



Università di Camerino
Scuola di Scienze e Tecnologie
Sezione di Geologia

LA SORGENTE DI FOCE DI MONTEMONACO



Prof. Marco Materazzi

Collaboratori:

Dott.ssa Margherita Bufalini

Dott. Francesco Lampa

1 Caratteristiche della sorgente e dell'impianto di captazione

La sorgente di Foce di Montemonaco emerge in sinistra idrografica del fiume Aso, poco a valle dell'abitato di Foce di Montemonaco.



Figura 1 – La sorgente di Foce di Montemonaco: in alto (a sinistra e a destra) ubicazione dell'opera di captazione; in basso a sinistra particolare dell'ingresso dell'opera di captazione, a destra particolare dell'interno dell'opera stessa.

All'opera di captazione si accede attraverso un piccolo edificio situato subito a lato della strada che collega l'abitato di Foce di Montemonaco con i paesi più a valle (Fig.1).

L'opera di captazione vera e propria è costituita da due sistemi di gallerie (galleria Orsini e galleria Rozzi) realizzate in epoche diverse e che, con direzione SSW a partire da una quota iniziale di circa 940m, sono state scavate alla base del rilievo di Palazzo Borghese (Fig.2). Dalle due gallerie di captazione, si origina una terza galleria di eduazione che prosegue verso valle per circa 550m fino all'inizio della tubazione dell'acquedotto.

Dal punto di vista quantitativo, la sorgente ha subito degli importanti sconvolgimenti a seguito della sequenza sismica che ha interessato l'Italia centrale a partire dal 24 agosto del 2016. Tali sconvolgimenti hanno prodotto una progressiva quanto eccezionale diminuzione della portata sorgentizia che solamente negli ultimi due anni (2020 e 2021) sembra aver raggiunto un andamento stabile.

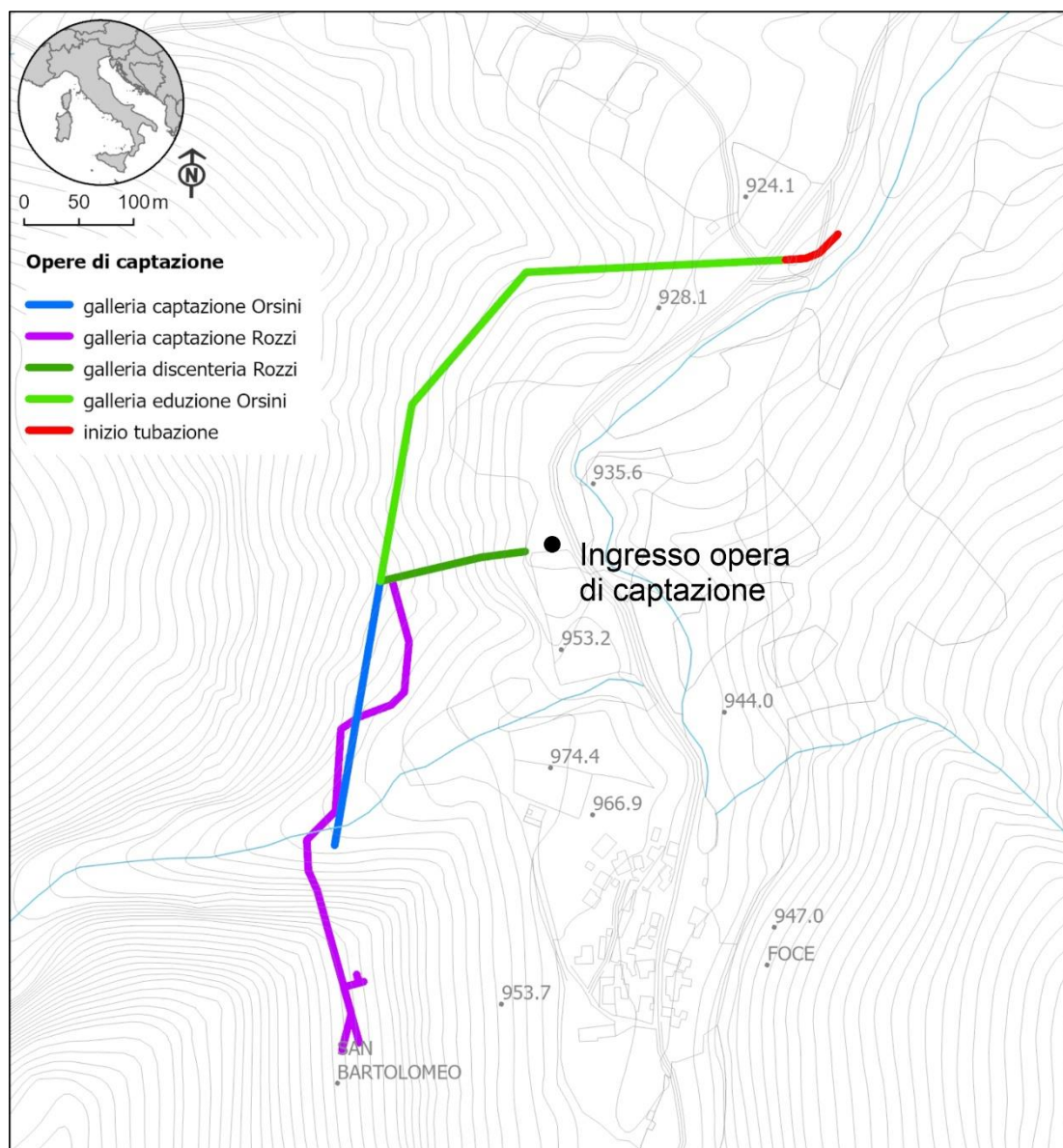


Figura 2 – Rappresentazione schematica dell'andamento delle opere di captazione (gallerie drenanti e di eduazione) della sorgente di Foce di Montemonaco (Fonte: CIIP S.p.A).

Pertanto, sulla base dei dati forniti dal gestore (C.I.I.P. S.p.A.) relativamente alle stagioni 2020-2021, è possibile attribuire alla sorgente una portata media di circa 155 l/s, valore che colloca la sorgente stessa all'interno della classe 3 secondo la classificazione di Meinzer (Fig.3). Utilizzando gli stessi dati è stato possibile anche effettuare una valutazione della variabilità del regime utilizzando lo SCVP (Spring Coefficient of Variation Parameter), ovvero il rapporto fra la deviazione standard e il valore di portata media della sorgente. Il grado di variabilità del regime di portata della sorgente può essere definito sulla base dei seguenti range di valori dell'SCVP:

SCVP	Variabilità del regime di portata
<20%	bassa
20-40%	media

40-100%	alta
100-150%	molto alta
>150%	estremamente alta

Il valore ottenuto del 21% colloca la sorgente di Foce di Montemonaco nella zona di transizione fra variabilità bassa e media, a testimonianza di un'emergenza caratterizzata da una buona stabilità delle portate durante tutto l'anno idrologico.

