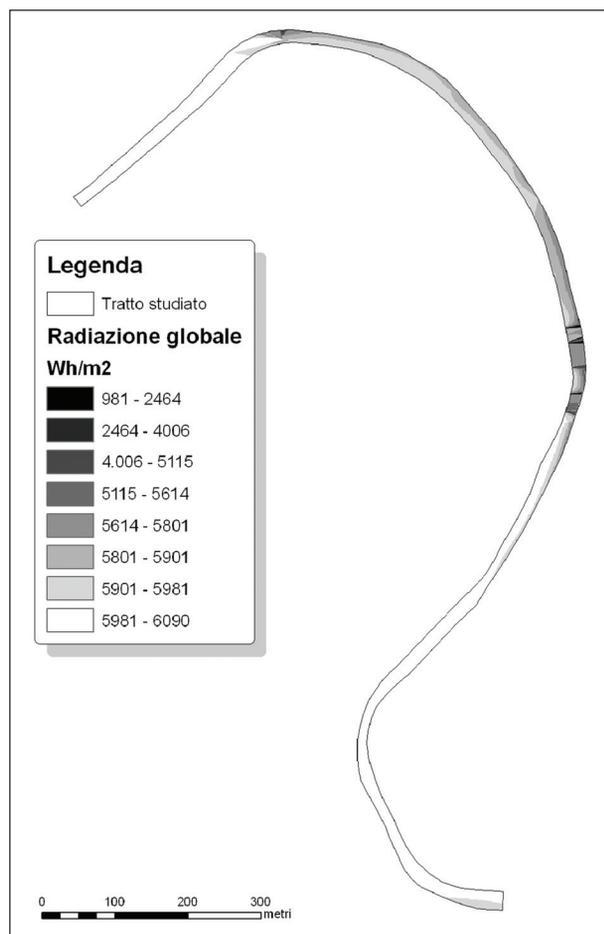
I valori di radiazione solare (diretta, diffusa e globale) e la durata in ore di illuminazione (radiazione) diretta, ottenuti con il *Solar Analyst* possono quindi risultare assai utili per:

- valutare la priorità di ricostituzione del buffer vegetazionale per interi settori fluviali nell’ottica del controllo della temperatura dell’acqua e della eccessiva crescita algale;
- valutare l’effetto delle diverse altezze della vegetazio-

Tab. VI. I risultati del *Solar Analyst* (radiazione globale media per il tratto considerato) con simulazione di altezze e larghezze diverse del buffer vegetazionale. Valore medio in Wh/m<sup>2</sup> per il tratto per il solstizio d’estate.

Larghezza (m)	Altezza (m)		
	0	3	10
0	5932	-	-
3	-	5497 (-7,3 %)	4477 (-24,5 %)
25	-	5485 (-7,5 %)	4464 (-24,7 %)
Variabile (buffer reale digitalizzato da foto aerea)	-	-	4723 (-20,4 %)

Larghezza: larghezza trasversale al fiume (su entrambe le rive) del buffer vegetazionale (0 m, 3 m, 25 m); Altezza: altezza media ipotizzata del buffer vegetazionale (0 m, 3 m, 10 m). Valori espressi in Wh/m<sup>2</sup> (radiazione globale media per il tratto considerato). In parentesi la diminuzione percentuale di radiazione rispetto alla situazione con buffer assente (5932 Wh/m<sup>2</sup>).



**Fig. 9.** La radiazione solare globale (in Wh/m<sup>2</sup>) per il tratto studiato al solstizio d'estate nella simulazione con vegetazione completamente assente.

ne di sponda sulla quantità di radiazione solare (in particolar modo quella diretta) ricevuta da una certa area di fiume;

- valutare l'effetto sulla quantità di radiazione solare ricevuta da un tratto di fiume prima e dopo operazioni di taglio della vegetazione riparia.

È interessante precisare che queste analisi potrebbero essere condotte paragonando, invece della media dei Wh/m<sup>2</sup> ricevuti dall'area di fiume interessata, la media delle ore di insolazione diretta. Un limite comune ad entrambi i tipi di analisi è dato dalla mancata computazione dell'effetto ombreggiante della parte di chiome insistente sull'alveo (che non è possibile incorporare in un modello digitale del terreno) cui si aggiunge il problema relativo al passaggio (e conseguente riflessione) della luce attraverso i tronchi, i rami e le foglie: la scarsa differenza nella diminuzione della radiazione solare per buffer con la stessa altezza ma con larghezze diverse è da imputare molto probabilmente a quest'ultimo problema.