Classificazione delle sorgenti secondo Meinzer (1927)		
Classe	Portata minima annua	
	m3/sec	l/sec
1	> 10	>10000
2	da 10 a 1	da 10000 a 1000
3	da 1 a 0,1	da 1000 a 100
4	da 0,1 a 0,01	da 100 a 10
5	da 0,01 a 0,001	da 10 a 1
6	da 0,001 a 0,0001	da 1 a 0,1
7	da 0,0001 a 0,00001	da 0,1 a 0,01
8	< 0,00001	< 0,01

Figura 3 – Classificazione delle sorgenti secondo Meinzer.

2 Caratteri idrogeologici

La sorgente di Foce di Montemonaco emerge, come detto, ad una quota di circa 940m s.l.m. nella zona di testata del bacino del fiume Aso, alla base del versante orientale costituito dai rilievi di Palazzo Borghese e Monte Argentella. L'area in esame costituisce l'estrema porzione sud-orientale del Massiccio dei Monti Sibillini, che termina con il rilievo del Monte Vettore (2476m s.l.m.), il più alto di questo settore dell'Appennino centrale.

Dal punto di vista stratigrafico, l'area è caratterizzata dalla presenza di litologie prevalentemente calcaree, calcareo-marnose e dolomitiche, appartenenti alla nota Successione Umbro-Marchigiana (Pierantoni et al., 2013 e annessa bibliografia), una serie di ambiente prevalentemente pelagico e di età giurassico-cretacica che va dalla formazione del Calcare massiccio (la più antica affiorante, età Hettangiano-Carixiano p.p.) alla Scaglia rossa (età Turoniano inferiore p.p. – Luteziano p.p.) (Fig.4).

Dal punto di vista geologico-strutturale, il Massiccio dei Monti Sibillini, si inserisce in un contesto caratterizzato da un'associazione di pieghe, a macro e a mesoscala, sovrascorrimenti con associati splay-thrust, e faglie di tipo prevalentemente dip-slip e/o trasversive, tipiche di questo settore dell'Appennino centrale. L'andamento di queste strutture (prevalentemente NNW-SSE e N-S) mostra una chiara vergenza orientale, risultato di una fase tettonica compressiva di età neogenica che ha prodotto la sovrapposizione dei termini calcarei della Successione umbro-marchigiana, sui più recenti membri emipelagici e terrigeni terziari che caratterizzano le zone pedemontane.

Elementi tettonici fondamentali per la ricostruzione dell'assetto tettonico dell'area sono inoltre rappresentati da faglie normali di età giurassica, che hanno controllato anche lo sviluppo dei paleoambienti e le variazioni di facies e di spessore delle coeve e successive formazioni sedimentarie.

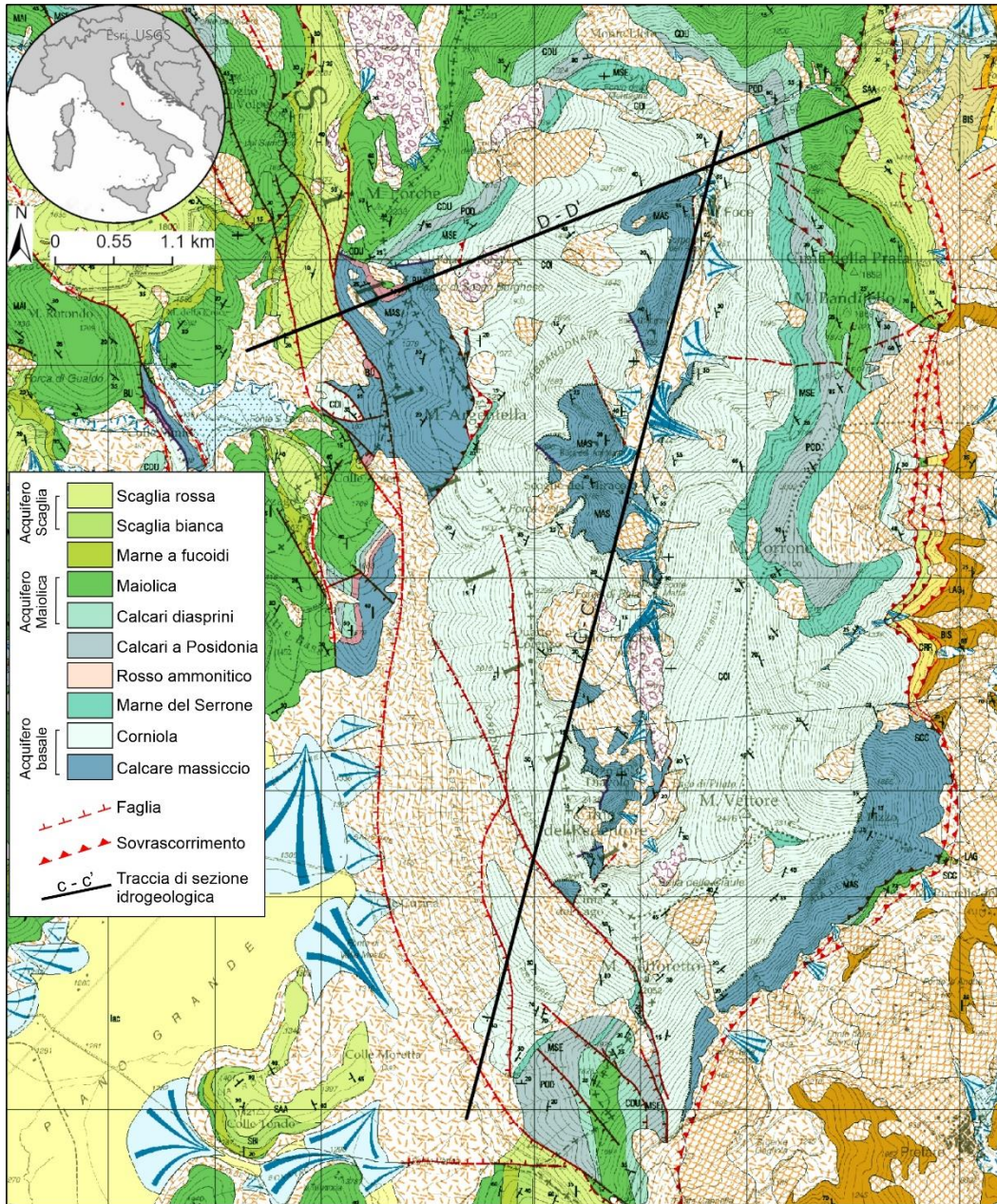


Figura 4 – Carta geologica dell'area di studio (modificata da Pierantoni et al., 2013) con indicazione delle tracce di sezioni idrogeologiche descritte di seguito nel capitolo

Faglie normali quaternarie ad andamento NW-SE e con generale immersione verso SW e faglie trasversali ad alto angolo e ad andamento ENE-WSW, infine, dissecano la struttura plicativa principale. Tutti questi elementi mostrano diverse cinematiche che possono essere associate sia a strutture transpressive, sviluppatesi durante la fase compressiva miocenica, che a strutture transtensive legate probabilmente a riattivazioni durante la fase estensionale quaternaria.

Dal punto di vista idrogeologico la serie calcarea dà origine a tre complessi acquiferi principali:

- l'acquifero basale, il più profondo ed importante dei tre, costituito dalle formazioni del Calcarea massiccio e della Corniola;
- l'acquifero della Maiolica, intermedio, che include la porzione sommitale della formazione dei Calcari diasprini; separato dall'acquifero basale dai livelli prevalentemente marnoso argillosi del Rosso ammonitico e dei Calcari a Posidonia con funzione di acquiclude, in particolari condizioni geologico-strutturali può entrare in contatto idraulico con l'acquifero basale stesso;
- l'acquifero della Scaglia, generalmente più superficiale, limitato alla base dalla formazione prevalentemente marnosa delle Marne a Fucoidi.

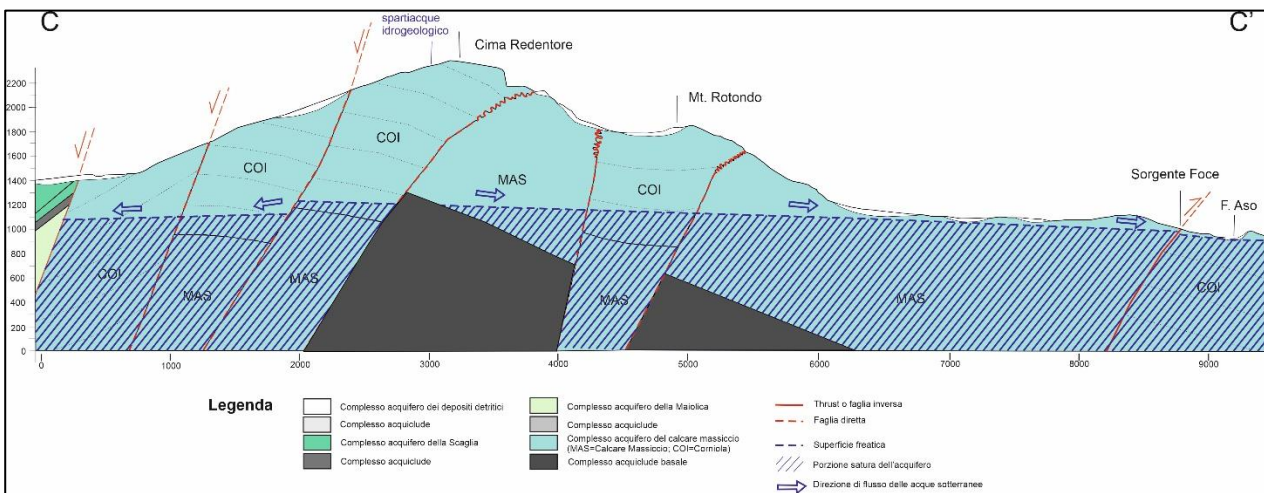


Figura 5 - Sezione idrogeologica orientata circa SSW-NNE estesa dal Piano di Castelluccio alla sorgente di Focce attraverso il rilievo di Cima Redentore

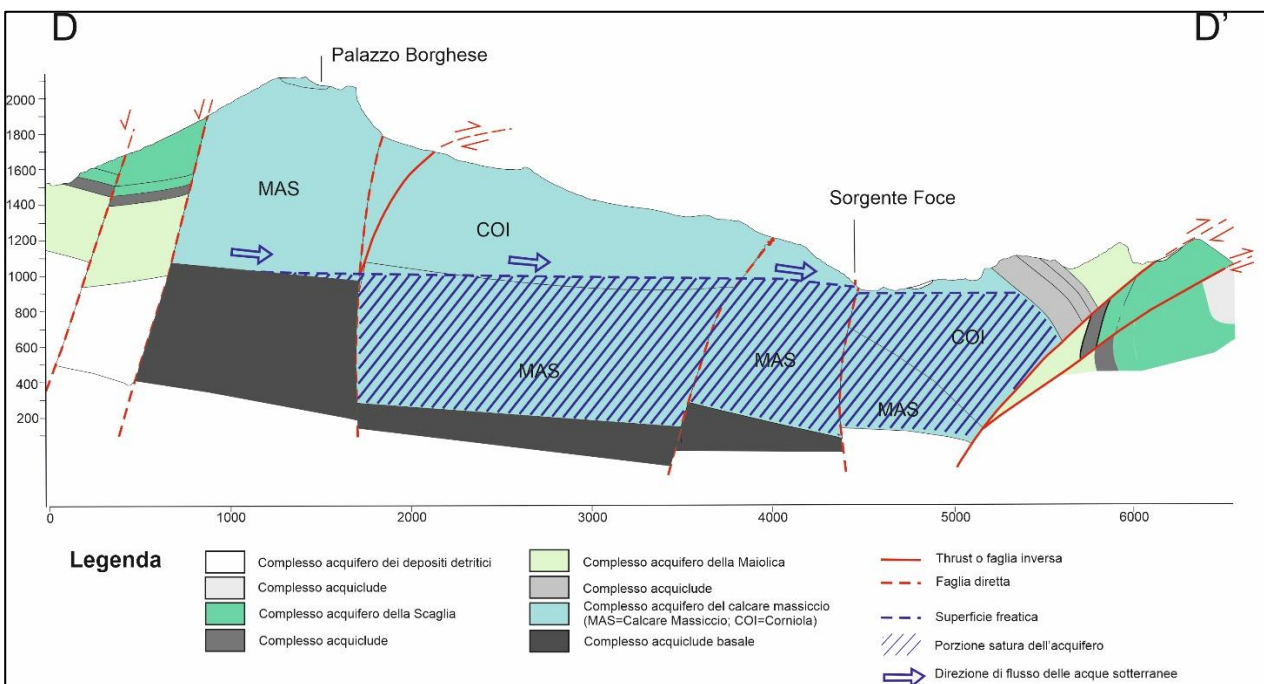


Figura 6 - Sezione idrogeologica orientata circa WSW-ESE estesa dal rilievo di Palazzo Borghese alla sorgente di Focce

Come è possibile notare nei profili idrogeologici C-C' e D-D' (Fig.5 e Fig.6) la sorgente di Foce di Montemonaco emerge e trova il suo areale di ricarica essenzialmente all'interno dell'acquifero basale. La ricarica della sorgente trae origine quasi esclusivamente dai settori meridionale (principalmente) ed occidentale; la quota di saturazione dell'acquifero, a partire da quella sorgentizia di 940m circa, tende ad aumentare verso SSW con un gradiente medio ipotizzato di circa il 20‰; un gradiente inferiore è ipotizzato in direzione di Palazzo Borghese.