Un ulteriore fattore di cui bisogna tenere conto è il riscaldamento delle acque iporreiche che alimentano lateralmente il fiume: la vegetazione ha, tramite l'ombreggiamento e l'evapotraspirazione, un effetto 'rinfrescante' su queste acque di cui si può tenere conto computando la radiazione solare ricevuta dal territorio circostante al corso d'acqua.

Si avverte di conseguenza la necessità di una implementazione del *Solar Analyst* con l'aggiunta di misure rilevate in campo per mezzo di solarimetri o tramite la misurazione della *Angular Canopy Density* (ACD)<sup>1</sup>, al fine di introdurre fattori di correzione da applicare alla radiazione globale.

Applicazioni di certo non secondarie possono essere date dall'elaborazione di un modello in grado di utilizzare i dati ottenuti sulle radiazioni per calcolarne l'effetto sulla temperatura dell'acqua, oppure di sfruttarne le potenzialità in studi di più generale respiro ecologico.

### La delineazione dei buffer

Nella simulazione sul tratto di fiume si è notato che nella realtà difficilmente i parametri utilizzati dal modello assumono un valore zero, fatta eccezione per la pendenza. Il caso di un valore di pendenza uguale a zero comporterebbe infatti nella *b-function* un'operazione matematicamente impossibile (valore diviso 0), problema risolto nella presente simulazione assegnando pendenze 'fittizie' prossime allo zero ma comunque superiori a questo valore limite (cfr. figura 8). Un'ulteriore difficoltà si riscontra nel caso di pendenze con valori prossimi allo zero, che determinano larghezze del buffer molto esigue (ad es. solo 9 m per una pendenza dello 0,1%; cfr. tabella III), con conseguenze significative sul piano prettamente ecologico: il buffer, infatti, per svolgere al meglio le sue funzioni (ad esempio fornire gli habitat per la fauna selvatica od influire sulla temperatura dell'aria) deve essere un ecosistema a sé stante con un proprio microclima. Si noti infatti che per gli altri parametri (*C*, *K*, *n*) la larghezza minima del buffer varia da 24 a 30 m, larghezze minime che, in letteratura, sono spesso considerate perlomeno sufficienti.

(1) L'ACD è la percentuale di chiome (o altri oggetti ombreggianti) coprenti la parte di cielo che è attraversato dal sole fra le ore 10.00 e le ore 14.00 (ora solare locale). L'ACD di Agosto per un determinato punto è la percentuale di tempo (per le quattro ore considerate, in una giornata senza nuvole) durante il quale resta in ombra. Per esempio se un punto su un torrente resta in ombra per tutte e quattro le ore in Agosto, il suo ACD di Agosto è 100, se resta sempre in luce ACD = 0. L'ACD media per un tratto di fiume viene stimata campionando per tutta la sua lunghezza e la larghezza. Cfr. BRAZIER e BROWN (1973), WOOLDRIDGE e STERN (1979) e BESCHTA *et al.* (1987).

Un'altra grossa difficoltà consiste nel fatto che numerosi studi hanno dimostrato che le proprietà sia fisico-chimiche (tessitura, densità apparente, contenuto in sostanza organica) che idrauliche (ritenzione idrica e conducibilità idraulica) dei suoli sono irregolarmente distribuite sul territorio e soltanto accurati rilevamenti (alquanto onerosi per quanto riguarda le proprietà idrauliche), consentono di descrivere questa variabilità (BURROUGH, 1993). La soluzione, almeno parziale, di questi problemi potrebbe venire dall'applicazione di nuove tecniche geostatistiche (cfr. ROMA-

NO, 2000) o dall'utilizzo di funzioni di *pedotransfer* cioè metodi indiretti per la stima delle proprietà fisico-idrologiche dei suoli (UNGARO e CALZOLARI, 2000).

Pur ritenendo valido tale approccio metodologico per la creazione di un buffer a larghezza variabile (determinato in modo scientifico e tenente conto delle specifiche caratteristiche del territorio) si auspica comunque un ulteriore sviluppo e/o modifica della *b-function* affinché essa integri ulteriori parametri correlati anche ad altre funzioni basilari dei buffer (oltre a quella di filtrazione degli inquinanti).