Il limite dell'areale di ricarica non è tuttavia di facile identificazione; se da un lato infatti esisterebbe uno spartiacque abbastanza definito sul lato occidentale, coincidente con il contatto tettonico fra l'acquifero basale e quello della Maiolica (Fig.6), la porzione meridionale dell'areale di ricarica presenterebbe uno spartiacque di tipo "dinamico", con una parte di ricarica diretta verso la sorgente di Foce di Montemonaco ed un'altra diretta verso WSW, attraverso il bacino di Castelluccio verso il bacino di Norcia. Tale caratteristica, come verrà descritto in seguito, fornirebbe un'ipotesi plausibile all'eccezionalità degli effetti della sequenza sismica sulla sorgente di Foce.

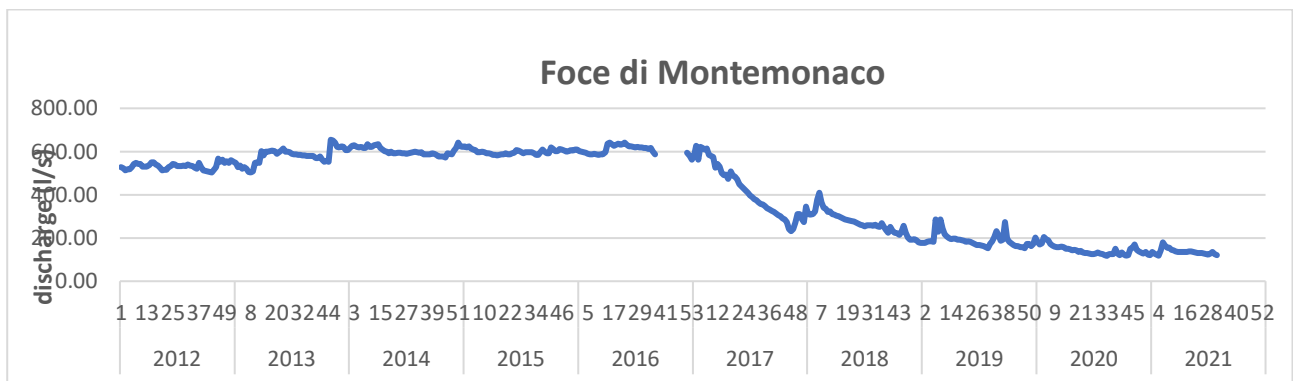


Figura 7 – Andamento delle portate della sorgente di Foce di Montemonaco nel periodo 2012-2021 (fonte CIIP S.p.A.)

Per quanto riguarda il regime idrologico della sorgente (Fig.7), sebbene, come detto, si sia registrata una sostanziale stabilità delle portate anche nelle ultime stagioni, è possibile osservare un netto cambiamento sia nei valori medi che nella distribuzione di frequenza delle stesse (Fig.8 e Fig.9) se riferite al periodo pre-sisma.

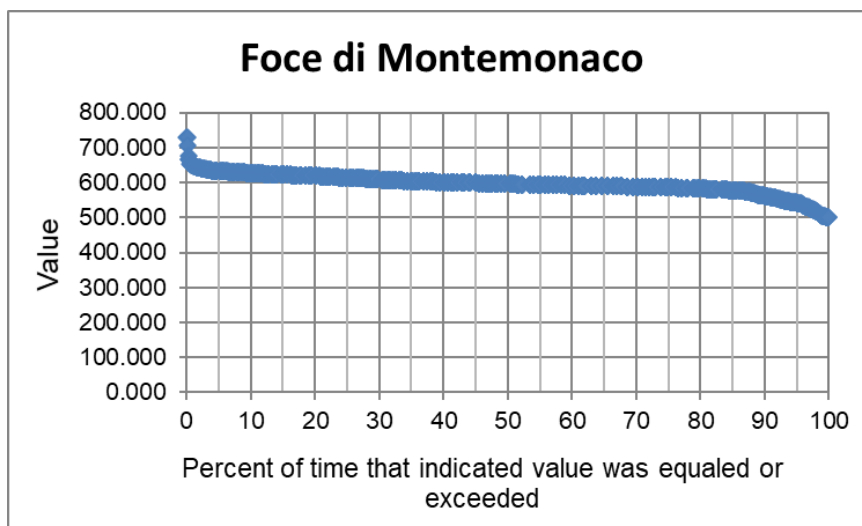


Figura 8 – Curva di durata delle portate della sorgente di Foce di Montemonaco riferita al periodo pre-sisma (2012-2016)

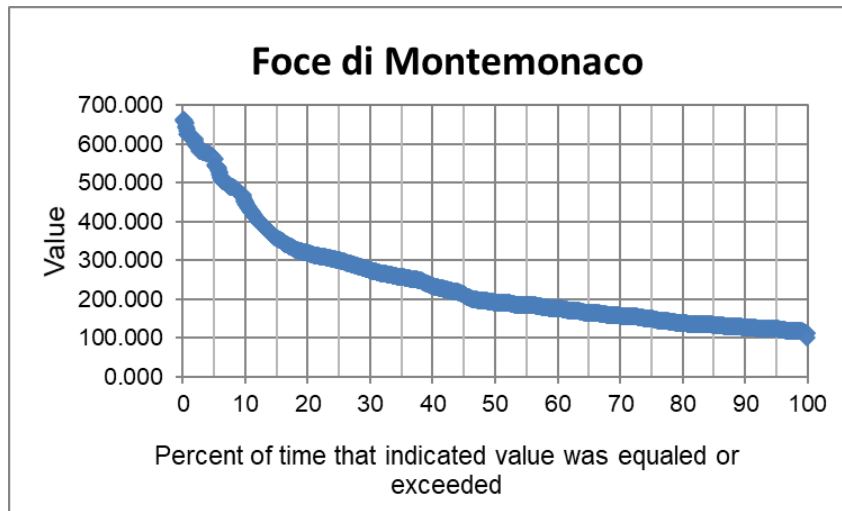


Figura 9 – Curva di durata delle portate della sorgente di Foce di Montemonaco riferita al periodo post-sisma (2017-2021)

Confrontando gli andamenti delle curve di durata della sorgente (al netto dell'evidente riduzione globale dei valori), è possibile notare come nel periodo post-sisma portate sorgentizie elevate (al di sopra dei 300 l/s), persistano solamente per un 10-15% del totale, mentre erano sostanzialmente stabili per quasi tutto l'anno nel periodo pre-sisma. Se poi si osserva l'andamento a partire dal 2019 (quando si è raggiunto un apparente nuovo equilibrio), pur con il limite di un numero statistico inferiore di valori, è evidente un'ulteriore riduzione dei periodi con portate elevate (< 5%, Fig.10).

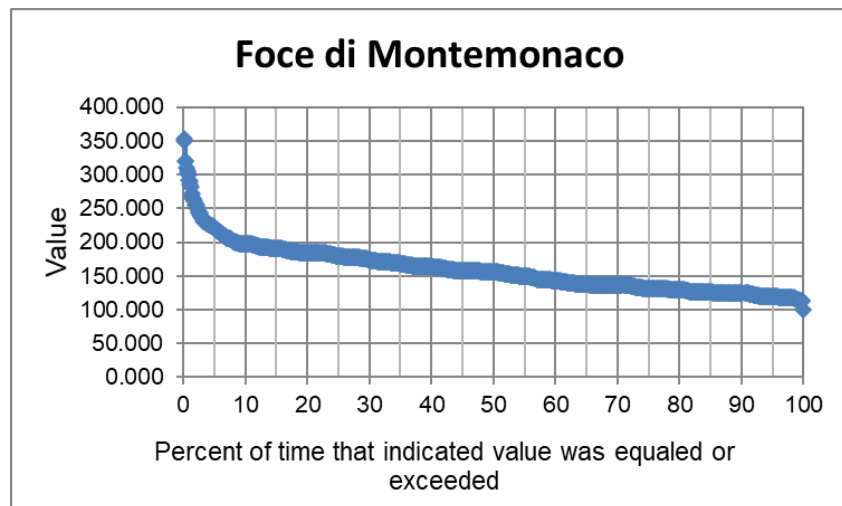


Figura 10 - Curva di durata delle portate della sorgente di Foce di Montemonaco a partire dal mese di gennaio 2019

Un cambiamento nella tipologia dei circuiti di ricarica può essere ipotizzato anche confrontando l'andamento delle curve di recessione delle portate sorgentizie nella fase pre e post sisma. Utilizzando un tool specifico per Microsoft Excel messo a punto in collaborazione con il Prof. Kristijan Posavec del Department of Geology and Geological Engineering dell'Università di Zagabria (Posavec et al., 2017), è stato possibile evidenziare alcuni aspetti importanti e definire nel dettaglio i meccanismi di ricarica del sistema acquifero di Foce.

Il software in questione permette di confrontare più periodi di recessione contemporaneamente e di trovare la curva (e l'equazione caratteristica) che meglio approssima tale andamento (Master Recession Curve – MRC). In aggiunta il tool permette

anche di verificare, all'interno della stessa MRC, l'esistenza di segmenti con diversa pendenza, che testimoniano a loro volta la presenza di circuiti differenti in termini di velocità (differenti sistemi di fratture e/o condotti carsici).

Le MRC's relative alla fase pre e post sisma vengono riportate rispettivamente in Fig.11 e in Fig.12.

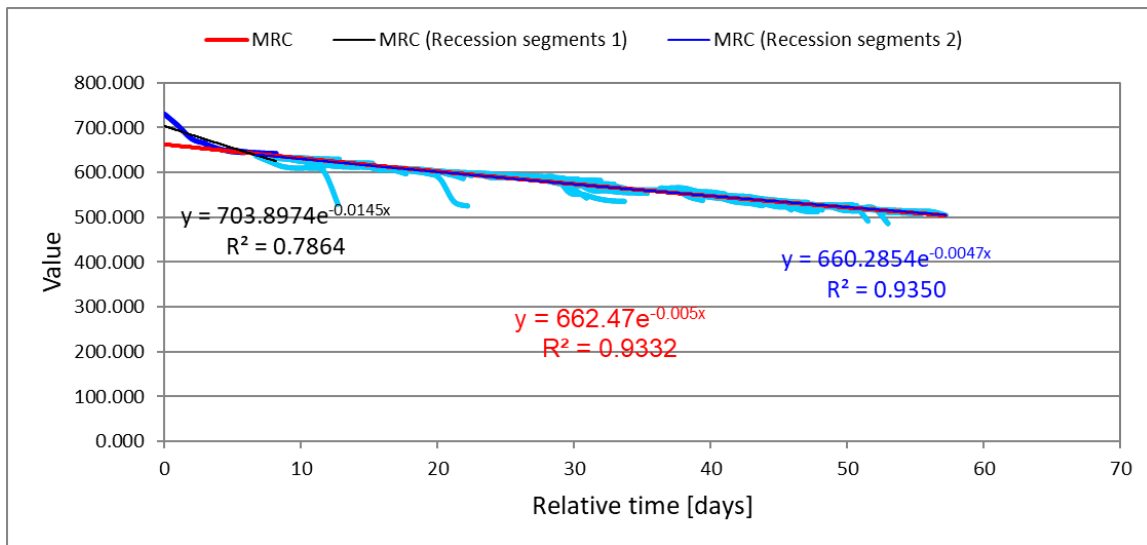


Figura 11 - Master Recession Curves della sorgente di Foce di Montemonaco relative al periodo pre-sisma (2012-2016). I diversi colori indicano le equazioni dei vari tratti: nero, primo tratto; azzurro secondo tratto; rosso, intero segmento.

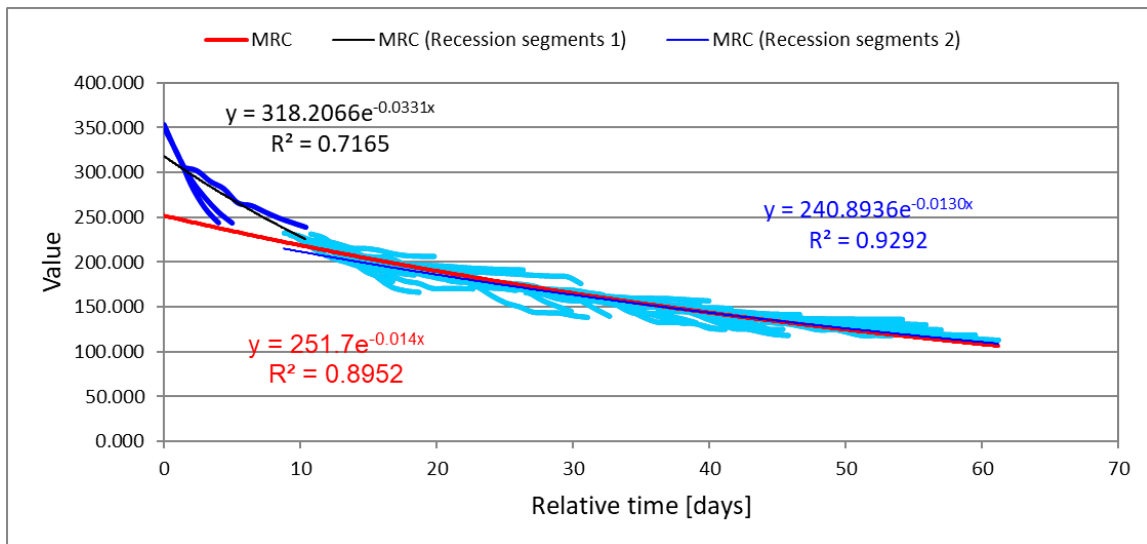


Figura 12 - Master Recession Curves della sorgente di Foce di Montemonaco relative al periodo post-sisma (2019-2020). I diversi colori indicano le equazioni dei vari tratti: nero, primo tratto; azzurro secondo tratto; rosso, intero segmento.