## BIBLIOGRAFIA

- ADRIAENSEN F., CHARDON J.P., DE BLUST G., SWINNE E., VILLALBA S., GULINCK H., MATTHYSEN E., 2003. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, **99**: 1-15.
- BESCHTA R. L., 1984. TEM84: a computer model for predicting stream temperatures resulting from the management of streamside vegetation. *Report WSDG-AD-00009*, USDA Forest Service Watershed Systems Development Group, Fort Collins, CO, 76 pp.
- BESCHTA R. L., BILBY R. E., BROWN G. W., BLAIR HOLTBY L., HOFSTRA T. D., 1987. Stream temperature and aquatic habitat: fisheries and forestry interactions. In: Cundy T. W. and Salo E. O. (eds.). *Streamside Management: Forestry and Fishery Interactions*. Atti Conf. University of Washington. Febbraio 1986. Institute of Forest Resources, Contributo no. 57, 191-232.
- BRAZIER J. R., BROWN G. W., 1973. Buffer Strips for Stream Temperature Control. Research Paper 15. Forest Research Laboratory. Oregon State University, Corvallis. 9p.
- BROWN G. W., KRYGIER J. T., 1970. Effects of clear-cutting on stream temperature. *Water Research*, **6**: 1133-1139.
- BURROUGH, P. A.; 1993. Soil variability: a late 20<sup>th</sup> century view. *Soils and Fertilizers*, **56**: 529-562.
- CHOW V. T., 1959. *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw-Hill, New York.
- DUNSTER, J., DUNSTER K., 1996. *Dictionary of natural resource management*. University of British Columbia.
- ESRI 2004, *ArcGis 9 – Using ArcGis Spatial Analyst*, ESRI Press: 126-132.
- NARUMALANI S., ZHOU Y., JENSEN J. R., 1997. Application of remote sensing and geographic information systems to the delineation and analysis of riparian buffer zones. *Aquatic Botany*, **58**: 393-409.
- HOFIERKA J., SURI M., 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: Proceedings of the "Open Source GIS – GRASS users conference", Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- PHILLIPS J. D., 1989. Evaluation of North Carolina's estuarine shoreline area of environmental concern from a water quality perspective. *Coastal Management* **17**: 103-117.
- FU P., RICH P. M., 2000. *The Solar Analyst 1.0 – User Manual*. Helios Environmental Modeling Institute, 48 pp.
- ROMANO N., 2000. Applicazione di tecniche geostatistiche per la caratterizzazione idraulica dei suoli. *Rivista di Ingegneria Agraria*, **4**: 87-102.
- SPAROVEK G., LIMA RANIERI S. B., GASSNER A., CLERICE DE MARIA I., SCHUNG E., FERREIRA DOS SANTOS R., JOUBERT A., 2002. A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **90**: 169-175.
- STANFORD J. A., WARD J. V., ELLIS B. K., 1994. Ecology of the Alluvial Aquifers of the Flathead River, Montana. In: Gibert J., Danelpool D. L., Stanford J. A. (eds.), *Groundwater Ecology*. Academic Press, San Diego (CA): 367-390.
- TABACCHI E., CORRELL D. L., HAUER R., PINAY G., PLANTY-TABACCHI A.-M., 1998. Development, maintenance and role of riparian vegetation in the river landscape. *Freshwater Biology*, **40**: 497-516.
- UNGARO F., CALZOLARI C., 2000. Integration of GIS derived soil information with geostatistical estimation of pedotransfer functions inputs for soil modelling applications. In: Proceedings of the "4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences", Amsterdam, 12-14 July 2000, 663-670.
- VOUGHT L. B.-M., PINAY G., FUGSLANG A., RUFFINONI C., 1995. Structure and function of buffer strips from a water quality perspective in agricultural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, **31**: 323-331.
- WOOLDRIDGE D. D., STERN D., 1979. Relationships of Silvicultural Activities and Thermally Sensitive Forest Streams. Report DOE 79-5a-5, College of Forest Resources, University of Washington, 90 pp.
- XIANG W.-N., 1993. A GIS method for riparian water quality buffer generation, *International Journal of Geographical Information Systems* **7(1)**: 57-70.