In tutti e due i periodi è possibile riconoscere l'esistenza di due circuiti differenti (evidenziati da due tratti a diversa pendenza; il tratto più pendente indica la presenza di circuiti più "veloci" e spesso coincidenti con la circolazione nella zona non satura (il cosiddetto epicarso) mentre il tratto meno pendente evidenzia la presenza di una circolazione più lenta, associata a sistemi di frattura più "pervasivi").

Tuttavia, dal confronto fra i due grafici, emerge chiaramente una variazione di pendenza (aumento) in ambedue i tratti (evidenziata dall'esponente nell'equazione della recessione, che corrisponde al cosiddetto *coefficiente di recessione* α); nel primo tratto il coefficiente α

passa da 0.0145 a 0.0331 mentre nel secondo tratto si osserva un aumento da 0.0047 a 0.0130. La variazione maggiore (quasi un ordine di grandezza) si registra nel secondo tratto, quello più rappresentativo, a testimonianza di una netta modifica del circuito principale; tale modifica può essere interpretata con una ricarica, nel periodo post-sisma, maggiormente connessa a circuiti superficiali e con una drastica diminuzione del contributo legato ad una circolazione più lenta e profonda.

Tenuto conto di quanto detto e del fatto che attualmente la sorgente sembra aver raggiunto una situazione di apparente equilibrio per quanto riguarda le portate, il bilancio idrologico, funzionale alla successiva definizione delle aree di salvaguardia, è stato calcolato sulla base dei dati (pioggia, temperature, portate) registrati a partire dal mese di gennaio 2019 (Fig.13).

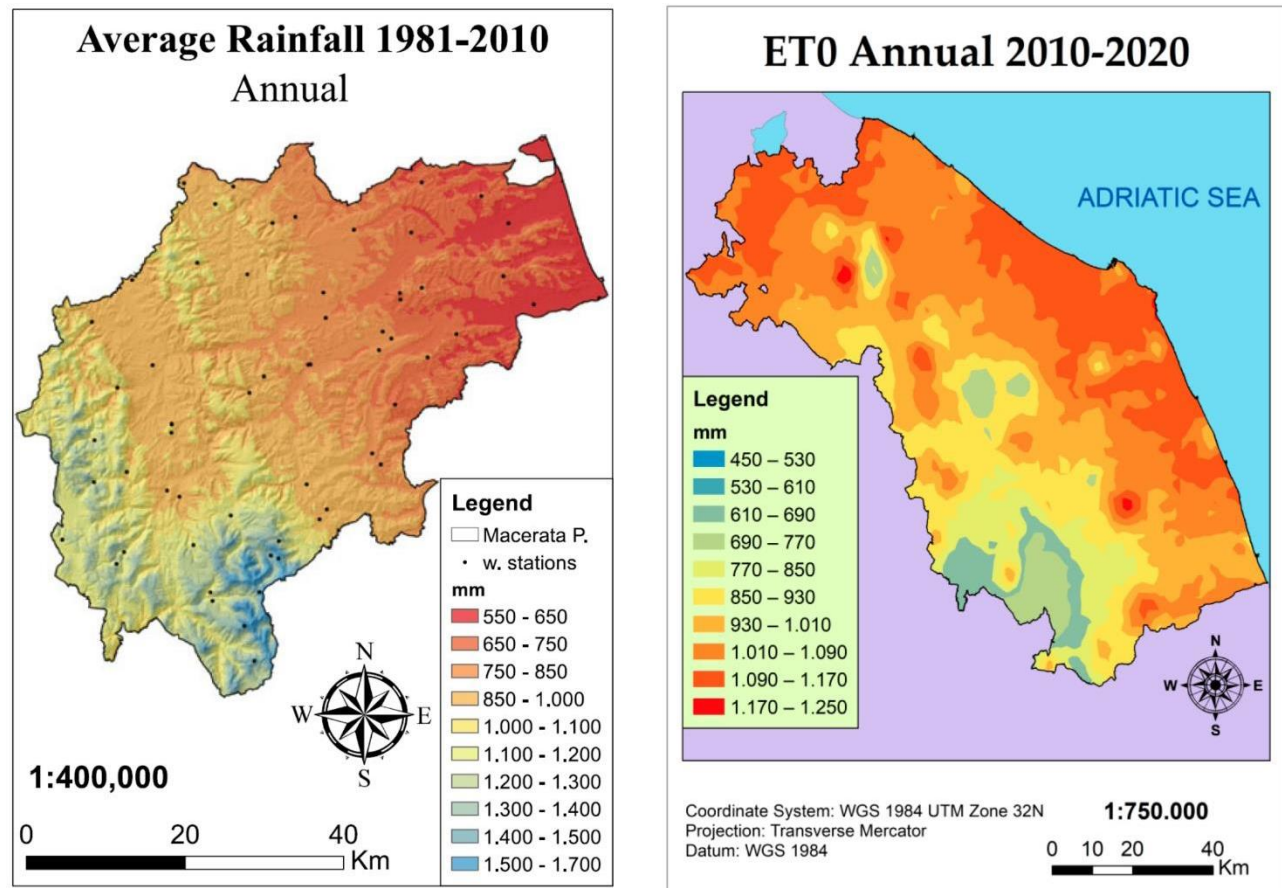


Figura 13 - Carta delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione media annuale rispettivamente della Provincia di Macerata e della Regione Marche (modificato da Gentilucci et al., 2019 e 2021).

Sulla base di pubblicazioni recenti di Gentilucci et alii (2019 e 2021) è possibile attribuire a questo settore una precipitazione media annuale di circa 1600mm ed un'evapotraspirazione media annuale (ET0, calcolata secondo la formula di Hargreaves) di circa 550mm; la pioggia efficace risulterebbe quindi di circa 1050mm/anno.

Considerando invece la presenza in superficie di litologie francamente calcaree, è possibile ipotizzare un Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (c.i.p.) molto alto e compreso fra l'80% ed l'85%.

I risultati del bilancio idrologico (Fig.14) indicano un areale di alimentazione medio di circa 5.6 kmq, esteso verso w fino al rilievo di Palazzo Borghese e verso S fino al Monte Vettore.

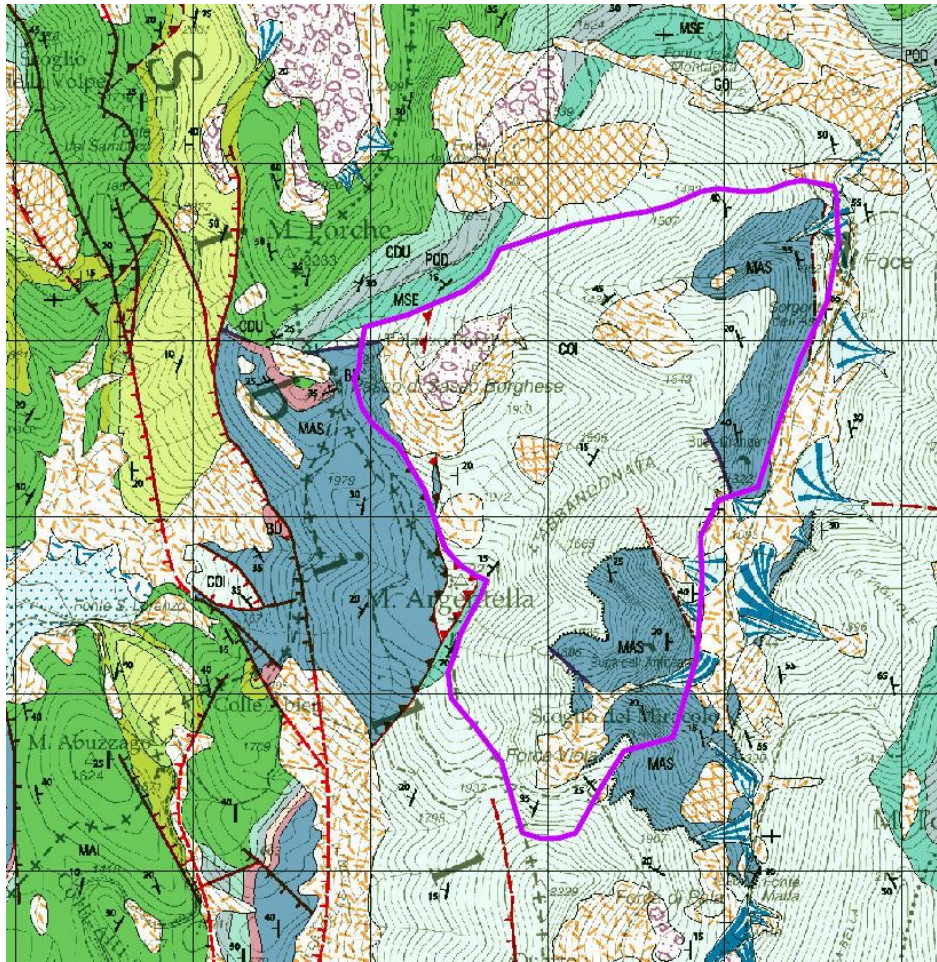


Figura 14 - Area di alimentazione della sorgente di Focce di Montemonaco (in viola)

I valori del Tasso di rinnovamento (T_{rin}) in percentuale compresi fra 85% e 90% e del Tempo di rinnovamento (t_{rin}) in anni pari ad 1.1, indicherebbero invece un acquifero con bassa capacità di autoregolamentazione delle portate (Fig.15). Tenuto conto tuttavia del trend ancora non del tutto stabilizzato della sorgente, tali valori sono soggetti ad un certo grado di approssimazione.

										LEGENDA		
$A_{bacino} (m^2)$		$T/2 (d)$								$Q_0 (l/s) =$ portata inizio recessione		
5400000		> 50								$Q_f (l/s) =$ portata fine recessione		
RECESSIONE 2020										$T (g) =$ tempo recessione		
$Q_0 (l/s)$	$Q_f (l/s)$	$T (d)$	α	$P (mm)$	$ETR (mm)$	$P_{eff} (mm)$	$I_{eff} (mm)$	$V_{tot} (m^3/y)$	$\alpha =$ coeff. Recessione			
185	129	168	0.014	1600	550	1050	840	4521478	$W_0 (m^3) =$ immagazzinamento dinamico			
$W_0 (m^3)$		$W_f (m^3)$		$\Delta W (m^3)$		$T_{rin} (%)$	$t_{rin} (yr)$	$DT_t (d)$	$R (m^3/y)$	$I_{eff} (mm)$	$W_f (m^3) =$ immagazzinamento fine recessione	
1141714.286		108693.29		1033021.00		0.904798	1.105219	9.749763	4536000	837.310741	$\Delta W (m^3) =$ volume liberato durante la recessione	
$A_{bacino} (m^2)$		$T/2 (d)$								$T_{rin} (%) =$ tasso di rinnovamento		
5800000		> 50								$t_{rin} (a) =$ tempo di rinnovamento		
RECESSIONE 2021										$DT_t (d) =$ delay time		
$Q_0 (l/s)$	$Q_f (l/s)$	$T (d)$	α	$P (mm)$	$ETR (mm)$	$P_{eff} (mm)$	$I_{eff} (mm)$	$V_{tot} (m^3/y)$	$P (mm) =$ precipitazioni			
165	119	140	0.014	1600	550	1050	840	4853000	$ETR (mm) =$ evapotraspirazione reale			
$W_0 (m^3)$		$W_f (m^3)$		$\Delta W (m^3)$		$T_{rin} (%)$	$t_{rin} (yr)$	$DT_t (d)$	$R (m^3)$	$I_{eff} (mm)$	$P_{eff} (mm) =$ precipitazioni efficaci	
1018285.714		143463.27		874822.44		0.859113	1.163991	13.95058	4872000	836.724138	$I_{eff} (mm) =$ infiltrazione efficace	
										$R (m^3) =$ ricarica durante l'anno idrologico		

Figura 15 – Bilancio idrologico della sorgente di Focce relativo agli anni 2020-2021

3 Vulnerabilità all'inquinamento e proposta di delimitazione delle aree di salvaguardia della sorgente di Foce di Montemonaco

Come per altre sorgenti montane, l'assenza pressoché totale di insediamenti antropici o produttivi di qualsiasi tipologia, rendono il rischio da inquinamento nell'area relativamente basso sebbene l'acquifero stesso, per le caratteristiche descritte nei precedenti capitoli, sia comunque altamente vulnerabile.

Per la stima del grado di vulnerabilità, come in altri casi, si è utilizzato il Metodo di Civita (2005) basato sul tempo di dimezzamento della portata sorgentizia (Fig.16 e Fig.17).



Figura 16 - Abaco per la determinazione della situazione di vulnerabilità in funzione del tempo di dimezzamento (da Civita, 2005)

Tipo di opera	Situazione	Soggiacenza (m)	D (m)	d (m)
Alla sorgente	A	nulla	40	10
	B	nulla	30	5
	C	nulla	20	5
	D	nulla	10	2
In acquifero	A	> 20	30	5
	B	> 20	20	4
	C	> 20	15	3
	D	> 20	10	2

Figura 17 - Valori indicativi di D e d per il dimensionamento della ZTA secondo il "Metodo Civita"

Per la sorgente di Foce di Montemonaco, al contrario degli altri valori, l'analisi degli idrogrammi ha in questo caso fornito risultati abbastanza certi sempre superiori ai 50 giorni; tale valore colloca la sorgente nella situazione D (Fig.16).

Tenuto conto del particolare contesto idrogeologico dell'area e della captazione si è deciso di utilizzare il criterio temporale per la Zona di Tutela Assoluta (ZTA) e un metodo misto,

temporale-idrogeologico per la Zona di Rispetto (ZR); un criterio puramente idrogeologico, come verrà precisato di seguito, è stato invece scelto per la Zona di Protezione (ZP).

Riguardo la ZTA, sono stati utilizzati i valori indicati dal Metodo Civita riportati nella tabella di Fig.17; a tale riguardo è stato anche verificato che la recinzione intorno all’opera di presa è adeguata e risponde pienamente ai requisiti normativi (Fig.18).



Figura 18 - Proposta di perimetrazione della ZTA per la sorgente di Foce di Montemonaco (in rosso).

Per quanto riguarda la ZR, è stato definito un areale seguendo le indicazioni riportate in Fig.19, modificato su base idrogeologica per tener conto della presenza delle gallerie di captazione (Fig.20).

Situazione	Estensione a monte	Note
A	Tutta l'area di alimentazione	Efficacia limitata
B	Tutta l'area di alimentazione	Riducibile a 2000 m in caso di acquifero protetto in superficie
C	L = 400 m	
D	L = 200 m	

Figura 19 - Dimensionamento della ZR nelle diverse situazioni di vulnerabilità (modificato da Civita, 1988 e 2005)

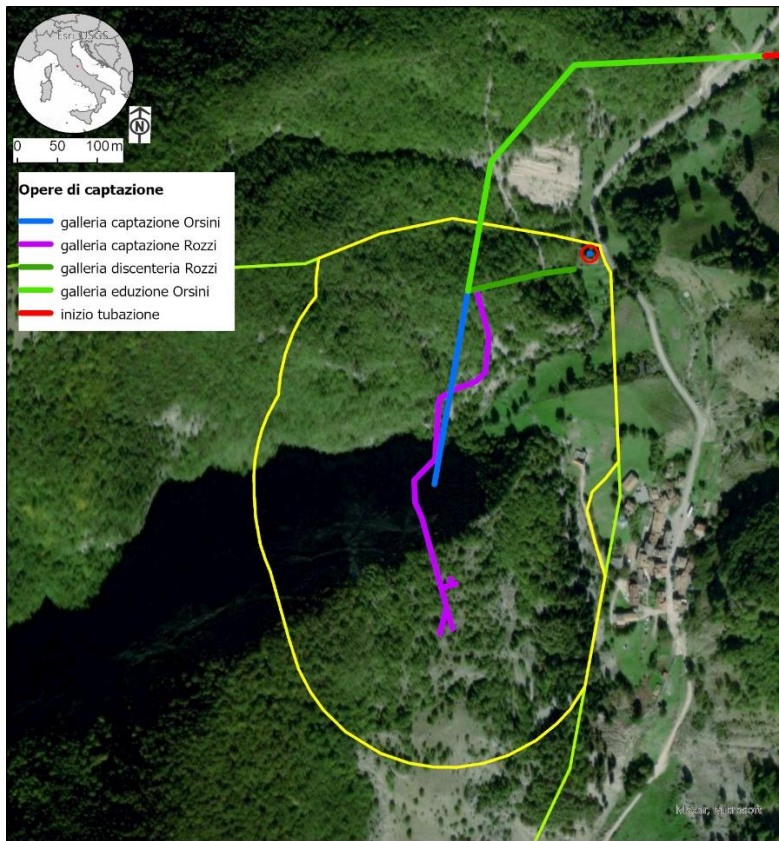


Figura 20 - Proposta di perimetrazione della ZR (in colore giallo) per la sorgente di Foce.

La Zona di Protezione (ZP), infine, come da normativa, è stata tracciata comprendendo tutta la possibile area di ricarica dell'acquifero (Fig.21).

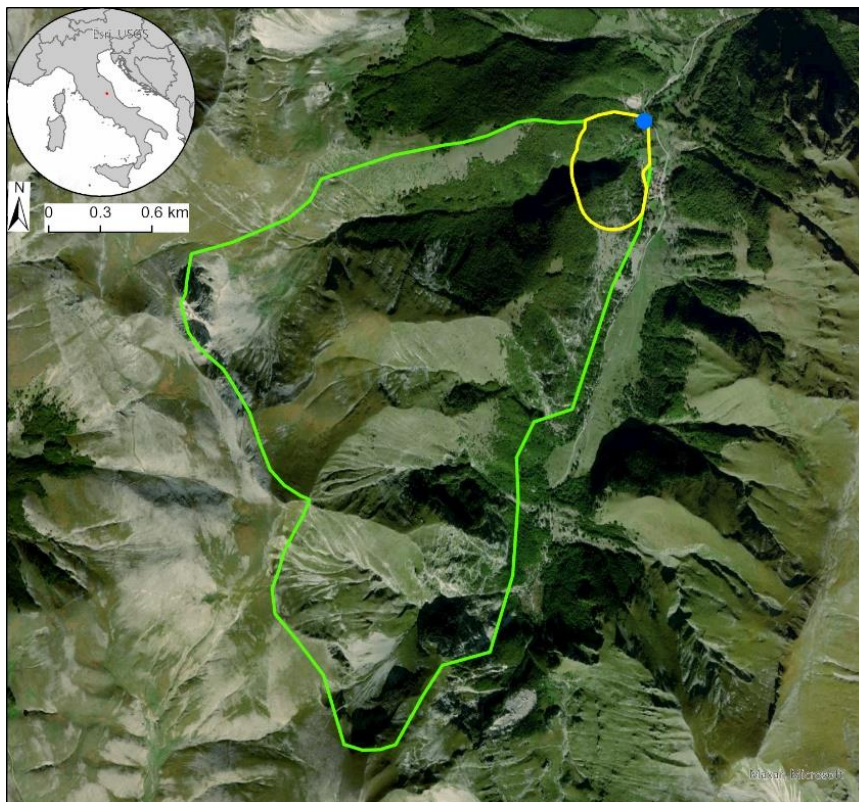


Figura 21 - Proposta di perimetrazione della ZP (in colore verde) per la sorgente di Foce di Montemonaco.

4 Bibliografia essenziale

Gentilucci, M., Bufalini, M., Materazzi M., Barbieri M., Aringoli D., Farabollini P.; Pambianchi G. (2021) - Calculation of Potential Evapotranspiration and Calibration of the Hargreaves Equation Using Geostatistical Methods over the Last 10 Years in Central Italy. *Geosciences* 2021, 11, 348.

Gentilucci M., Materazzi M., Pambianchi G., Burt P., Guerriero G. (2019) - Assessment of variations in the temperature-rainfall trend in the province of Macerata (Central Italy), comparing the last three climatological standard normals (1961–1990; 1971–2000; 1981–2010) for biosustainability studies. *Environ. Process.* 2019, 6, 391–412.